

Kriterien zur Substitution von Regelbrennstoffen durch Ersatzbrennstoffe

Prof. Dr.-Ing. **M. Beckmann**, Weimar;

Prof. Dr.-Ing. **R. Scholz** VDI, Clausthal-Zellerfeld

1 Einleitung

Für den Einsatz von Regelbrennstoffen (einschließlich der fossilen Primärbrennstoffe) zur Energieumwandlung in Kraftwerksanlagen und insbesondere bei Hochtemperaturproduktionsverfahren sind eine Reihe von brennstofftechnischen Kriterien jeweils in Verbindung mit charakteristischen prozesstechnischen Merkmalen zur Beurteilung heranzuziehen. Grundsätzlich muss dies auch bei der Substitution von Regelbrennstoffen durch Ersatzbrennstoffe aus Abfällen beachtet werden. Darüber hinaus sind bei der Nutzung von Ersatzbrennstoffen weitere Gesichtspunkte, die insbesondere mit kumulierten Energie- und Schadstoffbilanzen zusammenhängen, zu berücksichtigen.

Brennstoffeigenschaften allein oder aber nur Schadstoffkonzentrationen reichen somit für die Beurteilung eines Ersatzbrennstoffes nicht aus.

In dem vorliegenden Beitrag soll in Verbindung mit der jeweiligen Prozessführung besonders auf die kalorischen Eigenschaften von Ersatzbrennstoffen eingegangen werden, da diese die Wärmeübertragungsbedingungen, die Strömungsverhältnisse und damit zusammenhängend die Temperaturverteilungen, den Guttransport und den spezifischen Energieaufwand der betrachteten Produktionsanlage maßgeblich beeinflussen.

Hierzu werden zunächst kurz einige wesentliche Gesichtspunkte der Wärmeübertragung in Feuerungen und Industrieöfen erörtert. Wichtig für die Bewertung einer Brennstoffsubstitution ist das sogenannte Energieaustauschverhältnis. Dieses Verhältnis drückt die Wertigkeit eines Ersatzbrennstoffes im Vergleich zu dem Regelbrennstoff aus und muss bei einer vergleichenden Bilanzierung entsprechend berücksichtigt werden. Weiter werden in dem Beitrag beispielhaft verschiedene Auswirkungen der Brennstoffsubstitution auf Ofentemperaturen, Abgasmassenströme usw. aus verfahrenstechnischer Sicht angesprochen. Zur Erläuterung des prinzipiellen Vorgehens und zur Verdeutlichung wichtiger Tendenzen durch wesentliche Einflussgrößen wird dabei eine vereinfachte, tragfähige Betrachtungsweise verwendet.

Bei dieser Betrachtung geht man von dem anfallenden Abfall insgesamt aus und bilanziert die Prozesse der Aufbereitung bzw. Herstellung der Ersatzbrennstoffe ebenso wie die Prozesse der Verwertung dieser Fraktion und der weiteren Behandlung der verbleibenden Restfraktionen. Diese Behandlung kann dann sowohl eine Verwertung als auch eine Entsorgung sein.

3 Brennstofftechnische Eigenschaften

Wie vorstehend erwähnt, lassen sich die brennstofftechnischen Eigenschaften grob unter chemischen, mechanischen, kalorischen und reaktionstechnischen Gesichtspunkten einordnen.

Bei den **chemischen Eigenschaften** unterscheidet man zunächst die nicht brennbare (Asche, Wasser) und brennbare Substanz des Brennstoffes. Diese Einteilung kann ohne weiteres auf Ersatzbrennstoffe übertragen werden. Die brennbare Substanz lässt sich, was für Vergleichsziele sinnvoll ist, weiter in Kunststoffe und in sonstige organische Bestandteile aufteilen. Weiter werden zu den chemischen Eigenschaften u.a. die Elementar- und Spurenzusammensetzungen, der Anteil von fixem Kohlenstoff und flüchtigen Bestandteilen sowie Ascheerweichungspunkte gezählt. Selbstverständlich können diese Eigenschaften auch bei der Beurteilung von Ersatzbrennstoffen herangezogen werden.

