

Bilanzierung und energetische Bewertung von Verfahren zur Abfallbehandlung

Michael Beckmann, Reinhard Scholz und Martin Pohl

1.	Systemgrenzen.....	147
1.1.	Kennzeichen von Systemgrenzen	147
1.2.	Anwendung von Systemgrenzen.....	148
1.2.1.	Systemgrenzen als Voraussetzung für die Bilanzierung	148
1.2.2.	Systemgrenzen als Voraussetzung zu Plausibilitätsfragen	148
1.2.3.	Systemgrenzen als Voraussetzung zur Bildung von Kenngrößen und Kennzahlen	149
1.2.4.	Systemgrenzen zur Darstellung zeitlicher Abhängigkeiten	149
1.3.	Weitere Beispiele zu Systemgrenzen.....	149
1.3.1.	Systemgrenzen zur Beschreibung des Verbraucherverhaltens (Abnehmerverhaltens)	149
1.3.2.	Systemgrenzen zur Beschreibung von Verfahrensketten (Erweiterung z.B. bis zu Primärenergieaufwendungen)	149
1.3.3.	Systemgrenzen zur Beschreibung von Nettoeffekten von Verfahrensketten (z.B. zur Beschreibung nur dem Abfall zuzuschreibenden CO ₂ -Emissionen usw.).....	150
1.3.4.	Systemgrenzen zum Vergleich von Verfahrensketten (Entscheidungshilfen zu Art und Ort des Einsatzes von Abfall oder auch Beurteilung von Ersatzbrennstoffen usw.)	151
1.3.5.	Systemgrenzen zur Berücksichtigung von Quellen und Senken	152
2.	Massen-, Stoff- und Energiebilanzen.....	152
2.1.	Allgemeine Grundlagen	152
2.2.	Massen-, Stoff- und Energiebilanzen aus Vorgabewerten in Verbindung mit verfahrenstechnischen Berechnungsmethoden	155
2.3.	Massen-, Stoff- und Energiebilanzen aus Betriebsmessungen in Verbindung mit verfahrenstechnischen Berechnungsmethoden	156
2.4.	Beispiele für die Verwendung von Massen- und Energiebilanzen für die Ermittlung von Heizwerten	158
2.4.1.	Heizwertberechnung aus der Brennstoffzusammensetzung	158
2.4.2.	Ermittlung von Heizwerten aus Anlagendaten	159

3.	Kennwerte	163
3.1.	Was sind Kennwerte	163
3.2.	Zur Bildung von Kennwerten.....	164
3.3.	Bildung von Äquivalenzwerten zur Ermittlung der Primärenergie.....	167
3.4.	Beispiele zur Bildung von Kennwerten und deren Bedeutung.....	172
3.4.1.	Anlagenwirkungsgrad einer Abfallverbrennungsanlage mit und ohne Abgasrückführung	172
3.4.2.	Systemgrenzen zur Beschreibung des Verbraucherverhaltens (Abnehmerverhaltens), hier Beispiel Nutzungsgrad (Nutzungswirkungsgrad) η_t	174
3.4.3.	Beschreibung von Verfahrensketten, hier Beispiel Primärwirkungsgrad η_p	176
3.4.4.	Systemgrenzen zur Beschreibung von Nettoeffekten von Verfahrensketten, hier Beispiel Nettoprimärwirkungsgrad η_n	177
3.4.5.	Beispiel der Bewertung des Stoffflusses Kohlenstoff (Kohlendioxidemissionen) einer Abfallverbrennungsanlage	181
3.5.	Einsatz von Abfall in anderen industriellen Hochtemperaturverfahren – Brennstoffsubstitution, Energieaustauschverhältnis –.....	182
4.	Symbole und Indizes.....	186
5.	Quellen	189

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 werden soll: ein Anlagenteil, eine Anlagengruppe, eine gesamte Anlage, eine Verfahrenskette usw.

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 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. Die so erhaltene Bilanz für ein bestimmtes System muss in jedem Fall auf Plausibilität geprüft werden, nur so erhält man *Bilanzen, die schlüssig aufgehen*.

Aus den ermittelten Werten für die ein- und austretenden Massen-, Stoff- und Energieströmen lassen sich dann für das betrachtete System Kennwerte, wie z.B. Wirkungsgrad, spezifischer Energiebedarf oder spezifische Schadstoffemission, bilden.

¹ *Systemgrenze, Bilanzgrenze, Bilanzkreis* haben begrifflich identische Bedeutung.

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

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 *Wirksamgrad* η , die ganz allgemein das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand:

$$\eta = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} \quad (1)$$

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, s.u.) 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.

1. Systemgrenzen

1.1. Kennzeichen von Systemgrenzen

Als Erstes wird die in der Verfahrenstechnik übliche Aufteilung einer Anlage in Bausteine und Untersysteme (z.B. thermisches Hauptverfahren, Abgasreinigung etc.) vorgenommen und die jeweiligen System- bzw. Bilanzgrenzen definiert (Bild 1). Die zugehörigen Massen-, Energie- und Stoffbilanzen (z.B. Kohlenstoffbilanz für CO_2 -Emissionen) erfolgen an der jeweils betrachteten Bilanzgrenze immer gemeinsam, um eindeutige Zuordnungen zu erhalten (siehe Abschnitt 3.4., Bild 13).

Systeme können je nach Fragestellung und Behandlung

- ein Anlagenteil (Wäscher (Bild 4), Wärmeübertrager, Kessel usw.),
- eine Anlagengruppe (vgl. Bild 1 Thermisches Hauptverfahren bestehend aus den Bilanzkreis um Feuerung, Bunker und LUVVO; Abgasreinigung bestehend aus den Bilanzkreis um Nasselektrofilter, Wäscher, Entstickung, Gewebefilter, Saugzügen und Reststoffbehandlung usw.),
- eine ganze Anlage (vgl. Bild 1 Gesamtanlage bestehend aus Thermisches Hauptverfahren, Abgasreinigung und Energieumwandlung),
- eine Anlagenkette,
- usw.

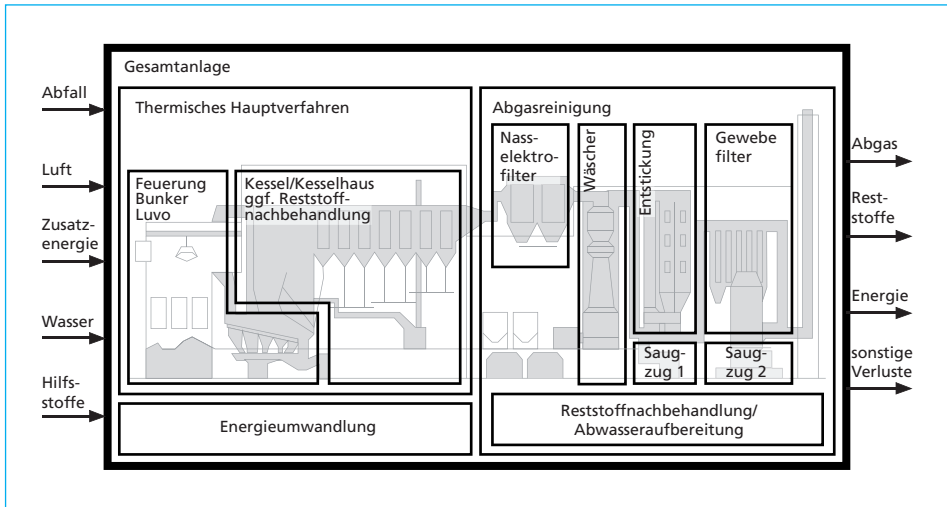


Bild 1: Übergeordnete Bilanzkreise für die Bilanzierung einer Abfallverbrennungsanlage

oder eine entsprechende Aufteilung wie zuvor analog

- ein Verfahrensteil,
- eine Verfahrensgruppe,
- ein ganzes Verfahren,
- eine Verfahrenskette,
- usw.

sein.

1.2. Anwendung von Systemgrenzen

1.2.1. Systemgrenzen als Voraussetzung für die Bilanzierung

Die Systemgrenzen legen den Gegenstand der Betrachtung für die Bilanzierung fest. In der Regel werden stationäre Verhältnisse betrachtet, so dass zunächst ganz formal auf der Basis der Erhaltungssätze die so genannten Bilanzen aufgestellt werden können:

- Summe aller eintretenden Massenströme = Summe aller austretenden Massenströme,
- Summe aller eintretenden Energieströme = Summe aller austretenden Energieströme.

1.2.2. Systemgrenzen als Voraussetzung zu Plausibilitätsfragen

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

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

1.2.3. Systemgrenzen als Voraussetzung zur Bildung von Kenngrößen und Kennzahlen

Erst nach Kompatibilitäts- und Plausibilitätsüberlegungen werden mit Hilfe der nun vorliegenden Massen-, Energie- und Stoffbilanzen Bewertungen durchgeführt, d.h. z.B. Anlagenwirkungsgrade und zugehörig auf die jeweilige Bilanzgrenze energiebezogene Emissionen (z.B. CO₂-Emissionen) usw. gebildet. Wichtig ist, dass Kenngrößen und Kennzahlen immer mit Werten jeweils an ein und derselben Systemgrenze gebildet werden.

1.2.4. Systemgrenzen zur Darstellung zeitlicher Abhängigkeiten

Die jeweiligen Bilder mit den verschiedenen Strömen und zugehörigen Größenangaben sind häufig zeitlich gemittelte Situationen oder auch *Momentaufnahmen*, da die zugeführten und abgeführten Ströme teilweise sehr stark schwanken. Zeichnet man interessierende Ströme zeitlich auf, so kann man aus einer entsprechenden Integration über die Zeit die Stunden-, Tages-, Monats-, Jahresmittel bilden und wenn nötig noch wesentlich längere Zeiten (z.B. bei Deponien) in Betracht ziehen.

1.3. Weitere Beispiele zu Systemgrenzen

1.3.1. Systemgrenzen zur Beschreibung des Verbraucherverhaltens (Abnehmerverhaltens)

Abfallbehandlungsanlagen unterliegen einer Entsorgungspflicht. So müssen z.B. Abfallheizkraftwerke Energie umsetzen (durch Verbrennung) auch wenn die von Verbrauchern benötigte Energie kleiner als das angebotene Nutzpotenzial der Anlage ist. Dann ist das Verbraucherverhalten durch eine zusätzliche geeignete Systemgrenze zu charakterisieren. Die Bezeichnungen für die Systemgrenzen können dabei willkürlich gewählt werden (im folgenden Beispiel z.B. R, S und T) und sind je nach Anlage neu zu definieren.

1.3.2. 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 (Primärenergie) bilanziert werden (Bild 2). Erst danach sind z.B. die Bildung von Primärwirkungsgraden und die Ermittlung zugehöriger CO₂-Emissionen möglich.

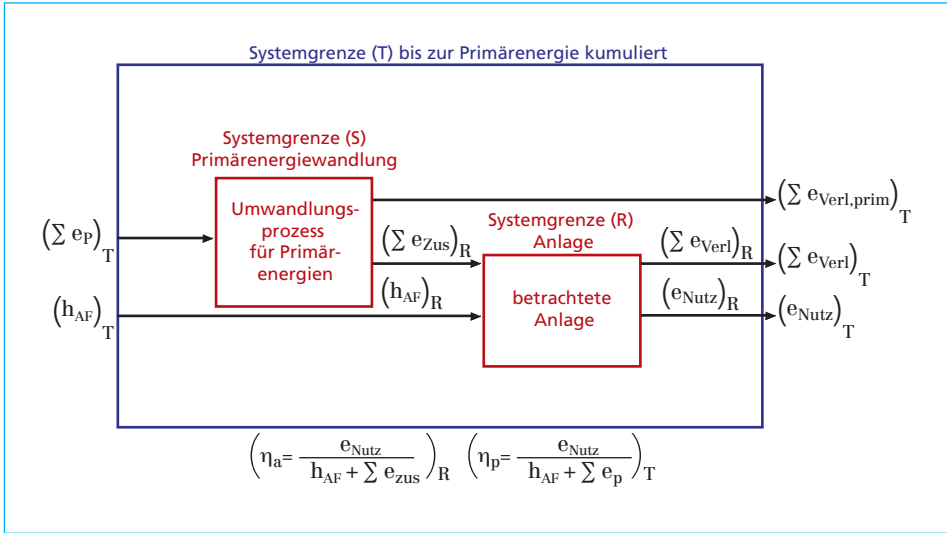


Bild 2: Erweiterung der Systemgrenze R der Anlage zur Einbeziehung der Umwandlungsprozesse der Primärenergien (Systemgrenze S) zur Systemgrenze T

1.3.3. 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 Rückführung dieser Aufwendungen aus dem Nutzen vorgenommen (Bild 3). Aus der sich nunmehr

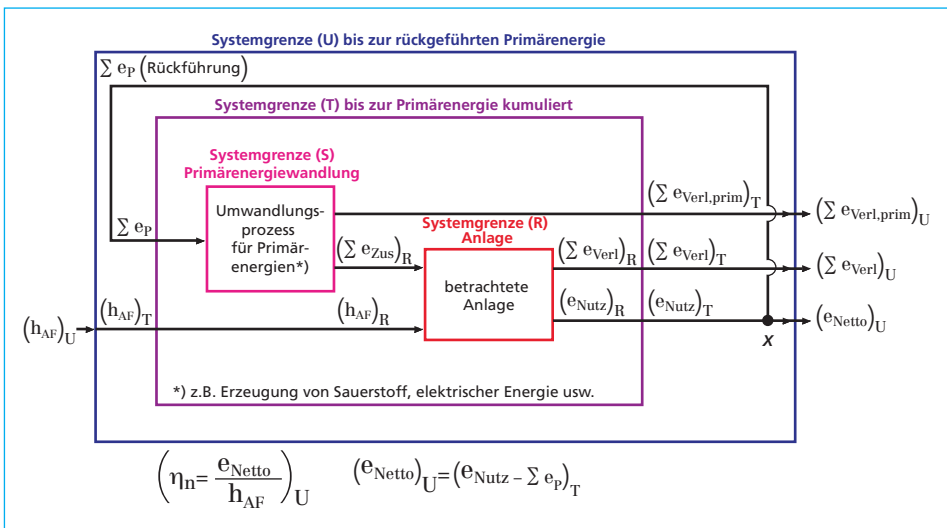


Bild 3: Erweiterung der Systemgrenze T zur Darstellung der Rückführung der aufzuwendenden Primärenergien zur Systemgrenze U

ergebenden erweiterten Bilanz (neuer Bilanzkreis) erhält man den Nettoeffekt 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.

1.3.4. 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, 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.

Ein Brennstoff aus Abfall, 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 den Abfall z.B. direkt in einer Abfallverbrennungsanlage einsetzt, ist schließlich nicht als Ersatzbrennstoff zu bezeichnen, da dann Primärenergie nicht eingespart, sondern zusätzlich aufgewendet werden muss.

Will man verschiedene thermische Verfahren miteinander vergleichen, so müssen zunächst gleiche Zielvorgaben festgelegt werden. Danach müssen so viele Teilschritte bzw. verfahrenstechnische Bausteine durch entsprechende Systemgrenzen untereinander gekoppelt, d.h. abgegrenzt 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, wie 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, wie
 - * Eluierbarkeit und Glühverlust der Reststoffe,
 - * vorgegebene Schadstoffkonzentrationen der Abgase

und

- die einzelnen austretenden Stoffströme jeweils direkt in die Umwelt entlassen bzw. 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 bzw. dessen Systemgrenze einzubeziehen.

Zur Beurteilung von Verfahren, die verschiedene Verfahrensarten (wie thermisch, mechanisch, biologisch) miteinander koppeln, bilanziert man zunächst wie beschrieben, die einzelnen mechanischen, biologischen, thermischen und ggf. weitere Bausteine und schaltet sie mit ihren Systemgrenzen entsprechend dem technischen Aufbau in Reihe (oder parallel) und erhält auf diese Weise Verfahrensketten. 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.

1.3.5. Systemgrenzen zur 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 zugeführte Ströme, Quellen (freisetzende Vorgänge in einer Anlage) hingegen als abgeführte Ströme an dem System angetragen und zur weiteren besseren Kennzeichnung zusätzlich mit einem auf Quelle oder Senke hinweisenden Index versehen.

