

Energetische Bewertung zur Optimierung von Müllheizkraftwerken

Michael Beckmann, Bauhaus-Universität Weimar

Reinhard Scholz, Technische Universität Clausthal

1 Einleitung

Die thermische Abfallbehandlung - hier insbesondere die Müllverbrennung – ist eine wichtige Verfahrenstechnik in der Abfallwirtschaft, die einerseits die Entsorgungssicherheit garantiert und andererseits die Umwandlung der im Abfall enthaltenen Energie in Nutzenergie sowie die Rückgewinnung von Wertstoffen ermöglicht. Nachdem in der Vergangenheit bei der thermischen Abfallbehandlung zunächst Sekundärmaßnahmen und später Primärmaßnahmen zur Minderung des Schadstoffausstoßes im Vordergrund der Entwicklungen standen, tritt in letzter Zeit zusätzlich u.a. der Gesichtspunkt hinzu, bei gleicher Entsorgungssicherheit die Energiewandlungsvorgänge in Müllheizkraftwerken möglichst effizient durchzuführen bzw. zu optimieren, d.h., zusätzliche Energieaufwendungen (z.B. für die Abfall- (Brennstoff-) -aufbereitung, für benötigte Hilfsstoffe etc.) zu verringern und die Nutzenergie (elektrischer Strom und Fernwärme), die letztlich aus dem mit dem Abfall zugeführten Energiestrom verbleibt, zu steigern. Dies geschieht vor dem Hintergrund, durch die Abfallverbrennung eine Primärenergiesubstitution und eine $\text{CO}_{2,\text{fossil}}$ -Minderung (auch durch regenerativen Kohlenstoff im Abfall) zu erreichen.

In dem vorliegenden Beitrag wird eine zusammenfassende Übersicht über das methodische Vorgehen bei der Bewertung von Müllheizkraftwerken als Grundlage für eine Optimierung gegeben.

2 Systemgrenzen und Bilanzen

Sollen Verfahren oder Anlagen beurteilt werden, so ist eine Abgrenzung, d.h. die Festlegung von Systemgrenzen¹ zwingend notwendig, weil erst dann deutlich wird, was bewertet

¹ „Systemgrenze“, „Bilanzgrenze“, „Bilanzkreis“ haben begrifflich identische Bedeutung.

werden soll: ein Anlagenteil, eine Anlagengruppe, eine gesamte Anlage, eine Verfahrenskette usw.. Diese Vorgehensweise ist in der Verfahrenstechnik allgemein üblich.

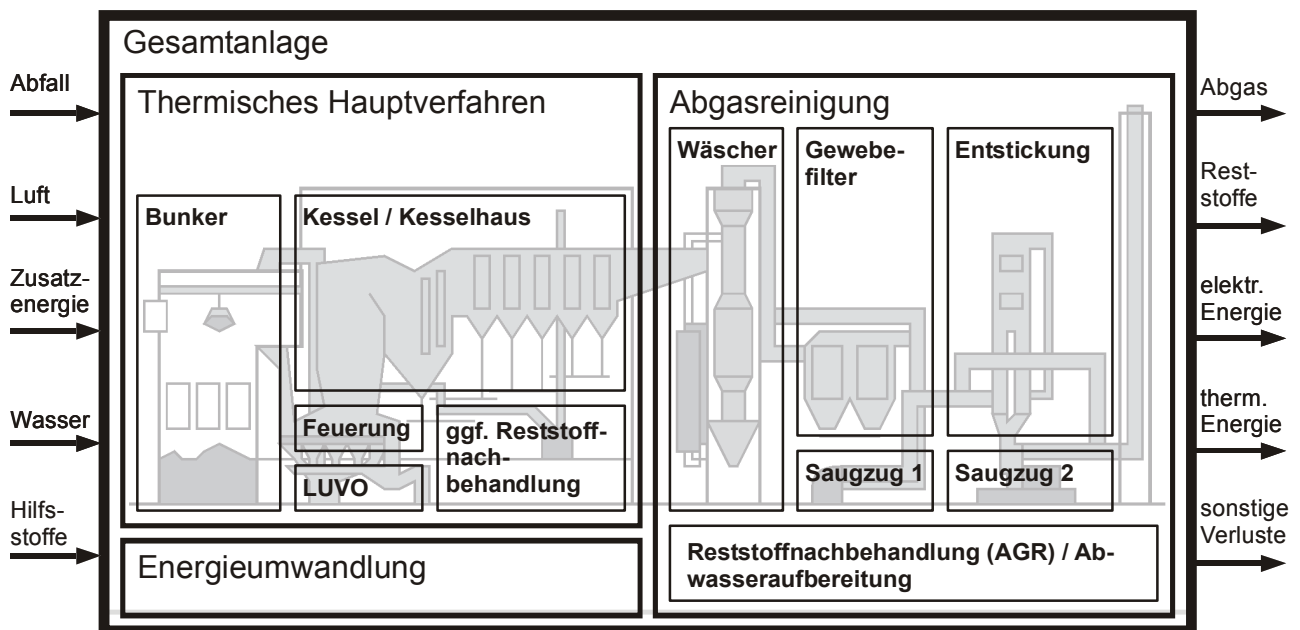


Abb. 1. Übergeordnete Bilanzkreise für die Bilanzierung einer Müllverbrennungsanlage, z.B. Bilanzkreise: Bunker, LUVO, Feuerung usw. bis Bilanzkreis Gesamtanlage), Darstellung der wesentlichen Massen- und Energieströme.