Je nach Einsatzfall sind hinsichtlich der Elementar- und Spurenzusammensetzung spezifische Anforderungen zu stellen. Aus der Sicht der Vermeidung von Schadstoffbelastungen ist es zunächst weniger wichtig, Schadstoffgehalte im Ersatzbrennstoff zu diskutieren und diese den Regelbrennstoffen gegenüberzustellen. Vielmehr ist die Frage mit Blick auf den Immissionsschutz interessant, in welchem Umfang Umweltauswirkungen von der jeweiligen Anlage bei Einsatz der Ersatzbrennstoffe im Vergleich zu dem Einsatz eines Regelbrennstoffes entstehen (Frachten). Diese Frage lässt sich jedoch nur im Zusammenhang mit der Bilanzierung der gesamten Verfahrenskette beantworten, worauf weiter unten noch näher eingegangen wird. Der Schadstoffgehalt des einzelnen Ersatzbrennstoffes im Vergleich zum Regelbrennstoff ist somit nur eines von vielen Kriterien, das allein nicht ausschlaggebend sein kann. Hierbei müssen je nach Anwendungsfall die verfahrenstechnisch spezifischen Gesichtspunkte berücksichtigt werden. Beispielsweise können bei dem Klinkerbrennprozess im Drehrohr in erheblich anderem Umfang Schadstoffe (Schwermetalle, Cl, S usw.) gebunden werden, als das bei einem Verbrennungsprozess in einer Schmelzkammerfeuerungsanlage im Kraftwerk der Fall ist. Bei letzterem wirkt sich ein erhöhter Chloreintrag direkt auf die Reisezeit der Anlage (Kesselkorrosion) aus. Bei dem Klinkerbrennprozess kann man bei erhöhtem Chloreintrag z.B. durch einen erhöhten Bypassstrom gegensteuern, was im Gegensatz zu dem vorgenannten Beispiel „nur“ mit Nachteilen im Betrieb nicht aber mit Anlagenschäden verbunden ist.

doch nicht nur im Vergleich zum Regelbrennstoff zu beurteilen, sondern müssen im Zusammenhang mit Frachtbilanzen der Emissionen (Luft-, Wasser- und Bodenpfade) der gesamten Verfahrenskette betrachtet werden.

Bei der Beurteilung der chemischen, mechanischen und reaktionskinetischen Eigenschaften ist man zunächst noch auf empirische Ergebnisse angewiesen [z.B. 2 bis 6].

Bei den kalorischen Eigenschaften können mit Hilfe vereinfachter, jedoch für die Praxis tragfähiger mathematischer Modelle die Wechselwirkungen der Haupteinflussgrößen hingegen bereits jetzt deutlich gemacht werden. Auf der Basis der Bilanzierung von Feuerungen und Industrieöfen können darüber hinaus auch Überlegungen hinsichtlich einer Prozessoptimierung oder aber auch zur Energierückgewinnung angeschlossen werden. Aus diesen Überlegungen folgt, dass die kalorischen Eigenschaften als Kriterium von entsprechend großer Bedeutung für den Einsatz von Ersatzbrennstoffen sind. Hierauf wird im folgenden kurz eingegangen.

4 Einfluss kalorischer Eigenschaften bei der Substitution

4.1 Bilanzierung von Feuerungen und Industrieöfen

Unter dem Begriff Industrieöfen sind alle mit fossilen Brennstoffen oder elektrisch beheizten Apparate zusammengefasst, in denen im industriellen Maßstab feste, flüssige oder gasförmige Stoffe einer thermischen Behandlung unterzogen werden. In dem hier gesteckten Rahmen stehen allerdings die fossil beheizten Industrieöfen im Vordergrund.

Mit den Feuerungen der Energieumwandlung haben Industrieöfen den Verbrennungsprozess gemeinsam. Im Unterschied zu den Industrieöfen, bei denen der Verbrennungsprozess auf das zu behandelnde Gut abzustimmen ist, erfolgt die Optimierung der Feuerungen z.B. bei der Erzeugung von Dampf in einem Kessel hauptsächlich im Hinblick auf die Energieausnutzung. Da die Wärmeerzeugung mit der Wärmeabgabe prinzipiell bei den Kesseln ähnlich wie bei den Industrieöfen ist, können die im folgenden am Beispiel der Stoffbehandlungsprozesse behandelten Gesichtspunkte der Bilanzierung, Wärmerückgewinnung und Brennstoffsubstitution ebenso auf die Prozesse der Energieumwandlung übertragen werden. Die Brennstoffsubstitution ist bei direkt befeuerten Industrieöfen immer mit der Frage der Produktverträglichkeit verbunden. Bei aschehaltigen Brennstoffen tritt dann auch ggf. eine entsprechende stoffliche Substitution mit auf [3, 6].