2. Massen-, Stoff- und Energiebilanzen

2.1. Allgemeine Grundlagen

Für ein mit der Systemgrenze nach Abschnitt 1 vorgegebenes System werden für die ein- und austretenden Massen-, Stoff- und Energieströme auf der Basis der Erhaltungssätze Bilanzen erstellt. Die jeweiligen Ströme können dabei

- aus Vorgabewerten in Verbindung mit verfahrenstechnischen Berechnungsmethoden oder
- aus Betriebsmessungen in Verbindung mit verfahrenstechnischen Berechnungsmethoden

ermittelt werden. Die Erstellung von Bilanzen auf der Basis von vollständigen Betriebsmessungen ist theoretisch möglich, aufgrund des dafür erforderlichen Umfangs in der Praxis jedoch weniger von Bedeutung. Im Hinblick auf die Überprüfung der Bilanzen die Betriebsmesswerte enthalten (Plausibilität) müssen daher verfahrenstechnische Berechnungsmethoden zur Auswertung mit hinzugezogen werden.

In jedem Fall sind an der jeweils betrachteten Systemgrenze nach Plausibilitäts- und Kompatibilitätsprüfungen alle ein- und austretenden Ströme anzutragen, zu nummerieren und die zugehörigen Werte für Massen und Energien in sich schlüssig (kompatibel) aufzuschreiben.

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. So ist

- es zunächst sinnvoll, den Nullpunkt für den Energieinhalt einer Masse (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 (*Unterschlagung* der Kondensationsenthalpie) kann, mehr Energie ab-, als zuzuführen, wodurch man falsche, d.h. zu große Wirkungsgrade ermitteln würde;
- bei zugeführten weiteren Stoffen (z.B. Metallen, Betriebshilfsstoffen usw.) ebenfalls auf den Bezugszustand zu achten. Hat man z.B. nennenswerte Mengen an Stahl (Eisen) 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 Nullniveau einzusetzen. Dem Eisen (Fe) ist damit in Analogie zum Brennstoff sein *Heizwert* zuzuordnen.

2.2. Massen-, Stoff- und Energiebilanzen aus Vorgabewerten in Verbindung mit verfahrenstechnischen Berechnungsmethoden

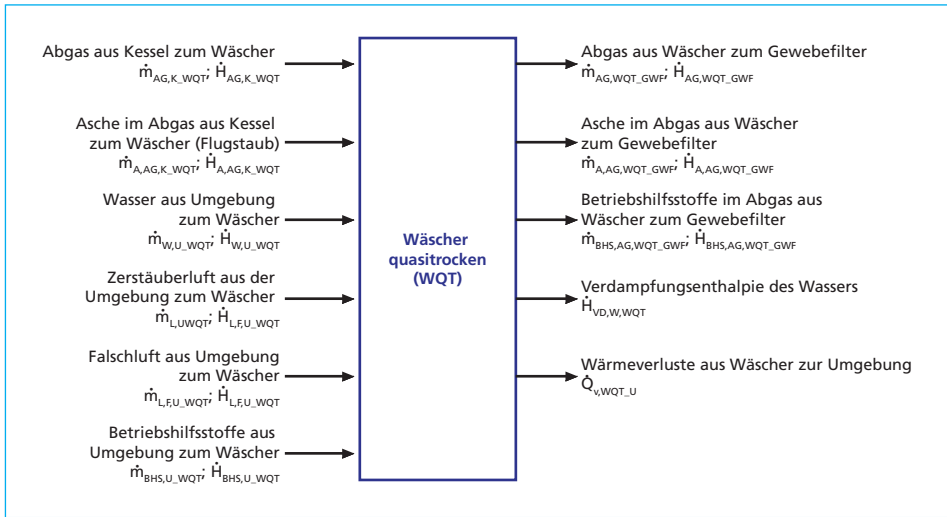
Die Bilanzierung von Apparaten, Anlagen usw. – allgemein von Systemen – auf der Basis von Vorgabewerten in Verbindung mit verfahrenstechnischen Berechnungsmethoden dient i.d.R. der Auslegung der Systeme oder der Überprüfung anhand von Messwerten bei bekannten Randbedingungen. Die verfahrenstechnischen Berechnungsmethoden schließen neben den Erhaltungssätzen auch die Transportgesetze (Wärme-, Stoff- und Impulsaustausch) mit ein. Beispiele hierfür sind die Berechnung von Wärmeübertragern für die Luftvorwärmung, von Verbrennungsprozessen in der Feuerung, Absorptionsprozessen in einem Wäscher usw. Das Bild 4 zeigt als Beispiel einen Wäscher mit der Systemgrenze und der wesentlichen ein- und austretenden Massen- und Energieströme. Die Massenbilanz für den Wäscher lautet (Bild 4)

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{AG,K_WQT}} + \dot{m}_{\text{A,AG,K_WQT}} + \dot{m}_{\text{W,U_WQT}} + \dot{m}_{\text{L,U_WQT}} + \dot{m}_{\text{L,E,U_WQT}} + \dot{m}_{\text{BHS,U_WQT}} \\ = \dot{m}_{\text{AG,WQT_GWF}} + \dot{m}_{\text{A,AG,WQT_GWF}} + \dot{m}_{\text{BHS,AG,WQT_GWF}} \end{aligned} \quad (2)$$

Die Energiebilanz ergibt sich unter Berücksichtigung des für die Verdampfung des Zerstäuberwassers aufzubringenden Verdampfungsenthalpiestroms und der Verluste entsprechend mit

$$\begin{aligned} \dot{H}_{\text{AG,K_WQT}} + \dot{H}_{\text{A,AG,K_WQT}} + \dot{H}_{\text{W,U_WQT}} + \dot{H}_{\text{L,U_WQT}} + \dot{H}_{\text{L,E,U_WQT}} + \dot{H}_{\text{BHS,U_WQT}} \\ = \dot{H}_{\text{AG,WQT_GWF}} + \dot{H}_{\text{A,AG,WQT_GWF}} + \dot{H}_{\text{BHS,AG,WQT_GWF}} + \dot{H}_{\text{VD,W,WQT}} + \dot{Q}_{\text{v,WQT_U}} \end{aligned} \quad (3)$$

Zur Berechnung der Bilanzen aus den Vorgabewerten werden wie erwähnt gesonderte Berechnungsansätze zur Beschreibung der Stoff- und Wärmeübertragung einschließlich chemischer Reaktionen benötigt.

Bild 4: Beispiel Wäscher, ein- und austretende Massen-, und Energieströme³

2.3. Massen-, Stoff- und Energiebilanzen aus Betriebsmessungen in Verbindung mit verfahrenstechnischen Berechnungsmethoden

Bei der Erstellung von Bilanzen auf der Basis von Betriebsmessungen besteht oftmals das Problem, dass nicht an allen Systemgrenzen, die sich z.B. aus apparatechnischer Sicht ergeben, Messwerte für eine geschlossene Bilanzierung zur Verfügung stehen. Bild 5 zeigt als Beispiel das so genannte Thermische Hauptverfahren mit den Unterbilanzkreisen Luftvorwärmer, Feuerung und Kessel mit den jeweils verfügbaren Messdaten. Daraus wird ersichtlich, dass in einem solchen Fall ein entsprechend angepasster Berechnungsalgorithmus für die Bilanzierung zu entwickeln ist.

Im vorliegenden Beispiel lässt sich der tatsächliche Massenstrom Abfall, der der Feuerung zugeführt wird, nicht ohne weiteres ermitteln. Ursache hierfür ist der zunächst unbekannte Falschluffeintritt in Feuerung und Kessel. Da die Verteilung der insgesamt in Feuerung und Kessel eintretenden Falschluff auf Grundlage einer Massen- und Stoffbilanz allein nicht ermittelt werden kann, werden Feuerung und Kessel im ersten Schritt zusammengefasst berechnet (Bild 6). Im vorliegenden Beispiel wird für die Berechnung der Massen- und Stoffbilanz um Feuerung und Kessel deshalb folgender Berechnungsablauf gewählt ([14, 2, 3, 15]):

1. Berechnung des Massenstromes und der Zusammensetzung Luft zu Feuerung und Kessel,
2. Berechnung des Massenstromes und der Zusammensetzung des Abfalls (*reagierender Anteil*),

³ Das vom Abgas auf dem Weg durch den Wäscher aufgenommene Wasser, in Form von Wasserdampf, muss in der Energiebilanz über die Verdampfungsenthalpie ($\dot{H}_{VD,W,WQT}$) berücksichtigt werden. Die Masse des verdampften Wassers wird in der Masse des Abgases berücksichtigt. Nicht an Masse gebunden sind die Wärmeverluste aus dem Wäscher zur Umgebung $\dot{Q}_{v,WQT,U}$; diese werden nur in der Energiebilanz berücksichtigt.

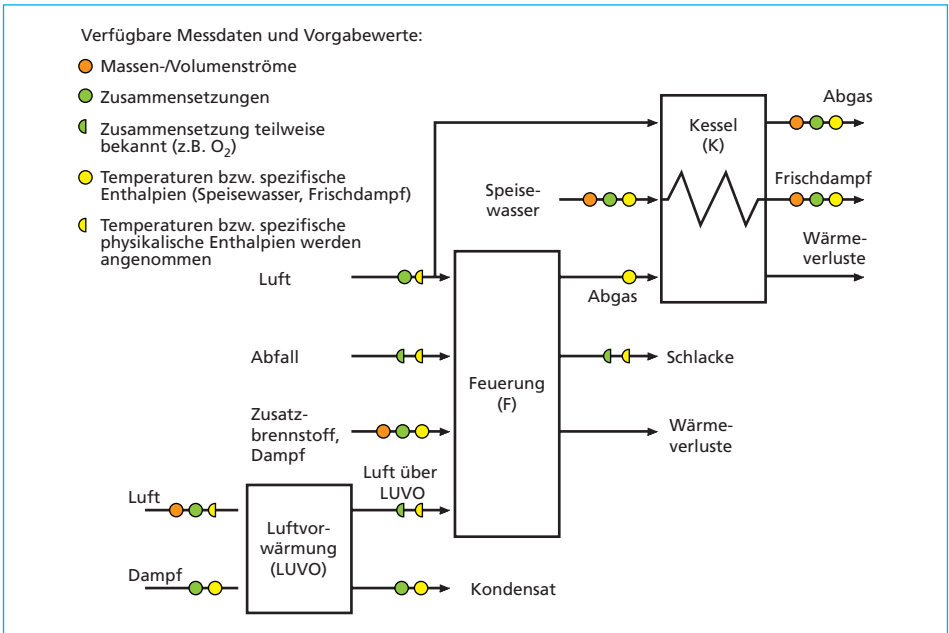


Bild 5: In der Abfallverbrennungsanlage Schwandorf verfügbare Messdaten und Vorgabewerte (hinreichend genaue Annahmen) für die Berechnung von Feuerung und Kessel, Darstellung der wesentlichen Massen- und Energieströme

Quelle: Horeni, M.: Möglichkeiten für die energetische Optimierung von Müllverbrennungsanlagen – Entwicklung, Erprobung und Validierung eines Online-Bilanzierungsprogramms. Papierfliegerverlag Clausthal-Zellerfeld; Dissertation 2007

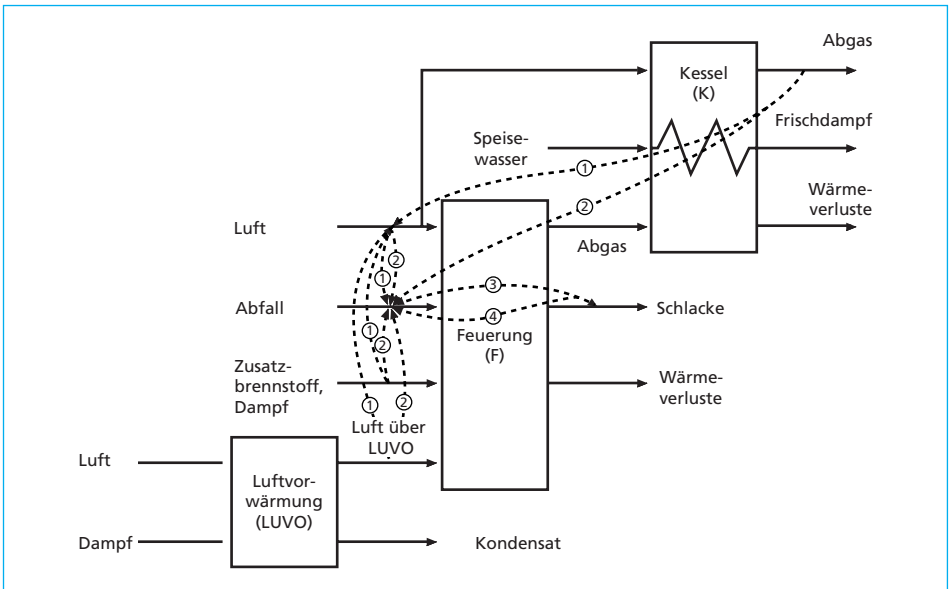


Bild 6: Beispiel für den Berechnungsablauf für die Massen- und Stoffbilanz um Feuerung und Kessel – Schritt 1 bis 4 (Darstellung der wesentlichen Massen- und Energieströme)

3. Berechnung des Massenstromes und der Zusammensetzung der Asche (*nicht reagierender Anteil* des Abfalls) und deren Verteilung auf Schlacke, Flugstaub und Kesselasche und
4. Berechnung des Massenstromes und der Zusammensetzung des gesamten Abfalls.

2.4. Beispiele für die Verwendung von Massen- und Energiebilanzen für die Ermittlung von Heizwerten

2.4.1. Heizwertberechnung aus der Brennstoffzusammensetzung

Bei der Bilanzierung von Verbrennungsanlagen stellt der Heizwert der eingesetzten Brennstoffe eine wesentliche Voraussetzung dar. Im Schrifttum sind verschiedene so genannte Heizwertformeln bekannt. Dabei wird der Zusammenhang zwischen der Brennstoffzusammensetzung und dem Heizwert entweder

- über die Heizwerte der einzelnen Brennstoffbestandteile oder aber
- durch Koeffizienten, mit denen der betreffende Brennstoffanteil am Gesamtheizwert beteiligt ist,

gebildet. Ein exakter Zusammenhang zwischen der Brennstoffzusammensetzung und dem Heizwert lässt sich jedoch nur für Brenngase herstellen. Bei der als Verbandsformel oder als *Dulong'sche Formel* [10] bekannten Heizwertformel für feste Brennstoffe wird der Gesamtheizwert aus den jeweiligen Brennstoffanteilen (Massenanteile) und zugehörigen Einzelheizwerten ermittelt, dabei bleibt die Brennstoffstruktur (insbesondere unterschiedliche Bindungswärmen) unberücksichtigt. Die Genauigkeit dieser Berechnung ist daher für die Praxis oftmals unzureichend. Entsprechend ist eine Reihe von Abwandlungen, die sich vom äußeren Aufbau von der Verbandsformel kaum unterscheiden, entstanden:

$$h_u = k_1 \cdot c + k_2 \cdot h - k_3 \cdot o + k_4 \cdot s + k_5 \cdot n - k_6 \cdot w \quad (4)$$

Dabei sind c , h , o , n , s die Massenanteile von Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff und Schwefel, die zusammen mit dem Wassergehalt w und dem Aschegehalt a die erweiterte Elementaranalyse des Brennstoffes darstellen:

$$c + h + o + s + n + w + a = 1^4 \quad (5)$$

Die Koeffizienten k_1 bis k_5 in Gleichung (4) stellen im Unterschied zu der Verbandsformel [10] keine Einzelheizwerte dar, sondern berücksichtigen, mit welchem Anteil der jeweilige Brennstoffanteil am Gesamtheizwert beteiligt ist. Der Koeffizient k_6 entspricht der Kondensationsenthalpie des Wasseranteils w . Zur Ableitung der Faktoren sei an dieser Stelle auf [10] verwiesen. Die Genauigkeit der *Heizwertformeln* ist insbesondere dann sehr gut, wenn bei der Ermittlung der Koeffizienten auf ganz bestimmte Brennstoffe (z.B. Braunkohle, Steinkohle) aus einer Lagerstätte Bezug genommen wird. Abfälle sind hingegen häufig heterogen zusammengesetzt und weisen in der Brennstoffstruktur i.d.R. große Schwankungen auf.

⁴ Der Massenanteil des Sauerstoffs im Brennstoff wird dabei nicht analysiert, sondern über die Differenz bestimmt.

Zusammenhänge zwischen c/h - und c/o -Verhältnis, dem Gehalt an flüchtigen Bestandteilen und dem Heizwert [5] zeigen, dass es auch für Ersatzbrennstoffe möglich ist Heizwertformeln basierend auf der Brennstoffzusammensetzung ableiten zu können (Bild 7).