Die Abb. 1 zeigt beispielhaft die Aufteilung einer Müllverbrennungsanlage (Gesamtanlage) in die Bilanzkreise (Bausteine) Thermisches Hauptverfahren, Abgasreinigung und Energieumwandlung.

An einer Systemgrenze werden alle ein- und austretenden Massen-, Stoff- und Energieströme angetragen. Dabei empfiehlt sich eine Nummerierung der Ströme, die zusätzlich die Angabe der jeweiligen Systemgrenze enthält. Die Abb. 2 zeigt hierzu als Beispiel eine prinzipielle Darstellung für den Bilanzkreis der Feuerung. Die zugehörigen Werte für die Ströme liegen entweder aus Messungen vor oder sie müssen durch eine entsprechende Bilanzierung auf der Grundlage der Erhaltungssätze² für Masse und Energie usw. ermittelt werden. Wichtig bei Bilanzierungen ist, dass man den Nullpunkt bzw. einen Bezugszustand für die jeweiligen Massen-, Energie- und Stoffströme festlegt und diesen von einer Systemgrenze zur nächsten beibehält. Die Bilanz für ein bestimmtes System muss in je-

² Hierzu zählen u.a. die so genannte Verbrennungsrechnung, Berechnungsmethoden für Wärmeübertrager, Turbinen usw.

dem Fall auf Plausibilität geprüft werden, nur so erhält man „Bilanzen, die schlüssig aufgehen“.

Sind Randbedingungen Schwankungen unterworfen, z. B. wenn bei Müllkraftwerken die Brennstoff-(Müll-)zusammensetzung in der Regel nur abschätzend bekannt ist und in relativ weiten Bereichen schwankt, sind Bilanzierungen schwierig. Darum ist der Plausibilität einer Bilanz jeweils besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Bei fehlenden oder auch bekannten, jedoch nicht plausibel erscheinenden

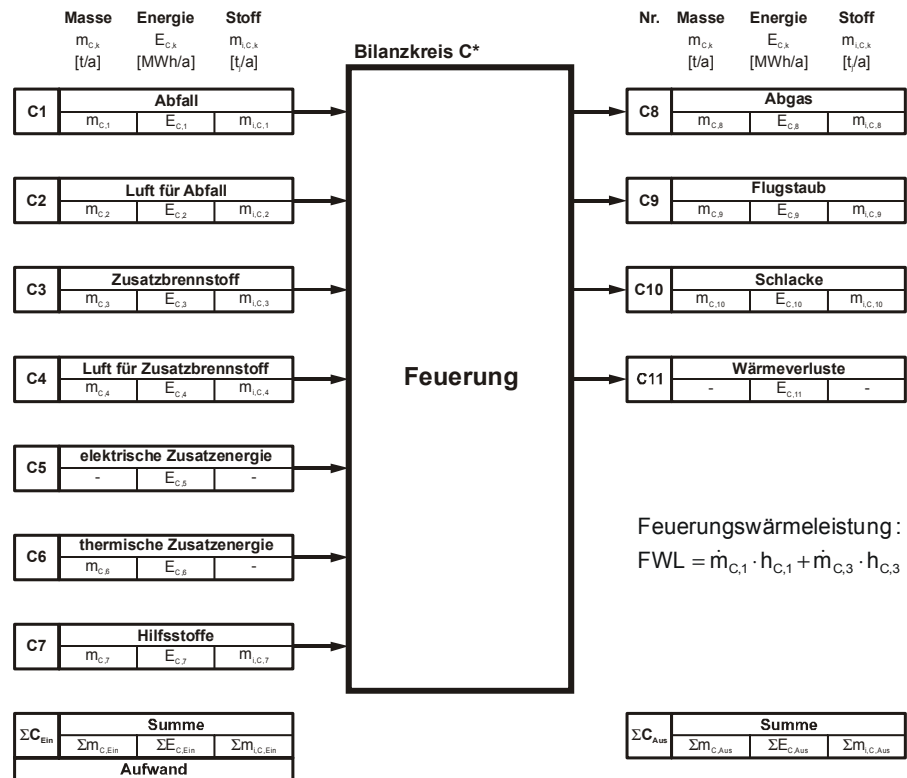


Abb. 2. Prinzipielle Darstellung für ein Bilanzschema mit den zugehörigen Strömen für die Massen-, Energie- und Stoffbilanz (hier Kohlenstoffbilanz).