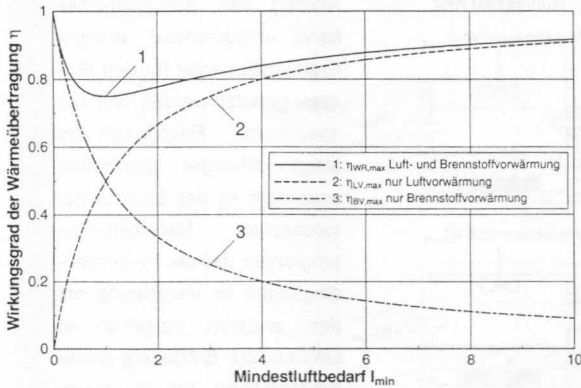


Bild 4-2. Maximale Wirkungsgrade für die Wärmerückgewinnung durch Luft- und /oder Brennstoffvorwärmung in Abhängigkeit vom Mindestluftbedarf des Brennstoffes [7].

$\vartheta_{L1} = \vartheta_{B1} = \vartheta_U$ der in Bild 4-2 dargestellte Zusammenhang.

Das Bild 4-2 zeigt die maximalen Wirkungsgrade $\eta_{LV,max}$ und $\eta_{BV,max}$ in Abhängigkeit von dem Mindestluftbedarf I_{min} . Eine deutliche Verbesserung von $\eta_{WR,max}$ durch eine Brennstoffvorwärmung ergibt sich nur bei Brennstoffen mit niedrigem Mindestluftbedarf und damit in der Regel nur bei heizwertschwachen Brennstoffen. Auf die Besonderheiten im Zusammenhang mit der Wärmerückgewinnung muss selbstverständlich geachtet werden, wenn ein heizwertreicher Primärbrennstoff durch z.B. schwachkalorige Ersatzbrennstoffe substituiert werden soll.

Auf die Substitution von Primärbrennstoffen durch Ersatzbrennstoffe mit deutlich unterschiedlichen Heizwerten soll im folgenden noch näher eingegangen werden, da sich hier ganz wesentliche Eingriffe in die Prozessführung ergeben können.

4.3 Einfluss der kalorischen Verbrennungstemperatur

Die kalorische Verbrennungstemperatur ist selbstverständlich sehr eng mit den kalorischen Brennstoffgrößen wie Heizwert, Mindestluftbedarf spezifischer Wärmekapazität usw. verbunden. In dem hier gesteckten Rahmen werden die Einflüsse dieser Größen auf die Substitution nur zusammengefasst dargestellt, eine ausführlichere Beschreibung ist bereits in ZEMENT-KALK-GIPS INTERNATIONAL, Heft 6 und 8 1999 [8], erschienen.

Es ist aus der Bilanz Gleichung (4.1) zusammen mit Bild 4-1 sofort ersichtlich, dass der Abgasverlust bei einem bestimmten Brennstoff um so größer ist, je höher die auf den Heizwert h_u bezogene Abgasmenge m_{IG} oder die Abgastemperatur ϑ_{G3} sind. Bei diesem

der Brennstoff bis auf $\vartheta_{B2} = \vartheta_{G2}$ vorgewärmt werden. Für den maximalen Wirkungsgrad für die Luftvorwärmung und die Brennstoffvorwärmung ergibt sich unter vereinfachter Annahme, dass die Wärmekapazitäten annähernd gleich sind, adiabate Bedingungen vorliegen und für den Grenzfall eines stöchiometrischen Anlagenbetriebes mit $\lambda = 1,0$ für

wobei in Gleichung (4.4) der Wärmeübertragungskoeffizient α_{ce} Konvektion und Strahlung beinhaltet und A_S die Gutoberfläche ist.