Vernachlässigt man zunächst den Einfluss von Schwefel und Stickstoff im Brennstoff, so ergibt sich in Anlehnung an Gleichung (4) ($k_4 = k_5 = 0$):

$$h_u = k_1 \cdot c + k_2 \cdot h - k_3 \cdot o - k_6 \cdot w \quad (6)$$

Gleichung (6) enthält mit k_1, k_2, k_3 drei Unbekannte. Mit einem festen c/h -Verhältnis (s.o.) – hier vereinfacht:

$$c / h = 7 \quad (7)$$

und Gleichung (5) stehen insgesamt drei Gleichungen zur Verfügung, so dass k_1, k_2, k_3 ermittelt werden können und sich die folgende Heizwertformel ergibt:

$$h_u = 45,09 \cdot c - 4,99 \cdot o - 2,44 \cdot w \quad (8)$$

Eine Gegenüberstellung der entsprechend Gleichung (8) berechneten Heizwerte mit den experimentell ermittelten Heizwerten ist in Bild 7 enthalten.

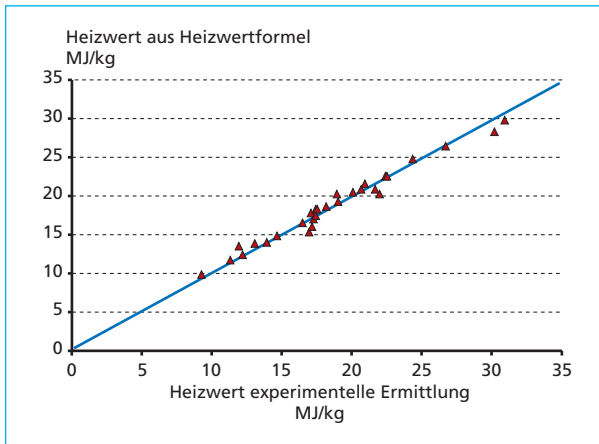


Bild 7:

Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Heizwerte mit den über die Heizwertformel berechneten Heizwerten

2.4.2. Ermittlung von Heizwerten aus Anlagendaten

In Bild 8 sind die Bilanzkreise Feuerung und Kessel sowie die für die Bilanzierung wesentlichen Massen- und Energieströme schematisch dargestellt.

Lässt man in einem ersten Schritt (Bild 8) zur Vereinfachung Quellen und Senken unberücksichtigt (stationärer Zustand), gilt: Summe Eintritt (Masse, Energie) ist gleich Summe Austritt (Masse, Energie). **Gesamtenergiebilanz für den stationären Fall**

$$\dot{H}_{\text{Eintritt}} = \dot{H}_{\text{Austritt}} \quad (9)$$

Im hier dargestellten Fall (Bild 8) gilt für die Summe der Energieströme am Eintritt: **Gesamtenergiebilanz, Eintritt**

$$\dot{H}_{\text{Eintritt}} = \dot{m}_{\text{SW}} \cdot h_{\text{SW}} + \dot{m}_{\text{AF}} \cdot [h_{\text{u,AF}} + c_{\text{p,AF}} \cdot (\vartheta_{\text{AF}} - \vartheta_0)] + \dot{m}_{\text{L,AF}} \cdot c_{\text{p,L,AF}} \cdot (\vartheta_{\text{L,AF}} - \vartheta_0) + \dot{m}_{\text{ZBS}} \cdot [h_{\text{u,ZBS}} + c_{\text{p,ZBS}} \cdot (\vartheta_{\text{ZBS}} - \vartheta_0)] + \dot{m}_{\text{L,ZBS}} \cdot c_{\text{p,L,ZBS}} \cdot (\vartheta_{\text{L,ZBS}} - \vartheta_0) \quad (10)$$

und für den Austritt: **Gesamtenergiebilanz, Austritt**

$$\dot{H}_{\text{Austritt}} = \dot{m}_D \cdot h_D + \dot{m}_{\text{SW,A}} \cdot h_{\text{SW,A}} + \dot{m}_{\text{AG,K}} \cdot [h_{\text{u,AG,K}} + c_{p,\text{AG,K}} \cdot (\vartheta_{\text{AG,K}} - \vartheta_0)] + \dot{m}_{\text{A}'} \cdot [h_{\text{u,A}'} + c_{p,\text{A}'} \cdot (\vartheta_{\text{A}'} - \vartheta_0)] + \dot{Q}_{\text{V,F+K}} \quad (11)$$

Aus den Gleichungen (9) bis (11) erhält man für den Heizwert $h_{\text{u,AF}}$

$$h_{\text{u,AF}} =$$

$$\frac{\dot{m}_D \cdot h_D + \dot{m}_{\text{SW,A}} \cdot h_{\text{SW,A}} - \dot{m}_{\text{SW}} \cdot h_{\text{SW}}}{\dot{m}_{\text{AF}}} + \frac{\dot{m}_{\text{AG,K}}}{\dot{m}_{\text{AF}}} \cdot [h_{\text{u,AG,K}} + c_{p,\text{AG,K}} \cdot (\vartheta_{\text{AG,K}} - \vartheta_0)] + \frac{\dot{m}_{\text{A}'}}{\dot{m}_{\text{AF}}} \cdot [h_{\text{u,A}'} + c_{p,\text{A}'} \cdot (\vartheta_{\text{A}'} - \vartheta_0)] - \frac{\dot{m}_{\text{L,AF}}}{\dot{m}_{\text{AF}}} \cdot c_{p,\text{L,AF}} \cdot (\vartheta_{\text{L,AF}} - \vartheta_0) - c_{p,\text{AF}} \cdot (\vartheta_{\text{AF}} - \vartheta_0) - \frac{\dot{m}_{\text{ZBS}}}{\dot{m}_{\text{AF}}} \cdot [h_{\text{u,ZBS}} + c_{p,\text{ZBS}} \cdot (\vartheta_{\text{ZBS}} - \vartheta_0)] - \frac{\dot{m}_{\text{L,ZBS}}}{\dot{m}_{\text{AF}}} \cdot c_{p,\text{L,ZBS}} \cdot (\vartheta_{\text{L,ZBS}} - \vartheta_0) + \frac{\dot{Q}_{\text{V,F+K}}}{\dot{m}_{\text{AF}}} \quad (12)$$

Unbekannt in dieser Gleichung sind neben dem Heizwert $h_{\text{u,AF}}$ der Verlustwärmestrom (Feuerung und Kessel) $\dot{Q}_{\text{V,F+K}}$. Der Verlustwärmestrom lässt sich jedoch auf eine einfache Weise z.B. im Anfahrbetrieb einer Anlage ermitteln. Dabei wird kein Abfall ($\dot{m}_{\text{AF}} \cdot h_{\text{u,AF}} = 0$), sondern ausschließlich Zusatzbrennstoff ($\dot{m}_{\text{ZBS}} \cdot h_{\text{u,ZBS}}$) mit bekanntem Massenstrom, bekannter Zusammensetzung und bekanntem Heizwert verbrannt. Durch eine Rückwärtsrechnung (siehe Kompatibilitätsbetrachtung) ergibt sich aus den Messwerten und aus Gleichung (10) und (11) der gesuchte Verlustwärmestrom.

Wie erwähnt kann der Abfallmassenstrom m_{AF} für längere Bilanzzeiträume relativ zuverlässig aus den Messungen am Eingang und der Kranwaage ermittelt werden. Für eine ganz

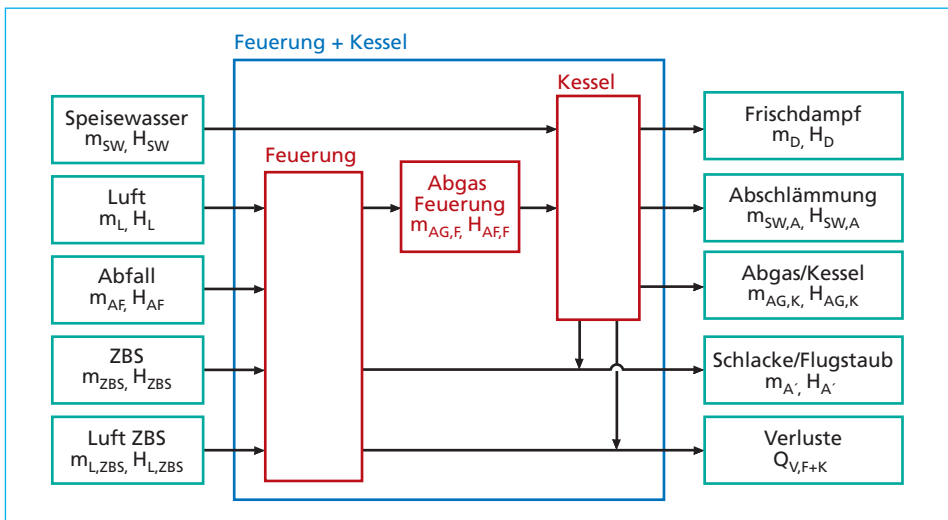


Bild 8: Schematische Darstellung der Bilanzierung von Feuerung und Kessel, ohne Berücksichtigung Sekundärdampf, Verluste Feuerung und Kessel einschließlich Rostkühlung (wassergekühlter Rost)

bestimmte Anlage sind bei bestimmungsgemäßem Betrieb eine Reihe von Randbedingungen, wie z.B. Dampfparameter, Abschlammwasser, Luftzahl und Verlustwärmestrom näherungsweise konstant. Für die Ermittlung eines durchschnittlichen Abfallheizwertes über einen längeren Bilanzierungszeitraum (z.B. Tagesmittelwert) für eine bestimmte Anlage lässt sich die Gleichung (12) weiter zusammenfassen und man erhält eine einfache Beziehung, in die als variable Parameter der Abfallmassenstrom, der Dampfmassenstrom, die Dampfenenthalpie, die Abgastemperatur am Kesselaustritt und die Luftvorwärmtemperatur eingehen⁵:

$$h_{u,AF} = k_7 \cdot \frac{\dot{m}_{D,AF}}{\dot{m}_{AF}} \cdot h_D + k_8 \cdot \vartheta_{AG,K} - k_9 \cdot \vartheta_{L,AF} + k_{10} \quad (13)$$

Bei kürzeren Zeiträumen ergeben sich jedoch i.d.R. Unsicherheiten aufgrund der Mittelwertbildung über mehrere Stunden bei der Bestimmung des Abfallmassenstromes durch die Kranwaage. Mit den in Abfallverbrennungsanlagen messtechnisch erfassten Daten kann jedoch auch für einen aktuellen Momentanzustand über eine Bilanzierung, die Rückwärtsrechnungen einschließt, der aktuell auf dem Rost verbrennende Abfallmassenstrom und der zugehörige Heizwert ermittelt werden (Bild 9). Aufgrund des Umfangs der benötigten Daten ist hierbei eine Datenübertragung vom Datenerfassungssystem der Anlage zu dem Berechnungsprogramm zweckmäßig. Auf diese Weise gelangt man zu der so genannten Online-Bilanzierung [2, 3, 14].

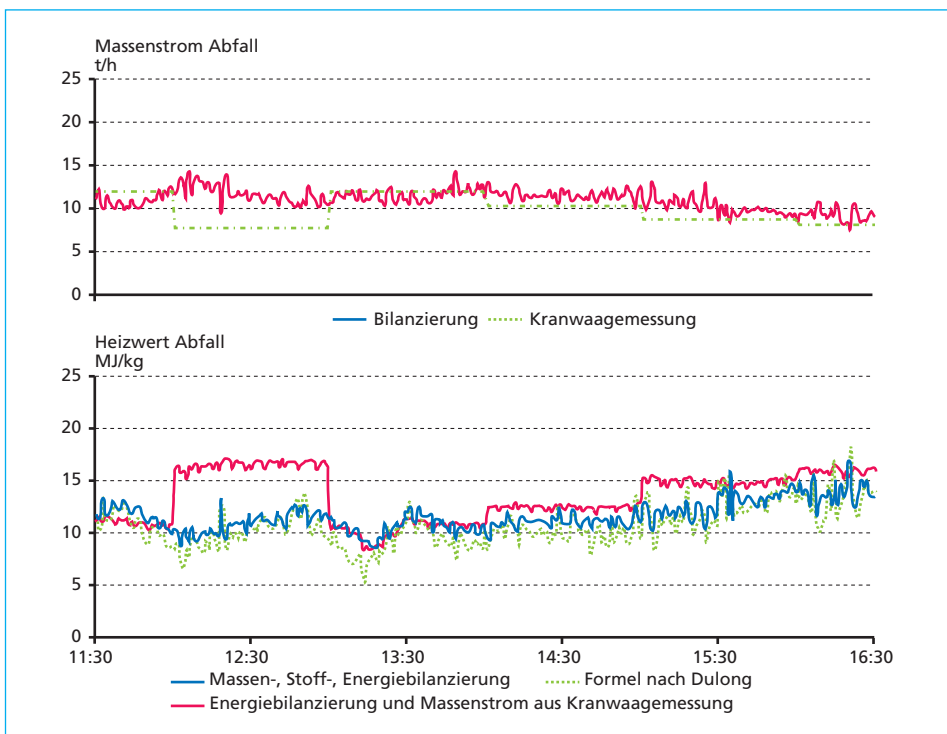


Bild 9: Vergleich verschieden ermittelter Heizwerte und Massenströme

⁵ Vereinfacht ohne Berücksichtigung von Zusatzbrennstoff

Die Herleitung der Gleichung (13) zeigt, dass es sich um eine anlagenspezifische Berechnungsgleichung für den Heizwert handelt. Solche Berechnungsgleichungen können bei der Verwendung für andere Anlagen zu Fehlern führen, weshalb man eine Verallgemeinerung strikt ablehnen muss.

Das sei an einem Beispiel einer im Schrifttum zur Ermittlung von Heizwerten von Abfällen erwähnten so genannten Heizwert-Regressionsformel diskutiert [23, 24]:

$$h_{u,AF} = 1,133 \cdot \frac{\dot{m}_{D,AF}}{\dot{m}_{AF}} \cdot \Delta h_D + 0,008 \cdot \vartheta_{AG,K} - 0,801 \left[\frac{MJ}{kg} \right] \quad (14)$$

In diese Berechnungsgleichung fließen keine Brennstoff- sondern Anlagenparameter ein, weshalb es sich um eine Heizwertberechnung aus Anlagendaten (ähnlich Gleichung (13)) handelt, die bei Anwendung auf andere Anlagen zu mehr oder weniger großen Abweichungen vom tatsächlichen Heizwert führt [5].

Im vorliegenden Fall macht sich das insbesondere bei Veränderung der Luftzahl, Luftvorwärmung und Sauerstoffanreicherung bemerkbar. Durch eine Bilanzierung (Massen- und Energiebilanz) mit vorgegebenen Heizwerten lassen sich diese Abweichungen für verschiedene Parametervariationen quantifizieren. Im Folgenden sind die Ergebnisse aus sechs verschiedenen Parametervariationen dem Basisfall gegenübergestellt:

Parameter – Basisfall I

- Abfall mit mittlerem Heizwert ($h_{u,AF} = 10,1 \text{ MJ/kg}$)
- Luftzahl $\lambda_{AF} = 1,8$
- Temperatur Verbrennungsluft $\vartheta_{L,AF} = 20 \text{ °C}$
- Sauerstoffkonzentration Verbrennungsluft $\psi_{O_2,L,AF} = 0,21 \text{ m}^3_{O_2}/\text{m}^3_L$

Parametervariation – Fall II bis VII

- II: I jedoch $\vartheta_{L,AF} = 300 \text{ °C}$
- III: I jedoch Luftzahl $\lambda_{AF} = 2,5$
- IV: I jedoch $\vartheta_{L,AF} = 300 \text{ °C}$ und Luftzahl $\lambda_{AF} = 2,5$
- V: I jedoch $\psi_{O_2,L,AF} = 0,30$
- VI: I jedoch $\vartheta_{L,AF} = 300 \text{ °C}$, $\lambda_{AF} = 2,5$ und $\psi_{O_2,L,AF} = 0,18$
- VII: $\vartheta_{L,AF} = 300 \text{ °C}$, $\lambda_{AF} = 2,5$ und $\psi_{O_2,L,AF} = 0,18$ und heizwertreicher Abfall
* ($h_{u,AF} = 21,0 \text{ MJ/kg}$)

Für alle Fälle sind die folgenden Parameter identisch:

- kein Zusatzbrennstoff
- Temperatur Abfall $\vartheta_{AF} = 20 \text{ °C}$
- Temperatur Abgas nach Kessel $\vartheta_{AG,K} = 220 \text{ °C}$
- Glühverlust Schlacke $\xi_{C,A} = 2 \text{ Ma.-%}$
- Temperatur Schlacke $\vartheta_{A,K} = 400 \text{ °C}$
- Abstrahlungsverluste in Feuerung und Kessel 5 %
- Dampfparameter 72 bar/400 °C (bei Speisewasser 72 bar/140 °C)

Die Ergebnisse dieser Parametervariation sind in Bild 10 dargestellt.