Größen sind dabei sog. Kompatibilitätsüberlegungen (z.B. sog. Rückwärtsrechnungen mit Stoff- und Energiebilanzen) an allen Systemgrenzen durchzuführen. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass Massen- oder Stoff- oder Energiebilanzen jeweils für sich allein, d.h. einzeln betrachtet, in der Regel nicht ausreichen. Erst Plausibilitätsüberlegungen mit allen drei Instrumenten an jeweils ein und derselben Systemgrenze zeigen Unschärfen, Unsicherheiten aber auch Fehler auf, d.h. geben die Sicherheit, eine tragfähige Basis für eine nachfolgende Beurteilung zu haben.

Erst nach Kompatibilitäts- und Plausibilitätsüberlegungen werden mit Hilfe der nun vorliegenden Massen-, Energie- und Stoffbilanzen Bewertungen durchgeführt. Aus den ermittelten Werten für die ein- und austretenden Massen-, Stoff- und Energieströme lassen sich dann für das betrachtete System Kennwerte, wie z.B. Wirkungsgrad, spezifischer Energiebedarf oder spezifische Schadstoffemission, bilden. Wichtig ist, dass Kenngrößen und

Kennzahlen immer mit Werten jeweils an ein und derselben Systemgrenze gebildet werden.

An der Systemgrenze kann beispielsweise der Nutzen am Austritt und der Aufwand am Eintritt ermittelt werden. Danach kann z.B. eine Bewertung durch Bilden der Größe „Wirkungsgrad η “, die ganz allgemein das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand:

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

ist, erfolgen. Bei der Diskussion, was Nutzen und was Aufwand ist, kommt es sehr häufig zu Missverständnissen, weil entweder keine oder ganz verschiedene Systemgrenzen (Bilanzkreise) angegeben sind und damit Werte genannt werden können, die nicht nur verschieden, sondern auch widersprüchlich sein können. Verbale Beschreibungen von Systemen und Systemgrenzen sind für einleitende und orientierende Diskussionen hilfreich. Für konkrete Beurteilungen sind Systeme mit technischen Zeichnungen, mit geeigneten Schemata, mit Skizzen usw. darzustellen, um zu zeigen,

- welche Größen (Stoffe, Massen und Energien) betrachtet und welche Zahlenwerte jeweils angesetzt werden,
- wie die Bilanzen erstellt sind,
- wie die Bilanzen geschlossen werden,
- wo, d.h. an welcher Systemgrenze welche Kenngrößen und Kennzahlen gebildet werden.

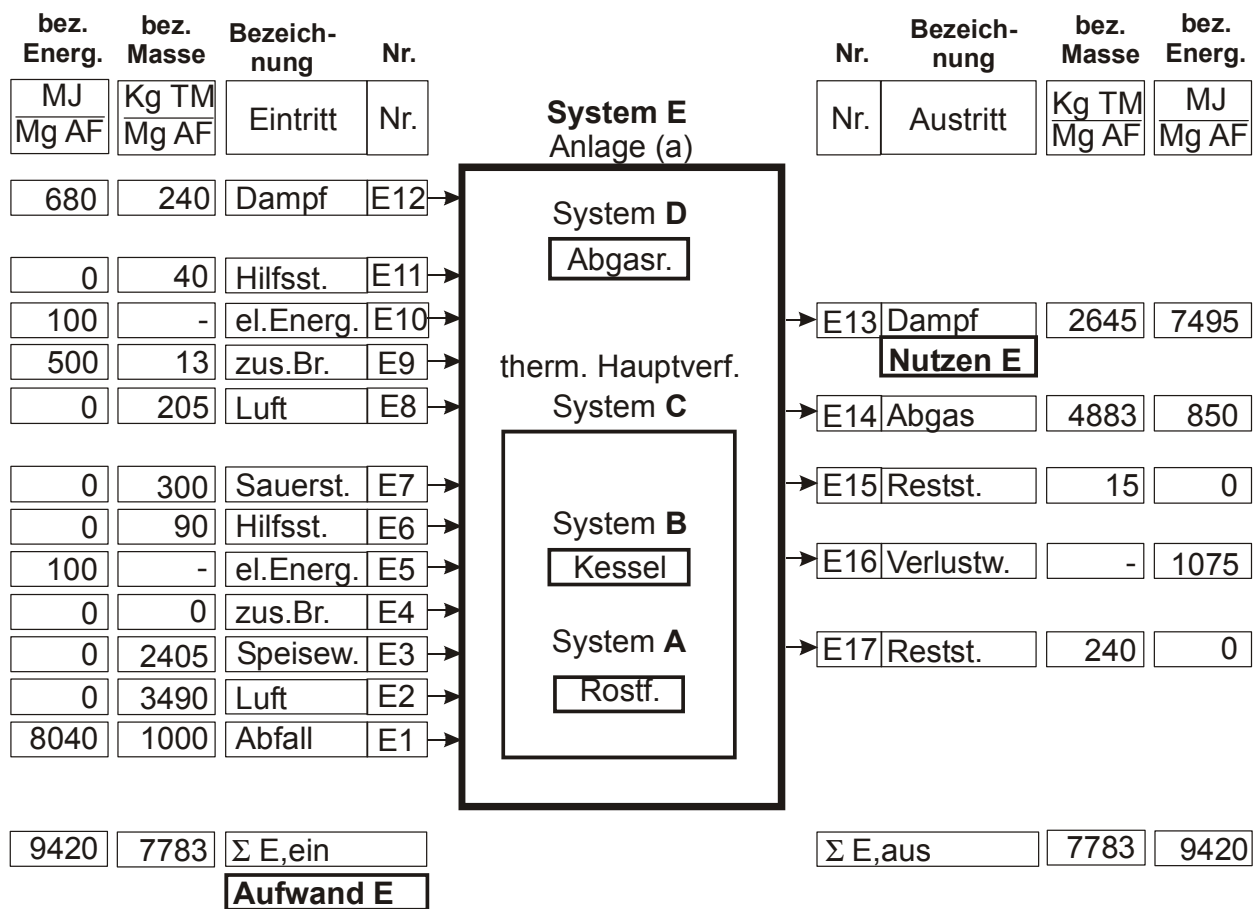
Bei den Kennwerten ist daher die Angabe der jeweils betrachteten Systemgrenze mit anzugeben.