Bei Substitution des Primärbrennstoffes (PB) durch den Ersatzbrennstoff (EB) (Bild 4-3 II, links) besteht zunächst die Anforderung, dass die Guttemperatur ϑ_S und die Ofenleistung, d.h. der übertragene Wärmestrom \dot{Q} , unverändert bleiben sollen:

$$\dot{Q}_{PB} = \dot{Q}_{EB} \quad (4.5),$$

woraus sich unmittelbar:

$$\Delta \dot{H}_{G,PB} = \Delta \dot{H}_{G,EB} \quad (4.6)$$

ergibt.

Der Gasmassenstrom $\dot{m}_{G,PB}$ bzw. $\dot{m}_{G,EB}$ aus der Brennstoffumsetzung ist mit dem zugehörigen Brennstoffmassenstrom \dot{m}_{PB} bzw. \dot{m}_{EB} unter Vernachlässigung des festen Inertanteiles des Brennstoffes (Asche) über die Beziehungen der Verbrennungsrechnung verknüpft.

Es wird nun ein Energieaustauschverhältnis E eingeführt:

$$E = \frac{\dot{m}_{EB} \cdot h_{u,EB}}{\dot{m}_{PB} \cdot h_{u,PB}} \quad (4.7),$$

welches die Wertigkeit eines Ersatzbrennstoffes in Bezug auf den Primärbrennstoff aus energetischer Sicht ausdrückt. Daraus lassen sich weitere Größen, wie z.B. das Brennstoffmassenstromverhältnis und das Abgasmassenstromverhältnis, ableiten.

Die Verhältnisse der Brennstoff- und der Abgasmassenströme sind für die Betrachtung von anlagentechnischen Randbedingungen wie Brennstoffzufuhr, Strömungsverhältnisse im Ofenraum, Guttransport usw. wichtig. Damit ergibt sich oftmals auch die Begrenzung auf eine maximale Substitutionsrate (Austausch Primärbrennstoff durch Ersatzbrennstoff).

Für das Energieaustauschverhältnis erhält man mit den o.g. Gleichungen und den Beziehungen der Verbrennungsrechnung für \dot{m}_G in Abhängigkeit von \dot{m}_G , l_{min} und λ in einer ausführlicheren Schreibweise für ein Rührkessel-Element:

$$E_{RK} = \frac{(1 + \lambda_{PB} \cdot l_{min,PB}) \cdot \frac{c_{G,PB,kalG} \cdot (\vartheta_{kal,PB} - \vartheta_{G,PB})}{h_{u,PB}}}{(1 + \lambda_{EB} \cdot l_{min,EB}) \cdot \frac{c_{G,EB,kalG} \cdot (\vartheta_{kal,EB} - \vartheta_{G,EB})}{h_{u,EB}}} \quad (4.8).$$

In dem hier gesteckten Rahmen sei davon ausgegangen, dass die Wärmeübertragungsbedingungen ($\alpha_{ce} \cdot A_S$) durch die Substitution nicht beeinflusst werden (statische Betrachtung). Bei dieser ist:

4.4 Einfluss der Prozessführung (Beispiele)

Ein wesentliches Ziel einer mit dem Ersatzbrennstoffeinsatz verbundenen Optimierung besteht nun darin, durch entsprechende Anlagenschaltungen und Wärmerückgewinnung usw. ein Energieaustauschverhältnis für den Gesamtprozess möglichst klein zu machen. Im Fall eines Ersatzbrennstoffes mit $h_{u,EB} = 11 \text{ MJ/kg}$ werden Gastemperaturen $\vartheta_G > 1700 \text{ }^\circ\text{C}$ nur durch eine entsprechende Luftvorwärmung erreicht (Bild 4-4).

Würde man nun gedanklich einen Prozess, der zuvor mit Kohle und ohne Luftvorwärmung betrieben wurde mit einem zweiten Prozess, der nun mit einem Ersatzbrennstoff jedoch mit gleichzeitiger Luftvorwärmung betrieben wird vergleichen, so kann dabei durchaus ein Energieaustauschverhältnis kleiner eintreten. Damit soll betont werden, dass das Energieaustauschverhältnis keineswegs nur von den brennstofftechnischen, insbesondere

den kalorischen Eigenschaften abhängt, sondern wesentlich durch die Prozessführung und die Optimierung z.B. durch verbesserte Wärmerückgewinnung beeinflusst wird.