Es sei an dieser Stelle nicht weiter auf die Abweichungen im Einzelnen eingegangen, die Ergebnisse sprechen für sich und zeigen, dass bei Anwendung der Regressions-Heizwertformel zunächst durch eine Bilanzierung zu prüfen ist, ob sich diese für die vorliegende Anlage eignet oder ggf. zu korrigieren ist – ebenso wie dies bei den Heizwertformeln (s.o.) ggf. bei sich ändernden Brennstoffen erforderlich ist. Darüber hinaus müssen für die jeweilige Regressions-Heizwertformel die Kriterien für deren Gültigkeit (Anlagenparameter) angegeben werden, ähnlich wie dies bei den Heizwertformeln für die jeweiligen Brennstoffe notwendig ist.

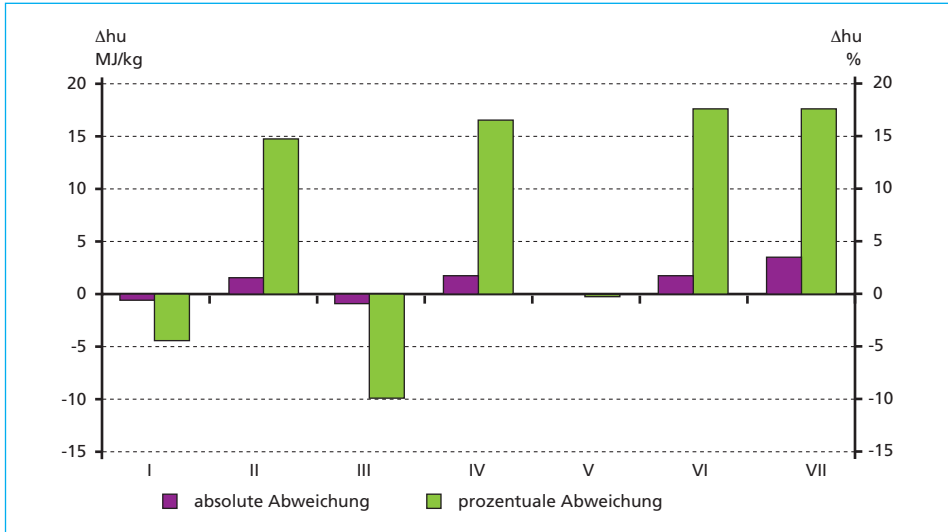


Bild 10: Ergebnisse der Parametervariation – Überprüfung Regressions-Heizwertformel

3. Kennwerte

3.1. Was sind Kennwerte

Kennwerte lassen sich aus den bilanzierten Werten an einer ganz bestimmten Systemgrenze ableiten. Unterschieden werden dabei grundsätzlich

- Kennzahlen und
- Kenngrößen.

Kennzahlen sind wirkliche Zahlen, d.h. Werte ohne Einheit, wie z.B. die bereits zuvor genannten Wirkungsgrade. Als Kennzahlen können auch Verhältnisse aus Nutz- und Aufwand-Energie im Hinblick auf die Erfüllung von politisch-juristischen Vorgaben (wie z.B. die R1-Formel siehe 4.1) angewendet werden.

Kenngrößen sind dagegen Zahlen mit Einheit. So sind z.B.:

- CO₂-Mengenangaben bezogen auf Energien (Einheit z.B. kg CO₂/kWh) oder
- Emissionsfrachten (Einheit z.B. ppm NO_x/t Abfall)
- Werte für den spezifischen Energiebedarf bei der Stoffbehandlung (Einheit z.B. kJ/kg Produkt, vgl. Abschnitt 3.2), sowie

- Äquivalenzwerte (siehe Abschnitt 3.3),

typische Kenngrößen. Aber auch andere bezogene Größen bei denen die Angabe der Einheiten für das Verständnis zweckmäßig ist, 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.

können den Kenngrößen zugeordnet werden.

3.2. Zur Bildung von Kennwerten

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 gestatten, unterschiedliche Anlagen z.B. energetisch, wirtschaftlich oder ökologisch 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 bereits enthalten ist.

Wird für einen Prozess Energie benötigt, so hat man zu unterscheiden, ob man

- den Fall *Energieeinsatz zur reinen Energiewandlung* (Kraftwerke (Abfallkraftwerk), Verkehr, Heizungen) oder
- den Fall *Energieeinsatz zur Stoffbehandlung* (Grundstoffindustrie (wie Stahl, Zement usw.) usw.) jeweils betrachtet.

Im ersten Fall *Energieeinsatz zur reinen Energiewandlung* werden üblicherweise u.a. die bereits genannten Wirkungsgrade (Gleichung (1)) zur energetischen Bewertung gebildet.

Bei Stoffbehandlungsprozessen (auch hier sei vorweg auf das zugehörige Schrifttum verwiesen (z.B. [16])) ist der Aufwand die Summe der zugeführten Energieströme, der Nutzen jedoch kein Energiestrom, sondern der produzierte Stoffstrom (Produktionsstrom), worauf im Folgenden kurz eingegangen wird. In solchen Fällen bildet man zur Beschreibung der Güte des Prozesses die Kenngröße des spezifischen Energiebedarfs e_{prod}

$$e_{\text{prod}} = \frac{\text{Aufwand an Energie}}{\text{Menge des Produktes (Nutzen)}} \quad (15)$$

mit der Einheit kJ/kg Produkt. Je kleiner der Wert ist, umso besser ist die betrachtete Anlage und umso besser sind folglich die Wärmeübertrager⁶ zur internen Energierückgewinnung.

⁶ Diese Wärmeübertrager können selbst wieder als Anlagenteile ausschließlich nach ihrer Wirkung im Hinblick auf die übertragene Energie, d.h. mit einer Energiebilanz und zugehörig mit energetischen Wirkungsgraden anhand geeigneter Untersystemgrenzen beurteilt werden.

Nimmt man zunächst an, dass bei der Stoffbehandlung keine physikalisch und chemisch gebundenen Energieformen auftreten und die Einsatzstoffe sowie der Produktstrom bei Umgebungstemperatur vorliegen, dann dient die aufgewendete Energie nur der Deckung der auftretenden Verluste. Es liegt kein energetischer Nutzen vor. Bei idealer Wärmeübertragung (theoretischer, nicht erreichbarer Grenzfall) ergäbe sich so z.B. trotz sehr hoher Prozesstemperaturen (Brenntemperaturen) kein Energieaufwand ($e_{\text{prod}} = 0$), weil keine Verluste vorliegen (ideale Anlage). Für diesen theoretischen Fall wird auch manchmal der Begriff *Nullwirkungsgrad* gebraucht.

In der Regel treten bei der Stoffbehandlung jedoch chemisch gebundene Energieformen auf, wie z.B. beim *Kalkbrennen* (Temperaturniveau 900 °C). Dann ist der kleinste Wert für den Aufwand die thermodynamisch bedingte Bindungsenthalpie (thermodynamisches Minimum). 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.

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

3.3. Bildung von Äquivalenzwerten zur Ermittlung der Primärenergie

Im Zusammenhang mit der Bewertung unterschiedlicher Energiearten, wie z.B. elektrische Energie und thermische Energie, chemische Energie eines Brennstoffes usw. ergibt sich aus der unterschiedlichen Wertigkeit der Energiearten die Notwendigkeit, Energieaustauschverhältnisse, d.h. Äquivalenzwerte, zu bestimmen [9]. Bei Umrechnungen der unterschiedlichen Energiearten mit Äquivalenzwerten ist jedoch sorgfältig auf den thermodynamischen Hintergrund, insbesondere auf die Erhaltungssätze zu achten. Werden bei der Verwendung von Äquivalenzwerten die Erhaltungssätze verletzt, wie dies in der Abfallrahmenrichtlinie [26] der Fall ist, ist das Ergebnis für eine ingenieurtechnische Bewertung untauglich.

Zur prinzipiellen Verdeutlichung der Verwendung von Äquivalenzwerten sei von einem einfachen idealen thermodynamischen Kreisprozess⁷ ausgegangen. Verluste werden vernachlässigt. Für die beispielhafte Betrachtung werden anstelle der spezifischen Energie, Arbeit usw. absolute Ströme, d.h., Wärmeströme und die elektrische Leistung verwendet.

In einem ersten Fall sei nur die Abgabe von elektrischer Energie als Nutzen (reines Kraftwerk) und im zweiten Fall danach, zusätzlich die Abgabe von Wärme (Kraft-Wärme-Kopplung, KWK) betrachtet.

1. Fall (nur Abgabe elektrischer Energie, reines Kraftwerk)

Der erste Fall, in dem der Nutzen ausschließlich in der Abgabe elektrischer Energie besteht, ist in Bild 11 vereinfacht in einem T,S-Diagramm dargestellt. Für dieses Beispiel ergibt sich der Wirkungsgrad (vgl. auch Verhältnis der Flächen in Bild 11):

⁷ Zur Verdeutlichung des Prinzips wird hier ein einfacher idealer thermodynamischer Kreisprozess gewählt, die Aussagen sind auf jeden anderen thermodynamischen Kreisprozess, so auch auf spezielle Dampfkraftprozesse übertragbar.

$$\eta_K = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{zu}} \quad (16)$$

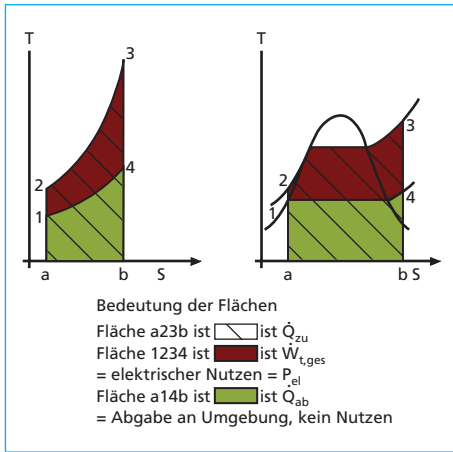


Bild 11:

Idealer thermodynamischer Kreisprozess im T,S-Diagramm, nur elektrische Energie als Nutzen, Erklärung im Text

Eine wichtige Kennzahl in der Praxis ist die Stromausbeute [30] die das Verhältnis von elektrischer Leistung zu dem eingesetzten Brennstoffenergiestrom ausdrückt:

$$\beta = \frac{P_{el}}{\dot{m}_B \cdot h_u} \quad (17)$$

Aus der Fragestellung, welche Primärenergie ($\dot{m}_B \cdot h_u$) einer bestimmten, abgegebenen elektrischen Leistung äquivalent ist,

$$P_{el} \cdot \ddot{a}_{el} = \dot{m}_B \cdot h_u \quad (18)$$

ergibt sich für den Äquivalenzwert:

$$\ddot{a}_{el} = \frac{\dot{m}_B \cdot h_u}{P_{el}} = \frac{1}{\beta} \quad (19)$$

Der im Kreisprozess benötigte thermische Energiestrom \dot{Q}_{zu} wird aus der Umwandlung von Primär- bzw. Brennstoffenergie ($\dot{m}_B \cdot h_u$) bereit gestellt. Die Güte der Umwandlung kann wieder durch einen entsprechenden Wirkungsgrad (Feuerungs-Kessel-Wirkungsgrad η_{F+K})

$$\eta_{F+K} = \frac{\dot{Q}_{zu}}{\dot{m}_B \cdot h_u} \quad (20)$$

ausgedrückt werden. Zwischen dem Brennstoffenergiestrom ($\dot{m}_B \cdot h_u$) und dem thermischen Energiestrom \dot{Q}_{zu} besteht damit analog zu dem voran stehenden Äquivalenzwert \ddot{a}_{el} das Verhältnis:

$$\ddot{a}_{th} = \frac{\dot{m}_B \cdot h_u}{\dot{Q}_{zu}} = \frac{1}{\eta_{F+K}} \quad (21)$$

womit sich für den Wirkungsgrad des Kreisprozesses

$$\eta_K = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{zu}} = \frac{\dot{a}_{th}}{\dot{a}_{el}} \quad (22)$$

und zwischen dem Wirkungsgrad des Kreisprozesses und der Stromausbeute

$$\beta = \frac{P_{el}}{\dot{m}_B \cdot h_u} = \frac{1}{\dot{a}_{el}} = \frac{\eta_K}{\dot{a}_{th}} \quad (23)$$

ergeben.

Damit gilt, wie auch aus Gleichung (19) ersichtlich ist:

$$\beta \cdot \dot{a}_{el} = 1 = 100 \% \quad (24)$$

2. Fall (Abgabe elektrischer und thermischer Energie, KWK-Prozess)

Im Fall 2 wird zusätzlich zu der elektrischen Energie auch thermische Energie als Nutzen abgegeben (KWK-Prozess). In Bild 12 ist zur Veranschaulichung durch die Flächen wieder beispielhaft ein idealer thermodynamischer Kreisprozess im T,S-Diagramm dargestellt. Die Fläche $a_{14b} = \dot{Q}_{ab}$ in Bild 11 (Fall 1) ist nun in Bild 12 kein Verlust mehr sondern Nutzen $\dot{Q}_{ab} = \dot{Q}_{Nutz} = \dot{Q}_{th}$. Für den Fall der Kraft-Wärmekopplung tritt bei der Bewertung zusätzlich zu der Stromausbeute (Gleichung (17)) nun die Wärmeausbeute [30] hinzu:

$$\alpha = \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{\dot{m}_B \cdot h_u} \quad (25)$$

Die Stromkennzahl [30] drückt das Verhältnis zwischen elektrischer und thermischer Energie aus:

$$\sigma = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{Nutz}} = \frac{\beta}{\alpha} \quad (26)$$

Der Brennstoffausnutzungsgrad [30] sagt aus, mit welcher Güte aus dem Brennstoffenergiestrom ein Nutzen erzielt wird:

$$\omega = \frac{P_{el} + \dot{Q}_{Nutz}}{\dot{m}_B \cdot h_u} = \beta + \alpha \quad (27)$$

Für den Kreisprozess gilt für die Wirkungsgrade

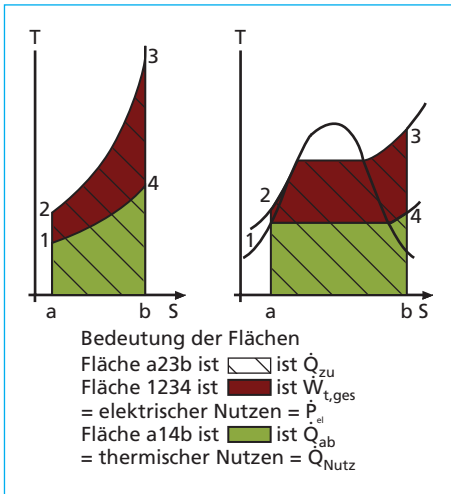
$$\eta_{KWK} = \frac{P_{el} + \dot{Q}_{Nutz}}{\dot{Q}_{zu}} \quad (28)$$

$$\eta_K = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{zu}} \quad (29)$$

$$\eta_{WK} = \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{\dot{Q}_{zu}} \quad (30)$$

und

$$\eta_{KWK} = \eta_K + \eta_{WK} \quad (31)$$



Annahme: \dot{Q}_{ab} (Fläche a14b) sei Nutzen $\dot{Q}_{ab} = \dot{Q}_{Nutz} = \dot{Q}_{th}$; dann werden die Verhältnisse sehr übersichtlich, weil folglich für dieses Beispiel $\eta_{KWK} = 1$ wird.

Bild 12: Idealer thermodynamischer Kreisprozess im T,S-Diagramm, elektrische und thermische Energie als Nutzen, Erklärung im Text

Für diesen Kreisprozess existiert ebenso wie voran stehend ein Wirkungsgrad (Feuerungs-Kessel-Wirkungsgrad η_{F+K}) bei der Umwandlung der Brennstoffenergie ($\dot{m}_B \cdot h_u$) in thermische Energie \dot{Q}_{zu} (Gleichung (20)), und damit auch genau so ein Äquivalenzwert \dot{a}_{th} (Gleichung (21)).