3 Anlagenwirkungsgrad einer Müllverbrennungsanlage mit und ohne Rückführung

Als Anfangssystem diene die Abb. 3. Dort ist das thermische Hauptverfahren, z.B. bestehend aus Rostfeuerung (Systemgrenze A) und Kessel (Systemgrenze B), durch die Systemgrenze C (thermisches Hauptverfahren) 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 Folgenden 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 der Übersichtlichkeit wegen nur einen thermischen Energiestrom (Dampfstrom (Nr. E13)) erzeuge.

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.



$$\eta_{E,a,ohne\ rück} = \frac{E13}{\Sigma E_{,ein}} = \frac{7495}{9420} = 79,6\%$$

Abb. 3. System zur Bildung des Anlagenwirkungsgrades η_a (ohne Rückführung) [6].

Im vorliegenden Fall wird

$$\eta_E = \eta_{E,a} = \eta_{E,a,ohne\ rück} = \frac{Nr. E13}{\Sigma E_{,ein}} = 79,6\% \quad 3$$

³ Da keine Energie rückgeführt wird, wird zur weiteren Verdeutlichung der Index „ohne rück“ hinzugefügt.

Benötigt die Anlage aus dem produzierten Nutzen (hier thermischer Nutzen des Stromes E13, Dampf) einen Teil als Eigenbedarf, so wird dieser rückgeführt, was in Abb. 4 dargestellt ist. Die Bilanzgrenze E der Abb. 3 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 (Abb. 4).

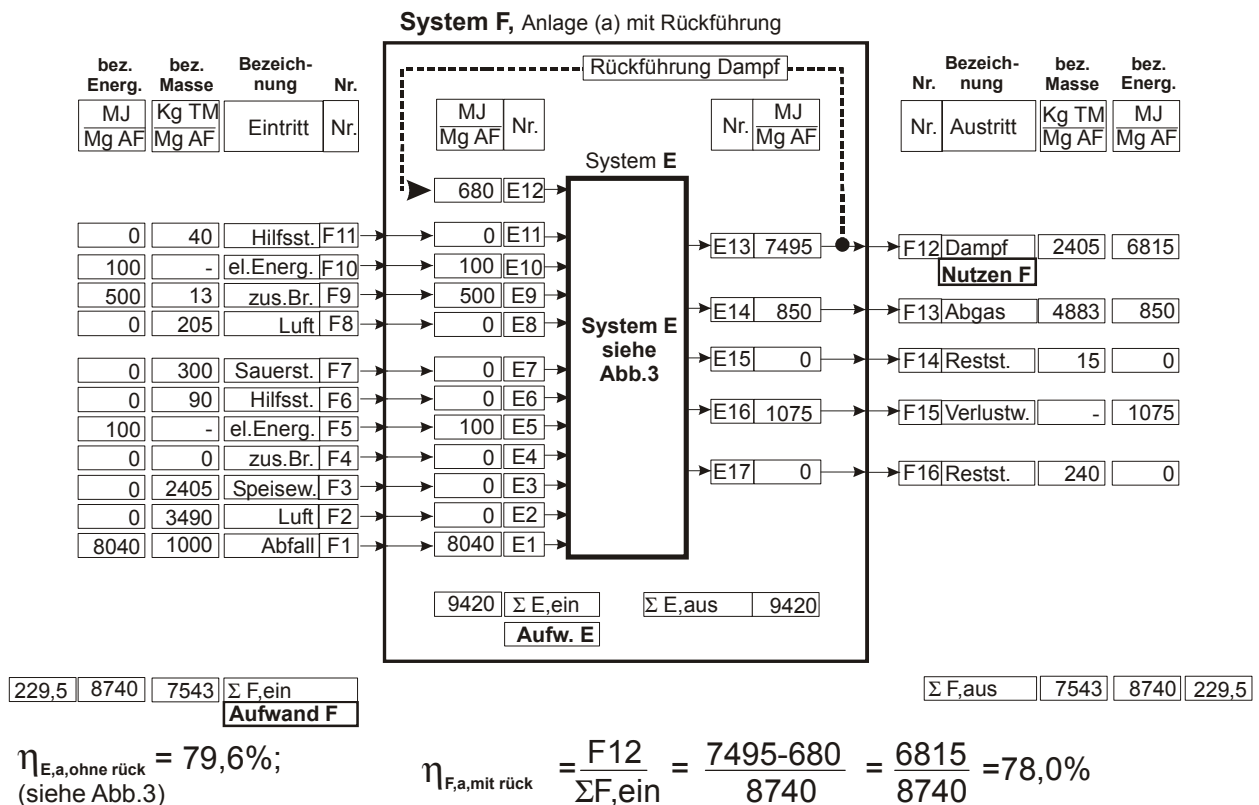


Abb. 4. System zur Bildung des Anlagenwirkungsgrades η_F (mit Rückführung) [6].

Unter Berücksichtigung des Eigenbedarfes hat die Anlage nun einen Wirkungsgrad

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

4 Beschreibung des Nutzerverhaltens

Abfallbehandlungsanlagen unterliegen einer Entsorgungspflicht. So müssen z.B. Müllheizkraftwerke Energie umsetzen (Verbrennen) auch wenn die von Verbrauchern benötigte Energie kleiner als das angebotene Nutzpotenzial der Anlage ist. 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 den Teil der dargestellten Nutzenergie, die 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 [6].

5 Systemgrenzen zur Beschreibung von Verfahrensketten (Erweiterung z.B. bis zu Primärenergieaufwendungen)

Bei Abfallbehandlungsanlagen sind häufig zusätzliche Aufwendungen für die Abfallaufbereitung, für Hilfsstoffe (z.B. Sauerstoffbereitstellung für die Anreicherung der Verbrennungsluft, zusätzliche Aufwendungen für Schlackeaufbereitung, Abgasreinigung, usw.) erforderlich. Hieraus ergibt sich, dass die eigentliche Behandlungsanlage nur ein Glied in einer ganzen Verfahrenskette ist. Es muss daher nun eine Systemgrenze um die gesamte Verfahrenskette gezogen und diese zurück bis zu den Primäraufwendungen (Primärener-