Damit lässt sich für den Wirkungsgrad des Kreisprozesses auch schreiben:

$$\eta_{KWK} = \frac{P_{el} + \dot{Q}_{Nutz}}{\dot{Q}_{zu}} = \frac{P_{el} \cdot \dot{a}_{th}}{\dot{m}_B \cdot h_u} + \frac{\dot{Q}_{Nutz} \cdot \dot{a}_{th}}{\dot{m}_B \cdot h_u} = (\beta + \alpha) \cdot \dot{a}_{th} = \omega \cdot \dot{a}_{th} \quad (32)$$

D.h. es ist die Verbindung zwischen dem Wirkungsgrad des Kreisprozesses und dem Brennstoffausnutzungsgrad gegeben:

$$\eta_{KWK} = \omega \cdot \dot{a}_{th} \quad (33)$$

Die Ausführungen zeigen, dass eine pauschale Anwendung von Äquivalenzwerten nicht möglich ist, sondern jeweils auf einen bestimmten Prozess oder eine bestimmte Anlage bezogen sein muss. Interessant ist es jedoch, die zuvor abgeleiteten Zusammenhänge auf die sogenannte R1-Formel anzuwenden.

In der Abfallrahmenrichtlinie [26] wird zur Beantwortung der Fragestellung, ob bei einer Abfallverbrennungsanlage eine energetische Verwertung vorliegt oder nicht der sog. R1-Faktor (zur Unterscheidung von R1⁸) und D10⁹) (R1 als Fachbegriff) verwendet. Dieser R1-Faktor wird nach der Abfallrahmenrichtlinie aus der Beziehung:

$$R1 = \frac{E_p - (E_f + E_i)}{0,97 \cdot (E_w + E_f)} \quad (34)$$

⁸ R1-Faktor steht in [26] für energetische Verwertungsverfahren (Hauptverwendung als Brennstoff oder andere Mittel der Energieerzeugung).

⁹ D10 steht in [26] für thermische Beseitigung (Verbrennung an Land).

errechnet. Ist bei bestehenden Anlagen¹⁰⁾ $R1 > 0,6$, so wird der Status einer energetischen Verwertung juristisch festgelegt.

In dieser Vorschrift (Gleichung 34) bedeutet:

- E_w : E_w ist der Energiestrom im Abfall ($E_w = \dot{m}_{AF} \cdot h_{u,AF}$),
- 0,97: Mit dem Faktor 0,97 werden Verluste *aufgrund von Rost- und Kesselasche sowie von Strahlung* in Anrechnung gebracht,
- E_f : E_f ist der Energiestrom in den Brennstoffen, *der zur Erzeugung von Dampf beiträgt*,
- E_i : E_i sind sonstige eintretende (*importierte*) Energieströme, wie z.B. in Hilfsstoffen, als Kondensatrückläufe, als elektrische Energie usw.
- E_p : E_p ist der nutzbare (*produzierte*) Energiestrom, bestehend aus elektrischer Energie P_{el} und thermischer Energie \dot{Q}_{th} ($= \dot{Q}_{Nutz}$), wobei zu betonen ist, dass die jeweiligen Eigenbedarfe der Anlage noch enthalten sind, d.h. E_p ist sozusagen die *bruttoproduzierte* Energie, die sich somit auf einen inneren Bilanzkreis bezieht, bei dem der sog. Eigenbedarf der Anlage noch nicht abgezogen ist. Dieses Abziehen des Eigenbedarfes ist erforderlich, wenn der Nutzen für einen *externen Abnehmer* zu ermitteln ist.

Desweiteren wird die so dargestellte elektrische und thermische Energie (*bruttoproduziert*) noch mit Äquivalenzfaktoren \ddot{a}_{el} und \ddot{a}_{th} bewertet, d.h.:

$$E_p = P_{el} \cdot \ddot{a}_{el} + \dot{Q}_{th} \cdot \ddot{a}_{th} \quad (35)$$

Dem entsprechend wird der R1-Faktor mit der Vorschrift:

$$R1 = \frac{P_{el} \cdot \ddot{a}_{el} + \dot{Q}_{th} \cdot \ddot{a}_{th} - (E_f + E_i)}{0,97 \cdot (\dot{m}_{AF} \cdot h_{u,AF} + E_f)} \quad (36)$$

errechnet.

Nimmt man zur prinzipiellen und übersichtlichen Darstellung nun wieder an, dass wie häufig vorkommend E_f und E_i vernachlässigt werden können, ergibt sich mit der weiteren Vereinfachung, dass statt des Faktors 0,97 näherungsweise der Faktor 1 eingesetzt wird, aus der Vorschrift (Gleichung 34) für den R1-Faktor:

$$R1 = \frac{P_{el} \cdot \ddot{a}_{el}}{\dot{m}_{AF} \cdot h_{u,AF}} + \frac{\dot{Q}_{th} \cdot \ddot{a}_{th}}{\dot{m}_{AF} \cdot h_{u,AF}} \quad (37)$$

Mit den Beziehungen (17) und (25) wird folglich:

$$R1 = \beta \cdot \ddot{a}_{el} + \alpha \cdot \ddot{a}_{th} \quad (38)$$

und mit Gleichung (24)

$$R1 = 1 + \alpha \cdot \ddot{a}_{th} \quad (39)$$

¹⁰⁾ Voraussetzung für die energetische Verwertung [26] ist für vor dem 01.01.2009 genehmigte Anlagen $R1 > 0,6$ bzw. 0,65 für nach dem 31.12.2008 genehmigte Anlagen.

Dadurch, dass man sich politisch am Äquivalent der elektrischen Energie orientiert, das ist die Zahl 1 in (39) und den thermischen Nutzen zusätzlich in Anrechnung bringt, ist ersichtlich, dass der R1-Faktor größer als 1 werden kann. Für die praktische Berechnungsvorschrift werden zur Beurteilung einer Anlage nicht deren eigene Äquivalenzwerte ange-
setzt, sondern durchschnittliche Werte festgelegt und zwar

für die Erzeugung elektrischer Energie in Kraftwerken $\ddot{a}_{el} = 2,6$

und

für die Bereitstellung von thermischer Energie in Heizwerken $\ddot{a}_{th} = 1,1$.

Aufgrund vorgegebener physikalischer Randbedingungen bei Abfallverbrennungsanlagen sind deren elektrische Wirkungsgrade relativ zu anderen Kraftwerken gering. Daher erhält man bei den vorgenannten Durchschnitts-Äquivalenzwerten mit der Vorschrift (Gleichung 36) im Allgemeinen für Abfallverbrennungsanlagen Werte für R1, die kleiner als 1 ($R1 < 1$) sind (bis herab zu $R1 < 0,5$), wenn gleich auch wie zuvor begründet, Werte $R1 > 1$ vorkommen. Beispiele findet man z.B. in [7]. Entsprechend ihrem Bestimmungszweck gilt die Berechnungsvorschrift R1 nur für Abfallverbrennungsanlagen.

Resümee zur Anwendung der VDI-Richtlinie 3460 und der R1-Formel [1, 8]

1. Die VDI-Richtlinie 3460 [31] basiert auf bekannten und bewährten ingenieurtechnischen Kenntnissen und ist damit die Grundlage der Bewertung der Energieeffizienz von Abfallverbrennungsanlagen, insbesondere vor dem Hintergrund der Optimierung.
2. Die R1-Formel [26] hat eine politische Ordnungsfunktion zur Unterscheidung von R1 und D10 (R1 als Fachbegriff).
3. Bei Unterscheidung der beiden vorgenannten Betrachtungsweisen 1. und 2. ist die Bezugnahme in der VDI-Richtlinie 3460 auf R1 damit nicht erforderlich.

3.4. Beispiele zur Bildung von Kennwerten und deren Bedeutung

3.4.1. Anlagenwirkungsgrad einer Abfallverbrennungsanlage mit und ohne Abgasrückführung

Als Anfangssystem dient das Bild 13. Dort ist das thermische Hauptverfahren, z.B. bestehend aus Rostfeuerung (Systemgrenze A) und Kessel (Systemgrenze B), 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 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) erzeuge.

Die Summe der eintretenden Ströme (Aufwand) muss, wie erwähnt, sowohl bei Stoff-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).

Es muss nicht nur ein einziger Nutzstrom den jeweils betrachteten Bilanzkreis verlassen.

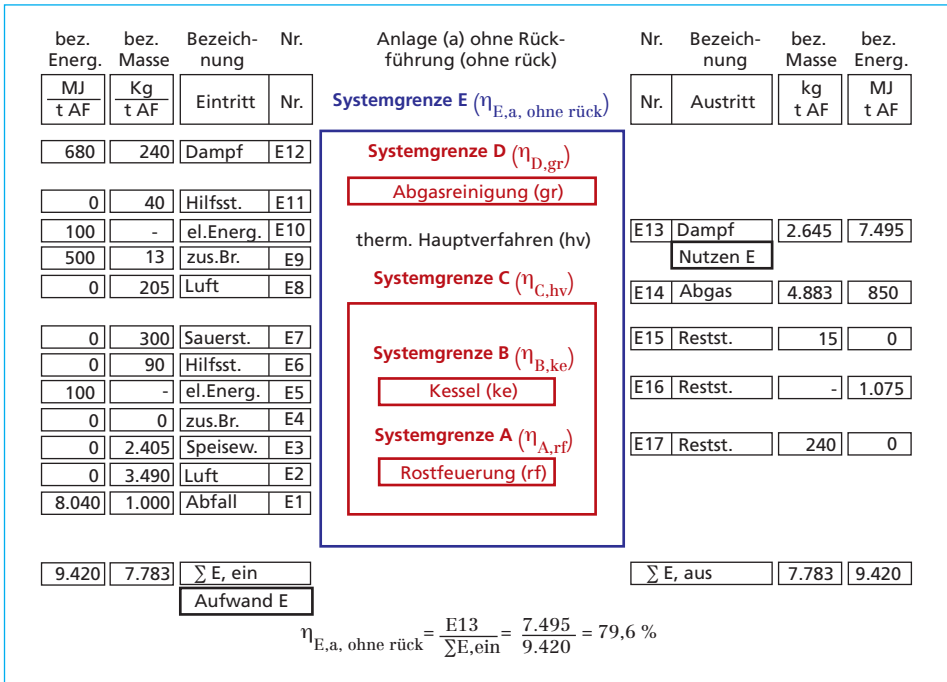


Bild 13: System zur Bildung des Anlagenwirkungsgrades η_a (ohne Rückführung)¹¹

Wichtig ist, dass die Summe aller Nutzströme (kurz als Nutzen bezeichnet) sich vom Aufwand, das ist die Summe aller zugeführten Ströme, 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

$$\eta = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{\text{Aufwand} - \text{Verlust}}{\text{Aufwand}} = 1 - \frac{\text{Verlust}}{\text{Aufwand}} = 100 \% - \frac{\text{Verlust}}{\text{Aufwand}} \quad (40)$$

Diese Gleichung selbst scheint trivial zu sein; sie ist es jedoch nicht, wenn man sie anwenden will, weil die Verluste technisch *häufig schwer zu finden* sind. Bilanzen werden daher nicht selten geschlossen, in dem man aus bekanntem Nutzen und Aufwand einfach die Verluste insgesamt als *Aufwand minus Nutzen* angibt. Dieser Weg ist zwar für die unmittelbare Bilanzierung an der jeweiligen Systemgröße 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 Wirkungsgrad der Anordnung in der jeweils betrachteten Systemgrenze bzw. in dem jeweils betrachteten Bilanzkreis zu verbessern.

¹¹ Es werden hier und im Folgenden nur die auf 1 t Abfall (1 tAF) bezogenen Größen aufgeführt. Die jeweiligen Ströme erhält man durch die jeweilige Multiplikation mit dem, dem System zugeführten absoluten Abfallmassenstrom m_{AF}

Wie oben erwähnt, dürfen bei der Bildung von Wirkungsgraden nur Werte an ein und derselben jeweils betrachteten Systemgrenze verwendet werden.

Im vorliegenden Fall wird

$$\eta_E = \eta_{E,a} = \eta_{E,a,ohne\ r\ddot{u}ck} = \frac{Nr.E13}{\Sigma E_{ein}} = 79,6\ \%^{12} \quad (41)$$

Benötigt die Anlage aus dem produzierten Nutzen (hier thermischer Nutzen des Stromes E13, Dampf) einen Teil als Eigenbedarf, so wird dieser rückgeführt, was in Bild 14 dargestellt ist. Die Bilanzgrenze E in Bild 13 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 r\ddot{u}ck*) bezeichnet werden kann.

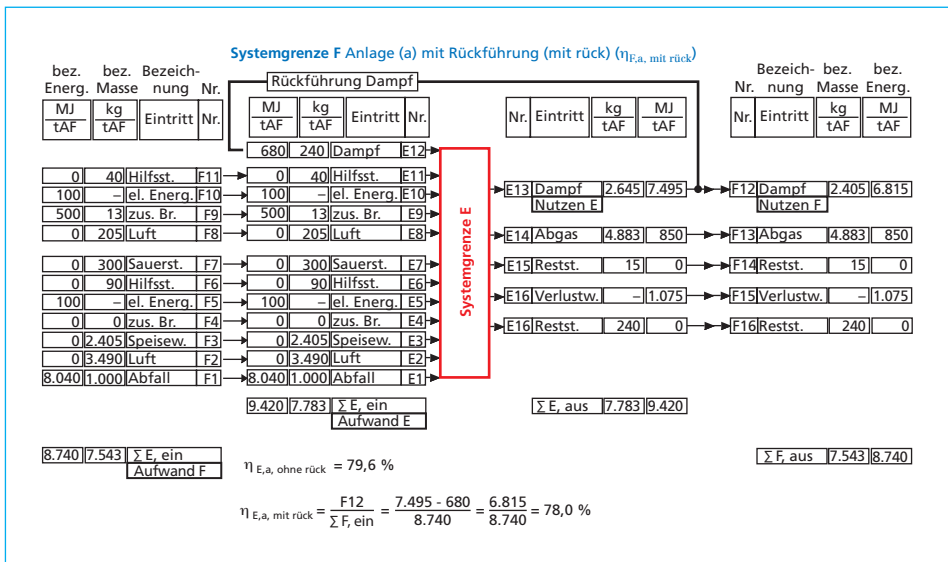


Bild 14: System zur Bildung des Anlagenwirkungsgrades η_F (mit Rückführung)

Unter Berücksichtigung des Eigenbedarfes hat die Anlage nun einen Wirkungsgrad

$$\eta_F = \eta_{F,a} = \eta_{F,a,mit\ r\ddot{u}ck} = \frac{Nr.F12}{\Sigma F_{ein}} = 78,0\ \%^{13} \quad (42)$$

3.4.2. Systemgrenzen zur Beschreibung des Verbraucherverhaltens (Abnehmerverhaltens), hier Beispiel Nutzungsgrad (Nutzungswirkungsgrad) η_i

Im Zusammenhang mit Verlusten wird *manchmal darüber geklagt*, dass Abfallverbrennungsanlagen häufig in ihrer Effizienz beeinträchtigt werden, weil sie wegen der Entsorgungspflicht ohne Rücksicht auf die nachgefragte Nutzenergie verbrennen (d.h. Energie

¹² Da keine Energie rückgeführt wird, wird zur weiteren Verdeutlichung der Index *ohne r\ddot{u}ck* hinzugefügt

¹³ Da keine Energie rückgeführt wird, wird zur weiteren Verdeutlichung der Index *ohne r\ddot{u}ck* hinzugefügt

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.

In Fortführung des Bild 14 (System F) wird dieses zu dem Bild 15 erweitert. Zunächst wird Bild 14 vollständig als System F in das Bild 15 übertragen. Es sind jedoch der Übersichtlichkeit wegen folgende Vereinfachungen getroffen:

- Es werden nur noch Energiebilanzen dargestellt (keine Massenbilanzen).
- Beim Eintritt werden nur noch 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 ($\sum e_{\text{zus}}$)¹⁴ bezeichnet.
- Beim Austritt wird nur der Nutzstrom Nr. F12 einzeln übernommen. Die restlichen Ströme werden aufsummiert zu einem einzigen zusammengefasst und mit F13 bis F16 bzw. als Eigenverlust bezeichnet.

In Bild 15 wird nun ausgehend von der Systemgrenze F 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 einen durch den Verbraucher verursachten Fremdverlust¹⁵ 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.