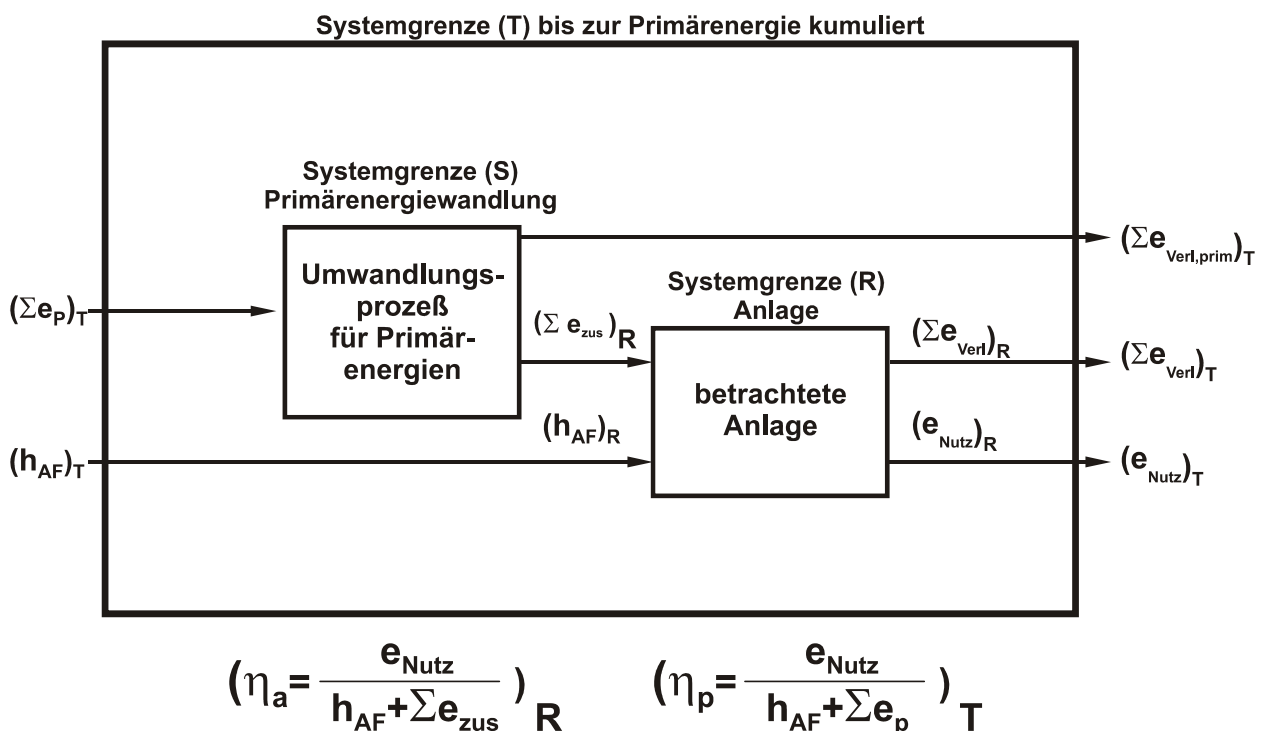


Abb. 5. Erweiterung der Systemgrenze R einer Anlage zur Einbeziehung der Umwandlungsprozesse der Primärenergien (Systemgrenze S) zur Systemgrenze T [4].

gie) bilanziert werden (Abb. 5, Prinzip). Erst danach ist z.B. die Bildung von Primärwirkungsgraden und die Ermittlung zugehöriger CO₂-Emissionen möglich. Der sog. Primärwirkungsgrad ist dann an der Systemgrenze (T) wie folgt zu bilden,

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

Der Primärwirkungsgrad η_p kann erheblich kleiner sein als der Anlagenwirkungsgrad η_a .

6 Systemgrenzen zur Beschreibung von Nettoeffekten von Verfahrensketten (z.B. zur Beschreibung nur dem Abfall zuzuschreibenden CO₂ - Emissionen usw.)

Wenn es den Abfall nicht gäbe, wären auch die zuvor genannten Primärenergieaufwendungen nicht notwendig. In einem weiteren Schritt wird daher eine gedankliche Rückführung⁴ dieser Aufwendungen aus dem Nutzen vorgenommen. Aus der sich nunmehr ergebenden erweiterten Bilanz (neuer Bilanzkreis, Abb. 6, Prinzip) erhält man den Nettoeffekt

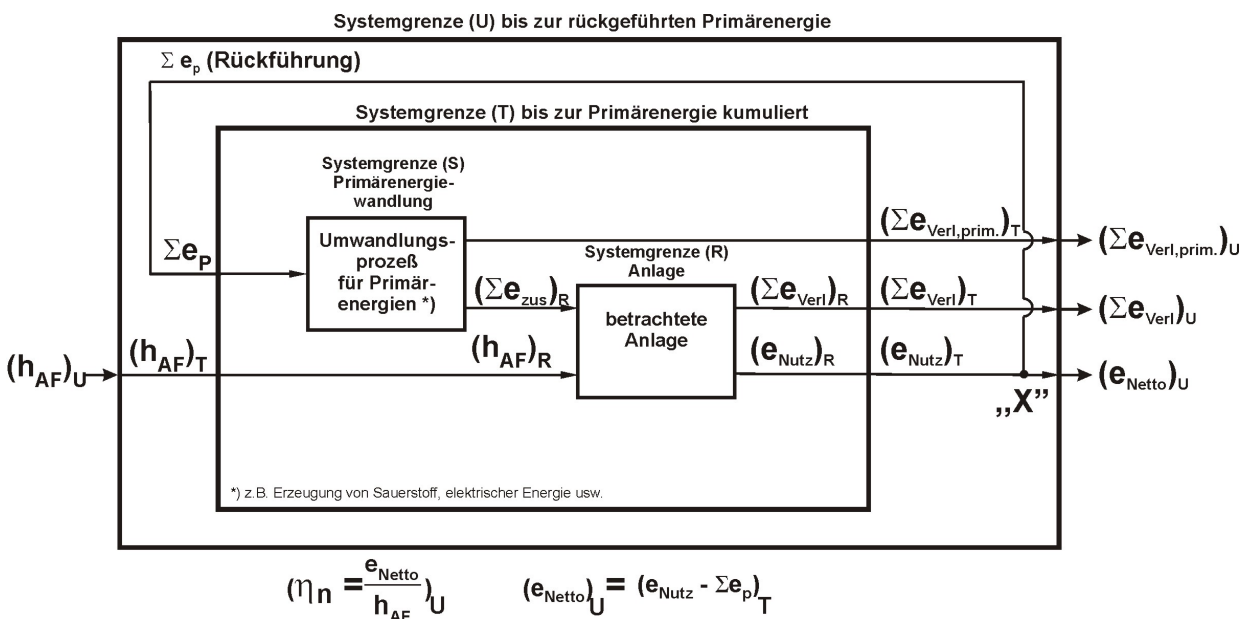


Abb. 6. Erweiterung der Systemgrenze T zur Darstellung der Rückführung der aufzuwendenden Primärenergien zur Systemgrenze U [4].

⁴ Hier ist 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 $f_{\text{sub}} \neq 1$ und hängt von vielen Faktoren ab. Der Übersichtlichkeit wegen wird hier $f_{\text{sub}} = 1$ gesetzt, um das Prinzip der Substitution bzw. der Energierückführung so einfach, wie in Abb. 6 dargestellt, zu veranschaulichen. Was die Ermittlung von f_{sub} betrifft, wird auf [z.B. 1 bis 5] verwiesen.

aus dem Abfall, d.h. z. B: den Nettoprimärwirkungsgrad und die zugehörige Netto-CO₂-Emission, die ausschließlich dem Abfall zuzuordnen sind. Damit werden z.B. die derzeit diskutierten Fragestellungen, ob eine energetische Verwertung bei einer Abfallverbrennung vorliegt oder nicht, in einfacher und auch eindeutiger Weise beantwortet. Die Systemgrenze U zeigt sehr deutlich, dass somit als Aufwand bei dem System U nur noch die zugeführte Abfallenergie h_{AF} verbleibt, d.h., es wird keine Fremdenergie mehr benötigt. Als Nutzen verbleibt dann nur die Nettoenergie $(e_{Netto})_U$ (System U), die ausschließlich der Wirkung des Abfalls allein zuzuordnen ist. Dem entsprechend bezeichnet man den zugehörigen Wirkungsgrad „Nettoprimärwirkungsgrad“. An dem System U ergibt sich folglich

$$\left(\eta_n = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{e_{Netto}}{h_{AF}} \right)_U \quad (\text{Bilanz am Knoten „X“ in Abb. 6})$$

$$e_{Netto,U} = e_{Nutz,T} - \sum e_P$$

Erhält man für η_n einen Wert $\eta_n > 0$ ($\eta_{Netto,U} > 0$), wird aus dem Abfall ein energetischer Nutzen gezogen, d.h. ein Nutzen, der wirklich nur dem Abfall zuzuschreiben ist, weil nur noch der Abfall (h_{AF}) an der Bilanzgrenze U als Aufwand auftritt. Ein Nutzen kann damit auch nur aus dem Abfall stammen. Eine Abfallverbrennungsanlage hat dann über das Mindestziel der stofflichen Entsorgung (eventuell stoffliche Verwertung der Reststoffe) noch zusätzlich mit $\eta_n > 0$ **den Aspekt der energetischen Verwertung erfüllt.**

Ergäbe sich für η_n einen Wert $\eta_n < 0$, d.h. würde die zusätzlich benötigte Energie $\sum e_P$ größer als der Nutzen $(e_{Nutz})_T$ des Systems T sein, dann reicht die im Abfall mitgeführte Energie (Enthalpie) h_{AF} nicht aus, um den „Primärenergieaufwand“ zu decken“, es verbliebe somit ein Primärressourcenverbrauch bei der Abfallbehandlung. Für $\eta_n < 0$ wäre somit der Aspekt einer zusätzlichen energetischen Verwertung nicht erfüllt⁵.

⁵ Häufig wird bei negativen Werten von η_n nicht von einem Wirkungsgrad sondern von einem Aufwandsgrad gesprochen. Beide Begriffe sind mit identischem Inhalt belegt.