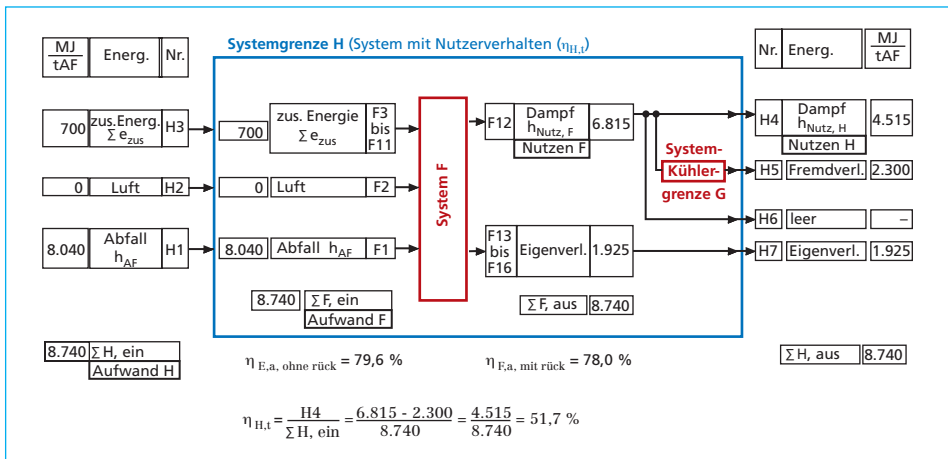


Bild 15: System zur Bildung des Nutzungsgrades η , siehe Bild 14

¹⁴ 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 ($\sum e_{\text{zus}}$). 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.

¹⁵ Da der Verbraucher nicht das gesamte angebotene Potential (Nutzen F12) abnimmt, sondern nur einen Teil (H4), entsteht ein Verlust (H5), der nicht von der Anlage verursacht ist, und daher im Unterschied zu dem Begriff *Eigenverlust* (F13 bis F16) als *Fremdverlust* bezeichnet wird.

Man kann nun an der Systemgrenze H einen sog. Nutzungsgrad $\eta_{H,t}$ formulieren. Seine Bildung geht aus der Legende des Bild 15 hervor. Der Vollständigkeit wegen sind noch einmal die Anlagenwirkungsgrade $\eta_{E,a}$ und $\eta_{E,a}$ aus den vorangegangenen Bildern mit angeben.

Eine Kennzahl, die das Verbraucherverhalten unmittelbar charakterisieren würde, wäre das Verhältnis $\eta_{H,Verbraucher} = H4/(H4 + H5) = 66,3 \%$. Diese Kennzahl sagt aus, dass an der Bilanzgrenze H $(1 - \eta_{H,Verbraucher}) = 33,7 \%$ des von der Anlage angebotenen Nutzens (Systemgrenze F) nicht abgenommen, bzw. vom Verbraucher verursacht an die Umgebung abgegeben (weggeworfen) wird.

3.4.3. Beschreibung von Verfahrensketten, hier Beispiel Primärwirkungsgrad η_p

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

In der Regel benötigen thermische Abfallbehandlungsanlagen zu ihrem Betreiben Primärressourcen. Dies führt zur Vorschaltung von Primärenergieumwandlungsprozessen vor dem betrachteten Prozess und damit insgesamt zu einer Verfahrenskette, die durch eine wiederum erweiterte Systemgrenze (Bilanzkreis) umschlossen wird. An dieser können dann am Beispiel *Wirkungsgrad* sog. Primärwirkungsgrade η_p gebildet werden, was im Folgenden gezeigt wird.

Bevor das vorgenannte Beispiel fortgeführt wird, wird zunächst das Prinzip anhand des Prinzipschemas Bild 2 erläutert. Die betrachtete Anordnung (Systemgrenze R bzw. Bilanzkreis R) habe den Anlagenwirkungsgrad

$$\left(\eta_a = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{e_{\text{Nutz}}}{h_{AF} + \sum e_{\text{zus}}} \right)_R \quad (43)$$

Für den Betrieb des Systems R sei zusätzlich – neben dem Energieinhalt des Abfalles h_{AF} – die Energie $(\sum e_{\text{zus}})_R$ erforderlich. Diese muss durch Umwandlung von Primärenergie (Systemgrenze S) bereitgestellt werden, d.h. es ist Primärenergie z.B.

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

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

$$\left(\eta_p = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{e_{\text{Nutz}}}{h_{AF} + (\sum e_p)} \right)_T \quad (44)$$

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

In Fortführung des Beispiels wird nun das Bild 15 zu dem Bild 16 erweitert, in das Primärenergieumwandlungsprozesse einbezogen werden. In dem Bild 16 ist jeweils das System *Primärenergieumwandlung* (Systemgrenze I) zu dem bislang erarbeiteten System H (Bild 15) 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 ($\Sigma e_{zus}^H = 700 \text{ MJ/t}_{AF}$ (Strom H3) im Einzelnen aufgeschlüsselt die benötigte Primärenergie ($\Sigma e_p^J = 1800 \text{ MJ/t}_{AF}$ (Strom J4) ermittelt wird. Die Verluste aus dem Primärumsandlungsprozess von 1100 MJ/t_{AF} werden als Strom J5 aus dem Bilanzkreis J abgeführt. Die Bildung des Primärwirkungsgrades $\eta_{J,p}$ geht aus der Legende des Bildes hervor. Der Vollständigkeit halber sind die Wirkungsgrade $\eta_{E,a}$ und $\eta_{F,a}$ sowie der Nutzungsgrade $\eta_{H,t}$ aus den vorangegangenen Bildern nochmals mit aufgeführt.

3.4.4. Systemgrenzen zur Beschreibung von Nettoeffekten von Verfahrensketten, hier Beispiel Nettoprimärwirkungsgrad η_n

Vor Fortführung des Beispiels wird wieder das Prinzip vorangestellt (siehe Bild 3). Der zur Abfallbehandlung erforderliche Primärenergieaufwand könnte als Ressource geschont werden, wenn es den zu behandelnden Abfall nicht gäbe. Man kann folglich einen *Nettoabfallnutzen* e_{Netto} bilden, in dem man ausgehend von der Nutzenergie (e_{Nutz}^T) (Systemgrenze T) die für das System T benötigte Primärenergie Σe_p abzieht. Es würden also diese Primärressourcen dann durch *eigene erzeugte* Nutzenergie ersetzt bzw. substituiert (siehe Bild 3). Das Abziehen der benötigten Energie Σe_p vom Nutzen (Punkt X in Bild 3) bedeutet wie dargestellt eine gedankliche Rückführung¹⁶ an den Eintritt des Systems T. Die erweiterte 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 *Nettowirkungsgrad*. An dem System U ergibt sich folglich

$$\left(\eta_n = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{e_{Netto}}{h_{AF}}\right)_U \quad \text{mit } e_{Netto} = e_{Nutz} - \Sigma e_p \text{ (Bilanz am Abzweig X)} \quad (45)$$

Erhält man für η_n einen Wert $\eta_n > 0$ ($e_{Netto,U} > 0$), wird aus dem Abfall ein energetischer Nutzen gezogen, d.h. einen 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**.

Erhält man für η_n einen Wert $\eta_n < 0$, d.h. wird die zusätzlich benötigte Energie Σe_p größer als der Nutzen (e_{Nutz}^T) des Systems T, dann reicht die im Abfall mitgeführte Energie (Enthalpie) η_{AF} nicht aus, um den *Primärenergieaufwand* zu decken, es verbleibt somit ein Primärressourcenverbrauch bei der Abfallbehandlung. Damit ist mit $\eta_n < 0$ und somit der Aspekt einer zusätzlichen energetischen Verwertung nicht erfüllt¹⁷.

¹⁶ Hier ist wichtig darauf hinzuweisen, dass die Substitution von einer Energieart (z.B. Erdgasenthalpie) durch eine andere (z.B. erzeugte Dampfenenthalpie) 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 $f_{sub} \neq 1$ und hängt von vielen Faktoren ab. Der Übersichtlichkeit wegen wird hier $f_{sub} = 1$ gesetzt, um das Prinzip der Substitution bzw. der Energierückführung einfach zu veranschaulichen. Was die Ermittlung von f_{sub} betrifft, wird auf [z.B.[15, 17, 18, 19, 26]] verwiesen.

¹⁷ Häufig wird bei negativen Werten von η_n nicht von einem Wirkungsgrad sondern von einem Aufwandsgrad gesprochen. Inhaltlich sind die Begriffe mit identischem Inhalt belegt.

Anhand der Ermittlung von η_n mit dem aus der Verfahrenstechnik bekannten und auch allgemein anerkannten Methoden und Regeln ist die Frage, ob eine Abfallverbrennungsanlage den Status einer energetischen Verwertung erfüllt (Wirkungsgrad η_n positiv) oder nicht erfüllt (η_n negativ) eindeutig zu beantworten¹⁸.

In Fortführung des oben begonnenen Beispiels; das bis zu Bild 16 entwickelt wurde, wird dieses nun zu dem Bild 17 erweitert, in dem die benötigte Primärenergie durch eigen erzeugte Nutzenergie substituiert wird.

Es wird das System J aus Bild 16 in das Bild 17 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 eintritt. Der die Systemgrenze K verlassende Nutzstrom ist damit netto die Energie, die wirklich nur dem Abfall als einzigem Aufwand zuzuschreiben ist.

Bemerkungen:

- Der Übersichtlichkeit und Einfachheit wegen wird in den Bildern bei der Rückführung ein Energieaustausch- bzw. Energiesubstitutions- bzw. Energierückführungsverhältnis f_{sub} (Index *sub* für Substitution) $f_{\text{sub}} = 1$ angenommen (vgl. Fußnote 16).
- 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. Dies würde jedoch eine detailliertere Zeichnung mit Erweiterung um einen Kraftwerksprozess mit elektrischem Generator, zugehörigen Verlusten usw. bedeuten.

Die Bildung des Nettoprimärwirkungsgrades $\eta_{K,n}$ geht aus der Legende des Bild 17 hervor. Der Vollständigkeit wegen sind die Wirkungsgrade η_{E_a} , η_{F_a} , der Nutzungsgrad $\eta_{H,t}$ sowie der Primärwirkungsgrad $h_{j,p}$ nochmals mit aufgeführt¹⁹.

In Bild 17 fällt der 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 Nutzerverhalten (Verbraucherverhalten) (System H) liegt. Da die Fremdverluste (System H) an der Anlage selbst (System F) als Nutzungspotenzial vorliegen, kann man aus diesem Nutzen (Strom J8) wie in Bild 18 dargestellt, die benötigte Primärenergie zur Verfügung stellen. Im Gegensatz zu Bild 17 ist daher in Bild 18 der erforderliche Primärenergiestrom J3 + J4 aus dem Strom H6 bzw. J8 abgedeckt (substituiert, rückgeführt).

¹⁸ Bemühungen, die Effizienz von Anlagen (plant efficiency) mit Werten, die größer als Eins (plant efficiency > 1), d.h. mit Werten zu belegen, die größer als 100 % werden, zeigen nicht in die richtige Richtung. Dies erkennt man in Bild 3 (Systemgrenze T). Wenn man die mit dem Abfall eingetragene Energie an der Systemgrenze T ($h_{A,F}$) vernachlässigt (Null setzt) und dann den Nutzen ($e_{\text{Nutz},T}$) ins Verhältnis zu dem Primärressourcen Σe_p als einzigem Aufwand setzt, erhält man in der Regel für das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand Werte, die größer als Eins bzw. größer als 100 % werden. Dies suggeriert mit den allgemein anerkannten Regeln der Technik, dass der Abfall in der Anlage bewirkt (plant efficiency), dass der zugeführte Aufwand (Primärenergie) um ein Vielfaches (d.h. >1, z.B. 1,2; 1,4 bzw. 120 % bzw. 140 % ... usw.) als Nutzen zur Verfügung steht. Bei Wärmepumpen ist die Effizienz mit einem Wert größer als Eins physikalisch sinnvoll, nicht jedoch bei Abfallverbrennungsanlagen, wie die Systemgrenze T deutlich macht.

¹⁹ Entsprechend Fußnote 18 hat die Anlagenwirksamkeit (plant efficiency)

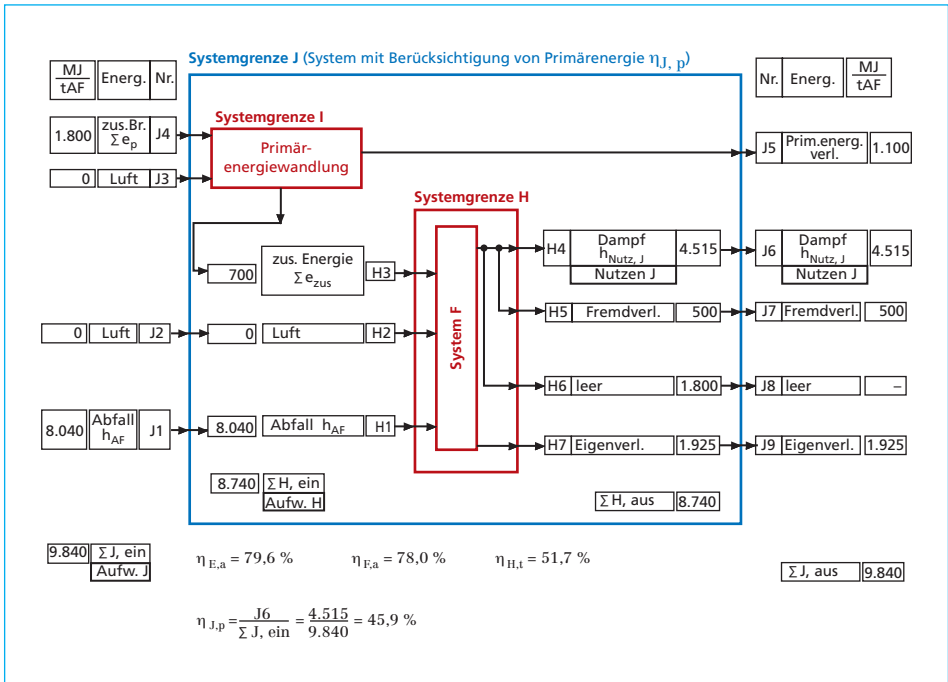


Bild 16: System zur Bildung des Primärwirkungsgrades η_p , siehe Bilder 14 und 15

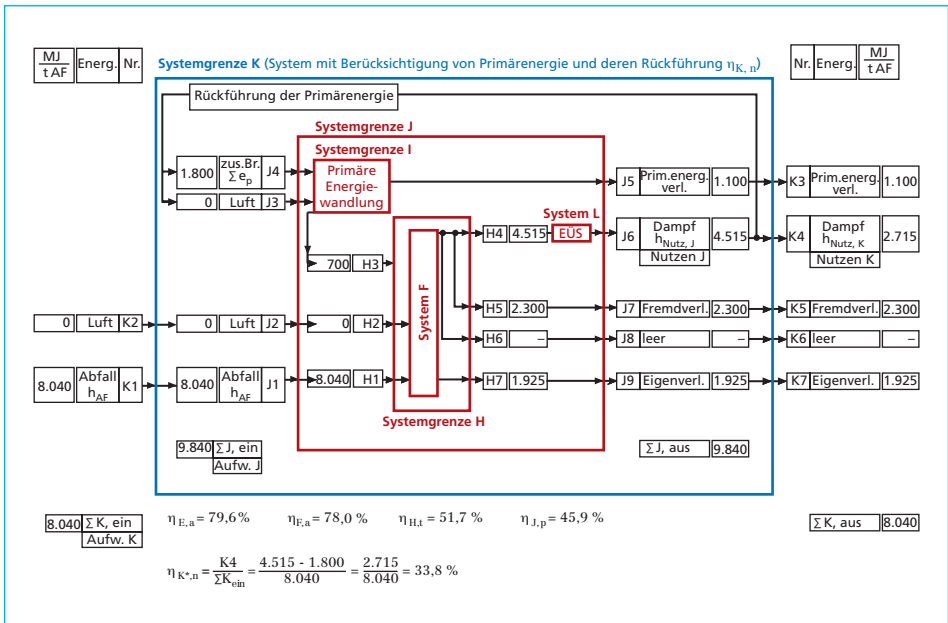


Bild 17: System zur Bildung des Nettoprimärwirkungsgrades η_n , siehe Bilder 15, 16 und 17

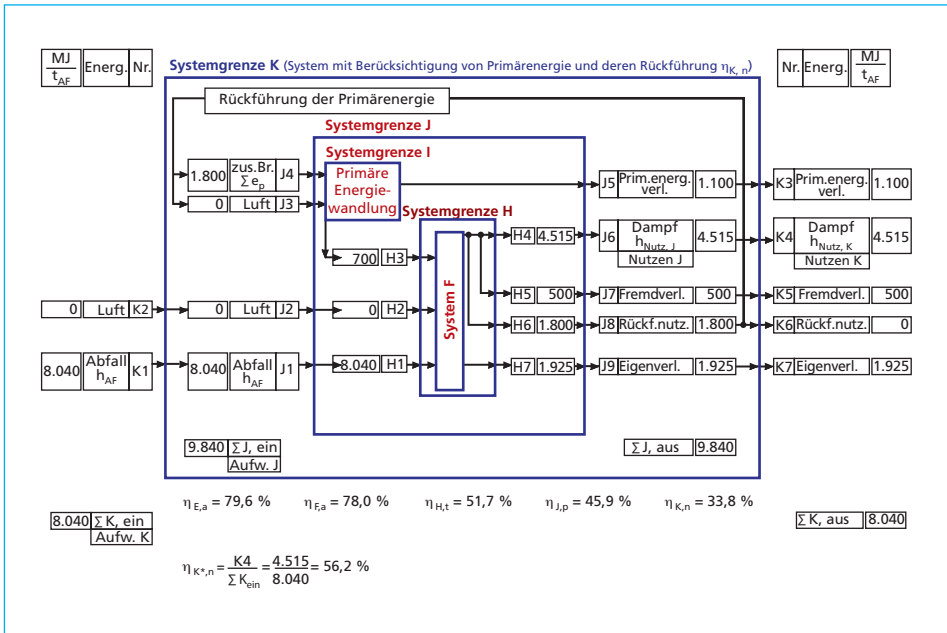


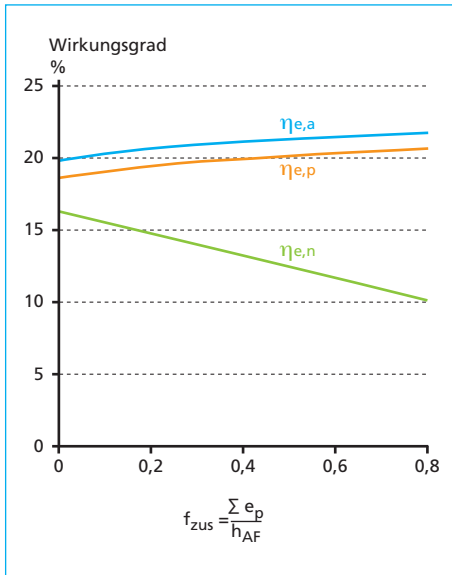
Bild 18: System zur Bildung des Nettoprimärwirkungsgrades η_n

bei der Systemgrenze J einen Wert von 2,508 bzw. 250,8 % (Quotient aus J6 und (J2+J3+J4)),
 bei der Systemgrenze H einen Wert von 6,450 bzw. 645,0 % (Quotient aus H4 und (H2+H3)),
 bei der Systemgrenze F einen Wert von 9,736 bzw. 973,6 % (Quotient aus F12 und (F2 bis F11)) usw.

Über den Kühler wird jetzt lediglich noch der Strom H5 (500 MJ/t_{AF}), bzw. J7, bzw. K5, d.h. ein wesentlich kleinerer Verlust abgeführt als in Bild 17. Da in Bild 18 die gleichen Systemgrenzen und Aufteilungen wie in Bild 17 verwendet sind, jedoch eine andere Verwendung des Anlagennutzens (Ströme H4 und H6) vorgenommen ist, sind jetzt die betroffenen Systeme im Unterschied zu Bild 17 zur Unterscheidung mit dem Hochindex * versehen.

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 (siehe Bild 19). Dies ist physikalisch und technisch zwar richtig, bringt aber nicht unmittelbar zum Ausdruck, dass der steigende Wirkungsgrad durch *zusätzlichen Verbrauch von Primärressourcen erkauf*t wird. Der Nettoprimärwirkungsgrad hingegen sinkt mit laufend steigendem Einsatz von Primärenergieressourcen, d.h. er verdeutlicht den Zusatzaufwand an Primärenergie wie beispielhaft in [28] an elektrischen Wirkungsgraden (Index e) gezeigt ist.

Die vorgenannten Beispiele zeigen (Bild 13 bis Bild 18), 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 sog. Kesselwirkungsgrad (Bilanzkreis B in Bild 13) 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 bzw. präzisiert werden.

Bild 19:

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 [28])

3.4.5. Beispiel der Bewertung des Stoffflusses Kohlenstoff (Kohlendioxidemissionen) einer Abfallverbrennungsanlage

Die vorangegangenen Schemata (Bild 13 bis Bild 19) sind, wie in Abschnitt 3 dargestellt, nicht nur für Energie- sondern auch für Massen- und Stoffbilanzen zu verwenden. Trägt man an jeden Strom nicht nur dessen gesamte Masse, sondern auch den jeweils interessierenden Anteil des in ihr enthaltenen Elements ein, z.B. Kohlenstoff, so erhält man entsprechend 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 (z.B. [28, 29]). Über die Systemerweiterung bis zur benötigten Primärressource (Bilanzkreis J, Bild 16) und weiter bis zu deren Rückführung (Bilanzkreis K, Bild 17) wird nicht nur eine Nettobetrachtung der allein dem Abfall zuzuschreibenden Energienutzung möglich, sondern auch die allein dem Abfall zuzuschreibenden CO_2 -Emissionen z.B. bezogen auf den Nettonutzen. In Tabelle 1 sind die sich je nach Systemgrenze ergebenden CO_2 -Emissionen als Ergebnis zusammengestellt. Der besseren Zuordnung wegen sind die bereits ermittelten verschiedenen Wirkungsgrade aus Bild 13 bis Bild 18 noch einmal mit aufgeführt, so dass ein unmittelbarer Vergleich und eine Zuordnung möglich sind.

Tabelle 1:

Wirkungsgrade (η) und Emissionen (ϵ_{CO_2}) (Zusammenfassung)

Bildnummer	Wirkungsgrade η %	Emissionen ϵ_{CO_2} kg _{CO2} /MJ _{Nutzen}
Bild 13	$\eta_{E,a}$ 79,6	ϵ_{E,CO_2} 0,11
Bild 14	$\eta_{F,a}$ 78,0	ϵ_{F,CO_2} 0,12
Bild 15	$\eta_{H,t}$ 51,7	ϵ_{H,CO_2} 0,19
Bild 16	$\eta_{J,p}$ 45,9	ϵ_{J,CO_2} 0,20
Bild 17	$\eta_{K,n}$ 33,8	ϵ_{K,CO_2} 0,30
Bild 18	$\eta_{K^*,n}$ 56,2	ϵ_{K^*,CO_2} 0,18

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

3.5. Einsatz von Abfall in anderen industriellen Hochtemperaturverfahren – 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 (Verfahrenskette mit zugehöriger Systemgrenze), dass ein Ersatzbrennstoff, d.h. ein Brennstoff entsteht, der den regulären Brennstoff (Regelbrennstoff) in einer Anlage als *Energielieferant* 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, wie viel 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. [4, 6, 11, 12, 13, 17, 19, 20, 21, 22, 25, 28, 32]).

Will man beispielsweise die Frage beantworten, ob der Einsatz von Abfall 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 Abfallmenge ersetzt wird, selbst wenn man das Energieaustauschverhältnis, das in der Regel nicht den Wert eins annimmt ($f_{\text{sub}} = 1$), 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 eine Systemgrenze 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 Abfalls,
 - * 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 kann, wenn bei beiden Situationen von den gleichen Einsatzstoffmengen und -arten ausgegangen wird, d.h. die Summe der Einzelprozesse genau soviel Abfall- und Kohlenmengen von der jeweils gleichen Art als Input erhalten wie der Koppelprozess.

Damit ist für den unmittelbaren Vergleich das Zurückverfolgen der Einsatzstoffe bis zu ihrem Ursprung (Ursprung der Primärressource) nicht notwendig.

Auf der Basis gleicher produzierter Mengen an Produkt (hier Klinker) für beide Situationen erkennt man dann, ob die Summe der Einzelprozesse oder der Koppelprozesse mehr Energie (z.B. thermische oder elektrische Energie) bereitstellt. Dabei ergibt sich (hier sei auf das Schrifttum (z.B. [21, 28]) 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 (zu belassen), d.h. eine Brennstoffsubstitution nicht vorzunehmen.

Die Verhältnisse werden an dem folgenden Beispiel (Bild 20 und Bild 21) erläutert.

Zunächst werden Abfallverbrennung und Hochtemperaturproduktionsprozess getrennt (Situation ohne Brennstoffsubstitution) betrieben (Einzelprozesse) und wie in den vorangegangenen Abschnitten erläutert, detailliert bilanziert. Das Ergebnis sei das in Bild 20 dargestellte, bei dem der Übersicht wegen nur benötigte Daten angegeben sind. Mit den Eingangsmengen (Abfall für die Abfallverbrennung, Kohle und Rohstoffe für den Klinkerprozess) werden bei getrennten Prozessen ein bestimmter Betrag an elektrischer Energie aus der Abfallverbrennung und eine bestimmte Menge an erzeugtem Klinker (Vergleichsbasis 1.000 kg) erzeugt. Die beiden Prozesse werden nun gekoppelt (Situation mit Brennstoffsubstitution) (Bild 21), indem ein Teil der Kohle für den Klinkerprozess durch Abfall substituiert wird, wobei die Eingangsmengen an Abfall und Kohle gegenüber den Einzelprozessen gleich bleiben. Aus Bild 21 erkennt man, dass ein Teil des Abfalls unter Aufwand von elektrischer Energie mechanisch-biologisch vorbehandelt wird, so dass ein Ersatzbrennstoff entsteht, der zur Substitution herangezogen werden kann (in dem Beispiel in Bild 21 erkennt man, dass 16,5 kg Steinkohle durch 29,8 kg Ersatzbrennstoff substituiert werden; der Übersichtlichkeit wegen ist hier das Energieaustauschverhältnis mit dem Wert *Eins* angesetzt)²⁰.

Die substituierte Kohle wird in einem Kraftwerk verstromt, während die niederkalorische Fraktion aus der mechanisch-biologischen Vorbehandlung zusammen mit dem Sperrmüllanteil ausreicht, um eine Abfallverbrennung noch befriedigend betreiben zu können (z.B. ohne Sauerstoffanreicherung der Verbrennungsluft). Man erkennt, dass in Summe in dem vorliegenden Beispiel nach Abzug der für die mechanisch-biologische Vorbehandlung benötigten elektrischen Energie insgesamt etwa. 14 % mehr elektrische Energie bereitgestellt wird im Vergleich zu dem Betrieb der Einzelprozesse, was auch ein entsprechendes CO₂-Minderungspotential darstellt. Dabei wird die produzierte Klinkermenge als Basis

²⁰ In Ergänzung zu Fußnote 15 ist zu erwähnen, dass es je nach Anlagenschaltung, Prozessführung und Einsatzvergleich vorkommen kann, dass ein Ersatzbrennstoff mit einem kleineren Heizwert energetisch mehr wert ist als ein solcher mit höherem Heizwert. Damit soll angemerkt sein, dass in der jetzt wieder aktuellen Diskussion zur Trennung von Abfall in Abfall zur Beseitigung oder Abfall zur Verwertung an der Heizwertgrenze von 11 MJ/kg zwar der Versuch eines Ordnungsrahmens unternommen wird, dass es aber verfahrenstechnisch eine solche Grenze nicht gibt bzw. auch nicht sinnvoll erscheint.

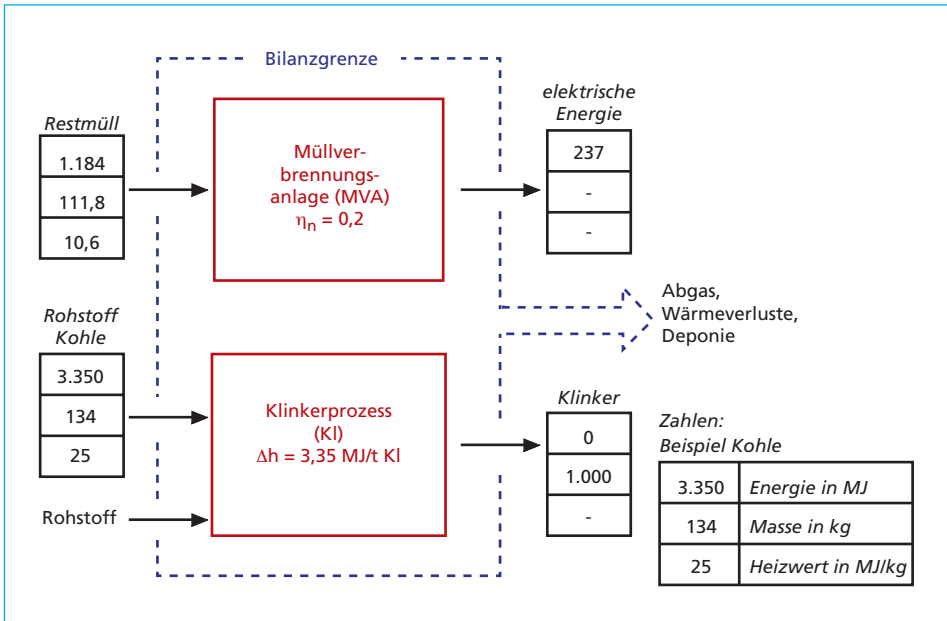


Bild 20: Vereinfachte Darstellung der Einzelprozesse Abfallverbrennungsanlage und Klinkerherstellungsprozess

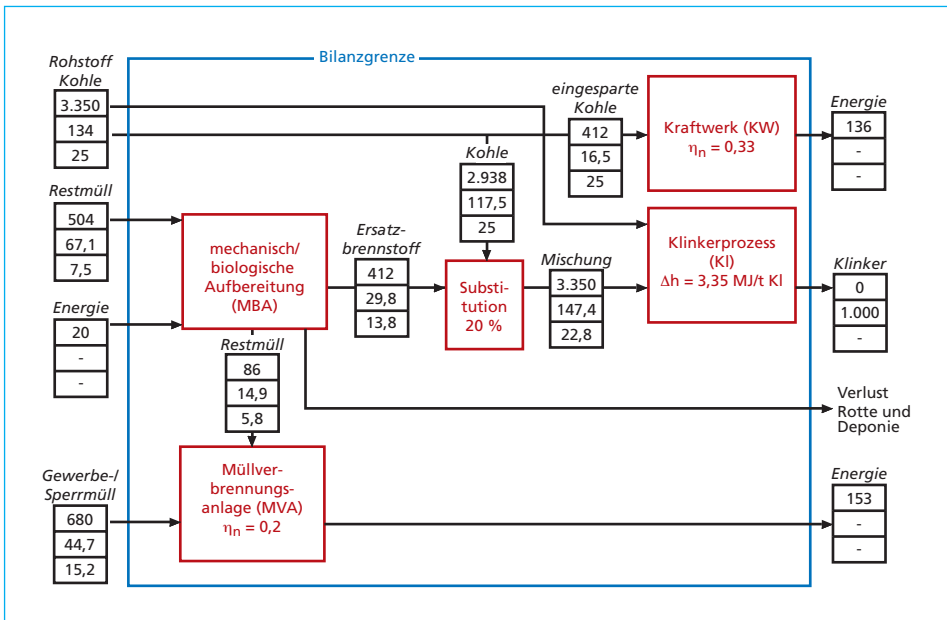


Bild 21: Vereinfachte Darstellung eines Koppelprozesses: Substitution von Primärbrennstoff (hier Kohle) in einem Klinkerbrennprozess durch Ersatzbrennstoff aus mechanisch-biologischer Vorbehandlung

beibehalten. Das Ergebnis ist natürlich das gleiche, wenn man die Eingangsmenge an Kohle für den Koppelprozess soweit vermindert, bis in diesem die gleiche elektrische Energie bereitgestellt wird wie bei den Einzelprozessen (Bild 21). Im vorliegenden Fall bedeutet dies eine Verringerung der Primärenergieressource *Kohle* um drei Prozent und ein entsprechendes CO_2 -Minderungspotential, durch den Koppelprozess, d.h. durch Einsatz von Ersatzbrennstoff.