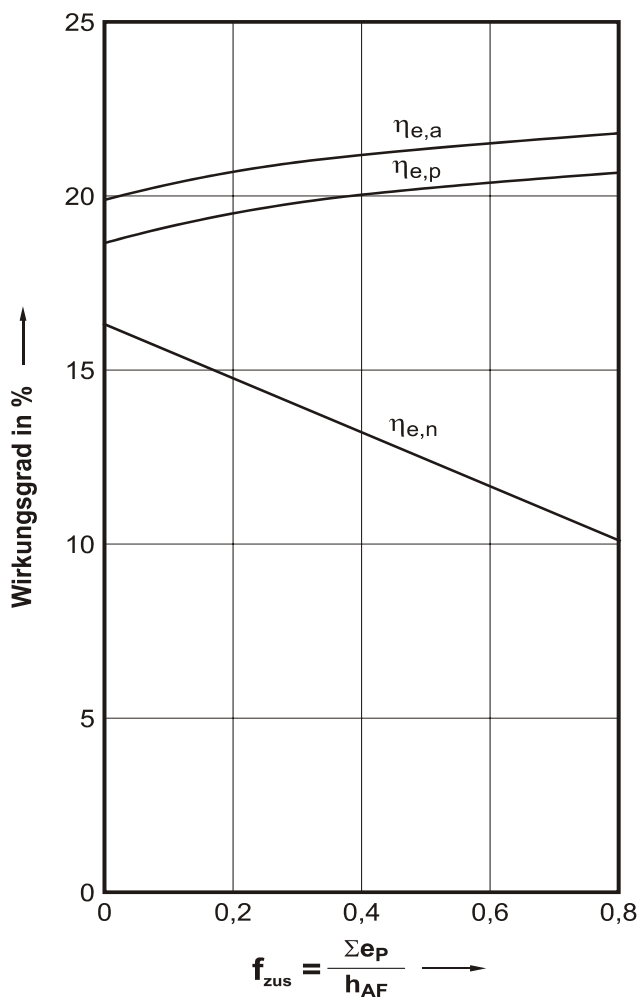


Abb. 7. Anlagenwirkungsgrad $\eta_{e,a}$, Primärwirkungsgrad $\eta_{e,p}$, Nettoprimärwirkungsgrades $\eta_{e,n}$, (jeweils elektrisch Index e) in Abhängigkeit des Verhältnisses f_{zus} , d. h. des Verhältnisses von erforderlicher Primärenergie $\sum e_p$ zu der Abfallenergie h_{AF} (Beispiel aus[4]).

Die Bildung eines Nettowirkungsgrades η_n ist vor einem weiteren Hintergrund sinnvoll: Man sollte sich bemühen, für eine Abfallbehandlung möglichst wenig Primärenergie einzusetzen. Verwendet man z.B. bei gleich bleibender Abfallenergie h_{AF} zusätzlich laufend steigende Primärenergie $\sum e_p$ (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 wie in Abb. 7 beispielhaft an elektrischen Wirkungsgraden (Index „e“) gezeigt ist.

7 Systemgrenzen zum Vergleich von Verfahrensketten (Entscheidungshilfen zu Art und Ort des Einsatzes von Abfall oder auch Beurteilung von Ersatzbrennstoffen usw.)

Mit dem bisher erläuterten Vorgehen kann nun durch erneute Erweiterung der Systemgrenzen auch ein Vergleich von Verfahrensketten erfolgen (z.B. [7], [8]), d.h. z.B.

- welchem der betrachteten Behandlungsverfahren der Vorzug zu geben ist,

- ob es sich z.B. bei der Herstellung von Ersatzbrennstoff durch mechanisch-biologische Verfahren wirklich um Ersatzbrennstoff handelt, d.h. um Brennstoff, der Primärenergieressourcen einspart oder nicht
- usw.

Ein Ersatzbrennstoff, bei dessen Herstellung in der zugehörigen Verfahrenskette durch relativ hohen Einsatz von Zusatzenergie schließlich weniger Nutzen verbleibt als im Vergleich zur herkömmlichen Situation, bei der man die Herstellung und den Einsatz von Ersatzbrennstoff (d.h. die Substitution von Regelbrennstoff) unterlässt, ist schließlich nicht als Ersatzbrennstoff zu bezeichnen, da dann Primärenergie nicht eingespart, sondern zusätzlich aufgewendet wird.

8 Schrifttum

- [1] Marcard, W.: Zusammenhänge zwischen Feuerraum, Feuerraumtemperatur, Verbrennungsvorgang und Wirkungsgrad. Die Wärme / Zeitschrift für Dampfkessel und Maschinenbetrieb, Jg. 53, Nr. 39, 1930.
- [2] Lüth, F.: Bewertung verschiedener Brennstoffe. Stahl und Eisen 71, Nr.7, 1951.
- [3] Cernoch, S.: Vergleichende wärmetechnische Bewertung von Brennstoffen für Industrieöfen. Arch. Eisenhüttenwesens 44, Nr.7, 1973, S.521-527.
- [4] 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: ZKG INTERNATIONAL 52 (1999) 6, S. 287-303. Teil 2 / Part 2: ZKG INTERNATIONAL 52 (1999) 8, S. 411-419.
- [5] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren. Verbrennung, Vergasung, Pyrolyse, Verfahrens- und Anlagenkonzepte. Teubner-Reihe UMWELT, B. G. Teubner GmbH, Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden 2001, ISBN 3-519-00402-X, S.1-460.
- [6] Scholz, R.; Harnaut, T.; Beckmann, M.; Horeni, M.: Zur systematischen Bewertung der Energieumwandlungen bei der thermischen Abfallbehandlung – Was ist Energieeffizienz? In: Optimierung der Abfallverbrennung 1, TK - Verlag, Neuruppin 2004, ISBN 3-935317 - 16 - 6, S. 203 – 235.
- [7] BMBF-Abschlussbericht Förderkennzeichen 1471114: Möglichkeiten der Kombination von mechanisch-biologischer und thermischer Behandlung von Restabfällen. 1999.
- [8] Schulenburg, F.; Scholz, R.: Energetische Bilanzierung von Verfahrenslinien aus mechanisch-biologischer und nach geschalteter thermischer Abfallbehandlung. in: „Stoffstromspezifische Abfallbehandlung im Hinblick auf thermische Verfahren“ Zentrum für Abfallforschung, Braunschweig 1998, Heft 13, ISSN 0934-9243, S. 15-52.