Es sei an dieser Stelle hingewiesen, dass bei solchen hier nur exemplarisch darstellbaren Koppelprozessen je nach Randbedingungen und Verhältnissen sich auch ein negatives Ergebnis ergeben kann, d.h., dass dann Koppelprozesse weniger Energie bereitstellen als Einzelprozesse, d.h. dass dann bei Einzelprozessbetrieb Primärenergieressourcen eingespart und CO_2 -Emissionen gemindert werden. Solche Verhältnisse können z.B. auftreten, wenn bei der Ersatzbrennstoffherstellung soweit gegangen wird, dass für den verbleibenden niederkalorischen Reststoff, der in einer Abfallverbrennungsanlage *entsorgt* werden muss, dort Zusatzprimärenergie (z.B. Erdgas, oder für Sauerstoffbereitstellung usw.) erforderlich wird. Dieses wäre nicht im Sinne der Abfallwirtschaft und wird auch nicht von Ersatzbrennstoffherstellern beabsichtigt. In der umgekehrten Argumentation stellt sich die Ersatzbrennstoffherstellung wiederum gerade dort günstig dar, wo die niederkalorische Restfraktion einen Heizwert in Höhe des Auslegungswertes für ein Abfallkraftwerk hat. Allgemein hängt beim Vergleich von Einzel- mit Koppelprozessen die Entscheidung, in welchem Umfang Primärenergie eingespart und entsprechend CO_2 -Emissionen gemindert werden, von den folgenden Einflussparametern ab:

- Energieaustauschverhältnis,
- Nettoprimärwirkungsgrad der Abfallverbrennungsanlage (MVA) im Einzelprozess (Bild 20),
- Nettoprimärwirkungsgrad der MVA im Koppelprozess (Bild 21),
- Nettoprimärwirkungsgrad des Kraftwerkes für Primärenergie,
- Energieaufwand für die Vorbehandlung,
- Heizwert des Primärbrennstoffes,
- Heizwert des Ersatzbrennstoffes,
- Heizwert des Abfalls, von dem ausgegangen wird,
- Verteilung der Abfallfraktionen auf Ersatzbrennstoff, auf Anteile, die zu einer weiteren MVA müssen, auf Anteile, die auf einer Deponie abgelagert werden können,
- usw.

Ein Beispiel für ausgewählte Randbedingungen zeigt Bild 22. Hier bedeutet Z_e das elektrische Nutzenergieverhältnis, gebildet aus elektrischer Nutzenergie bei der *Situation Koppelprozess* zur elektrischen Nutzenergie bei der *Situation Einzelprozesse*. $Z_e > 1$ bedeutet somit Ressourceneinsparung durch Koppelprozessbetrieb, $Z_e < 1$ bedeutet also Ressourceneinsparung, wenn man es bei dem Betreiben der Einzelprozesse belässt. Das Bild 22 macht beispielhaft deutlich, dass man bei entsprechender Wahl der Randbedingungen bei der Verwendung von Ersatzbrennstoff entsprechende zusätzliche Energieeinspar- und CO_2 -Minderungspotentiale gegenüber der Monoabfallverbrennung und getrennt davon ablaufendem Hochtemperaturproduktionsprozess erzielen kann.

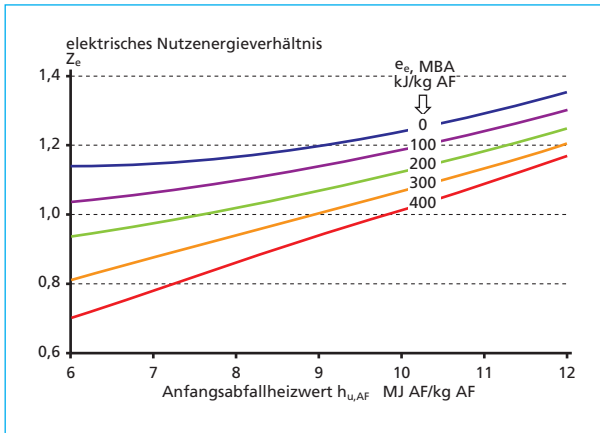


Bild 22:

Elektrisches Nutzenergieverhältnis Z_e in Abhängigkeit vom Abfallheizwert $h_{u,AF}$ für verschiedene elektrische Energieaufwendungen e_e für die mechanisch-biologische Aufbereitung (zugehörig zu Bild 20 und 21, beispielhafte Darstellung)

Ersatzbrennstoffherstellung und Abfallverbrennung widersprechen sich nicht, sondern ergänzen sich. Aus Sicht der Abfallwirtschaft sind somit sowohl die Monoabfallverbrennung als auch die Ersatzbrennstoffherstellung wichtig.

Bei dem Einsatz von Ersatzbrennstoffen ist es das Ziel, Energie (z.B. aus Primärbrennstoffen) zu substituieren. Hat eine entsprechende Untersuchung des zugehörigen Koppelprozesses wie oben beschrieben und der Vergleich mit der Basissituation (Einzelprozesse) ergeben, dass das Ergebnis positiv ist, sind in einem nächsten Schritt erst jetzt nachdem nachgewiesen ist, dass Primärenergieressourcen wirklich eingespart werden, die Ströme bzw. Flüsse von Massen und relevanten Stoffen wie Schwermetallen, usw. zu untersuchen. Dazu werden identisch die Schemata aus der Untersuchung der Energieströme bzw. -flüsse übernommen und an jeden Strom bzw. Fluss nun der Wert (Massen- bzw. Mengenstrom) des zu untersuchenden Elements oder Stoffes geschrieben. Anhand des Vergleichs der Summe aller austretenden Ströme bzw. Flüsse zwischen der *Situation Einzelprozesse* und der *Situation Koppelprozess* (analog zu Bild 20 und Bild 21 erstellten Schemata) erkennt man dann neben quantitativen Unterschieden auch Unterschiede in der Verteilung auf die verschiedenen Massen- bzw. Mengenströme (Flüsse). Es reicht somit auch hier nicht aus, nur den unmittelbaren Ersatz des Primärbrennstoffes (z.B. Kohle in einem Drehrohr zur Klinkerherstellung, d.h. Bilanzgrenze nur um die Klinkerherstellung) zu betrachten.

Das Vorangegangene zeigt, dass die Zusammenhänge komplex sind und ohne genaue Festlegung von Systemgrenzen und Untersystemen die Fragestellungen nicht zu bewältigen sind.

4. Symbole und Indizes

Griechische Buchstaben

α	Wärmeausbeute
β	Stromausbeute
ε	Emission, spezifisch
η	Wirkungsgrad
λ	Luftzahl
σ	Stromkennzahl

ψ	Volumenanteil
ω	Brennstoffausnutzungsgrad
ξ	Massenanteil

Lateinische Buchstaben

a	Aufwandsgrad
ä	äquivalent
A-U,X,Y	Bezeichnung des Bilanzkreises
e	Energie, spezifisch
E	Energie
F	Feuerung
h	Enthalpie, spezifisch
H	Enthalpie
k	Koeffizient (Erläuterungen im Text)
K	Kessel
LUVVO	Luftvorwärmer
m	Masse
P	Leistung
Q	Wärme
S	Entropie
T	Temperatur
W	Arbeit
Z	Nutzenergieverhältnis

Indizes hochgestellt

•	Strom
–	im Mittel (z.B. mittlerer Ausbrandgrad)
*	modifiziert (in Verbindung mit dem Aufwandsgrad)

Indizes tiefgestellt

A-U	Index für den jeweiligen Bilanzkreis
a	Anlage
A	Asche, Abschlammung
ab	abgeführt
Aus	Austritt (aus dem Bilanzkreis)
AF	Abfall
AG	Abgas
Austritt	aus dem betrachteten Bilanzkreis austretende Ströme
Eintritt	in den betrachteten Bilanzkreis eintretende Ströme
B	Brennstoff
BHS	Betriebshilfsstoffe
D	Dampf

e	Energie
Ein	Eintritt (in den Bilanzkreis)
el	elektrisch
F	Falschluff in Zusammenhang mit Luft
gesamt, ges	bezogen auf den gesamten (z.B. Massen-) Strom
gr	Abgasreinigung
GWF	Gewebefilter
hf	thermisches Hauptverfahren
K, ke	Kessel, Kraftwerk
KWK	Kraft-Wärme Kopplung
L	Luft
min	Mindest-, minimal
Netto, n	Netto
Nutz	Nutzen
p	druckabhängig (in Bezug auf die Wärmekapazität)
Primär, prim, p	primär
prod	Produkt
real	real
rf	Rostfeuerung
rück	Rückführung
sub	Energieaustauschverhältnis bei Energiesubstitution
SW	Speisewasser
t	technisch
th	thermisch
U	Umgebung
u	unterer (Heizwert)
v, V, Verl	Verluste
VD	Verdampfung
W	Wasser
WQT	Wäscher, quasitrocken
ZBS	Zusatzbrennstoff
zu	zugeführt
zus	Zusatz, zusätzlich (z.B. zusätzliche Einsatzenergie neben dem Abfall)
0	Bezugszustand

5. Quellen

- [1] Baars, B.; Nottrodt, A.: Naturwissenschaftliche-technische und juristische Rationalität- Ein Widerspruch? Anmerkungen zum Urteil des VGH Baden-Württemberg zur Abfallverbrennung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall – Band 2. Berlin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2007, S. 119-132
- [2] Beckmann, M.; Horeni, H.: Möglichkeiten zur Optimierung von Abfallverbrennungsanlagen durch Einsatz eines Online-Bilanzierungsprogramms. In: VDI Wissensforum IWB GmbH (Hrsg.): 22. Deutscher Flammentag – Verbrennung und Feuerungen. Tagung Braunschweig, 21. und 22. September 2005. VDI-Berichte Nr. 1888, VDI Verlag GmbH Düsseldorf 2005, S. 643-652.
- [3] Beckmann, M.; Horeni, M.; Metschke, J.; Krüger, J.; Papa, G.; Englmaier, L.; Busch, M.: Optimierung von Abfallheizkraftwerken durch Einsatz eines Online- Bilanzierungsprogramms. Erschienen in: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 2. TK Verlag Thomé-Kozmiensky, 2005, S. 219 – 239.
- [4] 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, VDI-Verlag, Düsseldorf 2002, S. 131-163.
- [5] Beckmann, M.; Pohl, M.; Ncube, S.; Gebauer, K.: Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen hinsichtlich brennstofftechnischer Eigenschaften. Recyclingpotenziale in Europa (Juni 2008), © Rhombos Verlag, Müllmagazin; 2008, S.38-41
- [6] 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
- [7] Beckmann, M.; Scholz, R.: Ermittlung der Energieeffizienz in Anlagen zur thermischen Abfallbehandlung. Zur Problematik von Äquivalenzwerten und der Berechnung des Heizwertes. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall – Band 2. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2007, S. 145-164
- [8] Beckmann, M.; Scholz, R.; Seifert, H.; Nottrodt, A.: Bewertung der Energieeffizienz in Anlagen zur thermischen Abfallbehandlung- Stellungnahme des Ausschusses VDI 3460. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall – Band 2. Berlin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2007, S. 119-132
- [9] Beckmann, M.; Scholz, R.; Seifert, H.; Nottrodt, A.: Bewertung der Energieeffizienz in Anlagen zur thermischen Abfallbehandlung. Stellungnahme des Ausschusses VDI 3460. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall – Band 2. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2007
- [10] Boie, W.: Vom Brennstoff zum Rauchgas. B.G. Teubner Verlagsgesellschaft Leipzig, 1957
- [11] Cernoch, S.: Vergleichende wärmetechnische Bewertung von Brennstoffen für Industrieöfen. Arch. Eisenhüttenwesens 44, Nr. 7, 1973, S.521-527
- [12] Cernoch, S. F.: Die wärmetechnischen Gesetzmäßigkeiten des Brennstoffaustausches bei Industrieöfen. gas wärme international, Bd. 27, Nr. 4, 1978
- [13] Görgen, R.; Kahnwald, H.: Vergleichende Bewertung von Gasen. gas wärme international, Bd. 17, Nr. 2, 1968, S. 50-53
- [14] Horeni, M.: Möglichkeiten für die energetische Optimierung von Müllverbrennungsanlagen – Entwicklung, Erprobung und Validierung eines Online-Bilanzierungsprogramms. Papierfliegerverlag Clausthal-Zellerfeld; Dissertation 2007

- [15] Horeni, M.; Beckmann, M.; Fleischmann, H.; Barth, E.: Ermittlung von Betriebsparametern in Abfallverbrennungsanlagen als Voraussetzung für die weitere Optimierung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall – Band 2. Berlin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2007, S. 119-132
- [16] Jeschar, R.; Specht, E.; Bittner, H.-G.: Wärmebehandlungsanlagen und -öfen. Handbuch der Fertigungstechnik, Band 4/2, Herausgeber: G. Spur, Carl-Hanser-Verlag, München, Wien, 1987, S. 649-714
- [17] Kahnwald, H.: Wärmetechnische Bewertung von gasförmigen und flüssigen Austauschbrennstoffen. Archiv für das Eisenhüttenwesen, 35. Jahrg., Heft 10, 1964
- [18] Kommission der europäischen Gemeinschaften (Hrsg.): Vorschlag für eine Richtlinie des europäischen Parlaments und des Rates über Abfälle (von der Kommission vorgelegt). Brüssel, den 21.12.2005 KOM(2005) 667 endgültig – 2005/0281 (COD), Anhang II, S. 34
- [19] Lüth, F.: Bewertung verschiedener Brennstoffe. Stahl und Eisen 71, Nr. 7, 1951
- [20] Lüth, F.: Die Wertigkeit von Gasen gegenüber anderen Brennstoffen und Energien in der Industrie. Stahl und Eisen 78, Nr. 15, 1958
- [21] Marcard, W.: Zusammenhänge zwischen Feuerraum, Feuerraumtemperatur, Verbrennungsvorgang und Wirkungsgrad. Die Wärme / Zeitschrift für Dampfkessel und Maschinenbetrieb, Jg. 53, Nr. 39, 1930
- [22] Michalowski, M.; Wessely, R.: Bewertung der komplexen Austauschbarkeit von Brenngasen in Hüttenwerken. Arch. Eisenhüttenwesens 54, Nr. 6, 1983
- [23] Reimann, D. O.: Entwicklung und Einsatz binärer Verfahrenskennzahlen (hx/y) zur quasikontinuierlichen Bestimmung der einer prozeßgesteuerten Feuerung zugeführten Abfallmengen und -qualitäten. Dissertation am Fachbereich 21 – Umwelttechnik der Technischen Universität Berlin, 1992
- [24] Reimann, D. O.: Ermittlung und Bedeutung von Kennzahlen zur Energie- und Anlagenutzung sowie zu Wirkungsgraden für die Abfallverbrennung. erschienen in: VDI-Wissensforum GmbH (Hrsg.): BAT-, energie-, preisorientierte Verfahrens-/Dioxin-/Rauchgasreinigungstechniken 2003 für Verbrennungs- und Feuerungsanlagen. Seminar-Nr. 435915, am 18.-19.09.2003 in München. VDI-Wissensforum GmbH, 2003
- [25] Richtlinien zur vergleichenden Brennstoffbewertung. Stahleisen M.B.H., Düsseldorf, 1969, S. 3-33.
- [26] RICHTLINIE 2008/98/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 19. November 2008
- [27] Scholz, R.; Beckmann, M.: Ersatzbrennstoffbewertung bei unterschiedlicher Prozessführung. in: Ersatzbrennstoffe 2, TK-Verlag, Neuruppin 2002, S. 73-90
- [28] 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
- [29] Verein Deutscher Ingenieure VDI (Hrsg.): Richtlinie VDI 4660: Ermittlung zielenergiebezogener Emissionen bei der Energieumwandlung. Verein Deutscher Ingenieure, Mai 2003
- [30] Verein Deutscher Ingenieure VDI (Hrsg.): Richtlinie VDI 4661: Energiekenngrößen – Definitionen – Begriffe – Methodik. Beuth-Verlag GmbH Berlin, September 2003
- [31] Verein Deutscher Ingenieure VDI (Hrsg.): Richtlinie VDI 3460 Blatt 2 Emissionsminderung – Energieumwandlung bei der thermischen Abfallbehandlung. August 2007.
- [32] Weiss, W.; Janz, J.: Kunststoffverwertung im Hochofen – Ein Beitrag zum ökologischen und ökonomischen Recycling von Altkunststoffen. VDI-Berichte 1288, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1996, pp. 123-138