Eine weitere Maßnahme stellt die gestufte Zufuhr von Brennstoff in einem Industrieofen dar. Ein zunächst im Hinblick auf die Einstellung hoher Prozesstemperaturen, z.B. in einem Brennprozess, durch den Ersatzbrennstoff im Vergleich zum Primärbrennstoff in der ersten Stufe des Prozesses, erforderlicher Mehraufwand an Energie, ist damit nicht von vornherein „verloren“, sondern kann durch entsprechend verminderte Energiezufuhr in einer zweiten Stufe zum Teil kompensiert werden.

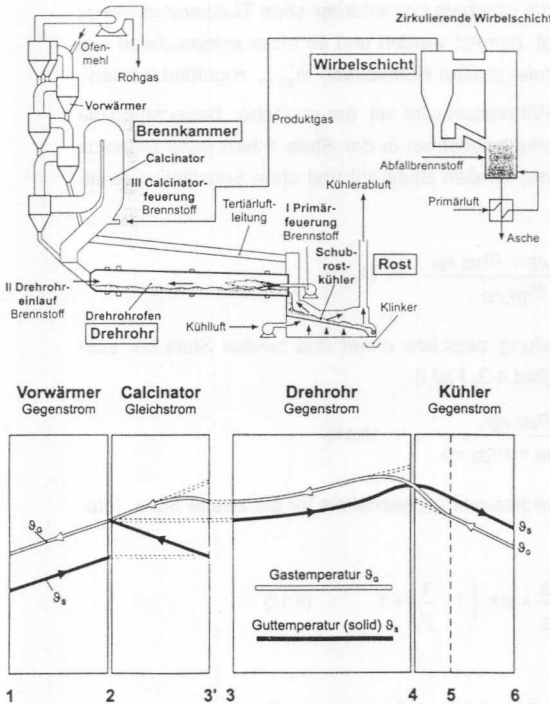


Bild 4-5. Schematische Darstellung des Zementprozesses in Kombination mit einer Wirbelschichtfeuerung einschließlich dem zugehörigen Temperaturverlauf.

Brennstoffverteilung y abhängig. Das Energieaustauschverhältnis für beide Rührkessel-Elemente ist:

$$E_{RK12,\vartheta} = (1 - y) \cdot E_{RK1,\vartheta} + y \cdot E_{RK2,\vartheta} \quad (4.13).$$

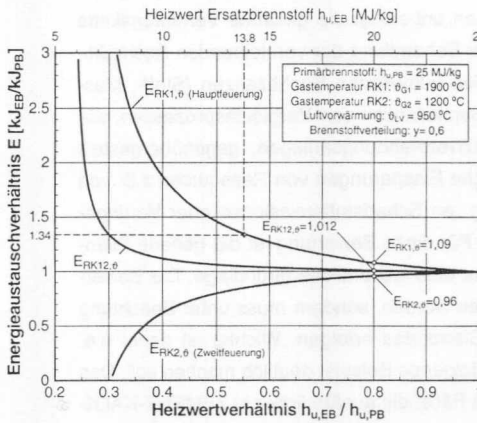


Bild 4-6. Energieaustauschverhältnis bei statischer Betrachtung $E_{RK,\vartheta}$ in Abhängigkeit von der Brennstoffsubstitution $h_{u,EB} / h_{u,PB}$ für eine Prozessführung mit zweistufiger Brennstoffzufuhr.

Für den bereits im vorangegangenen Beispiel betrachteten Fall der Substitution eines Primärbrennstoffes mit $h_u = 25$ MJ/kg, einer Bilanztemperatur $\vartheta_{G1} = 1900$ °C mit Luftvorwärmung auf $\vartheta_L = 950$ °C zeigt das Bild 4-6 das Energieaustauschverhältnis $E_{RK1,\vartheta}$ in Abhängigkeit von $h_{u,EB}$. Weiterhin ist für eine festliegende Bilanztemperatur $\vartheta_{G2} = 1200$ °C die Kurve für $E_{RK2,\vartheta}$ eingetragen, die aufgrund der Einsparung an Primärenergie im zweiten Rührkessel-Element bei dem hier vorliegenden Substitutionsfall Werte kleiner eins annimmt. $E_{RK12,\vartheta}$ ist dann

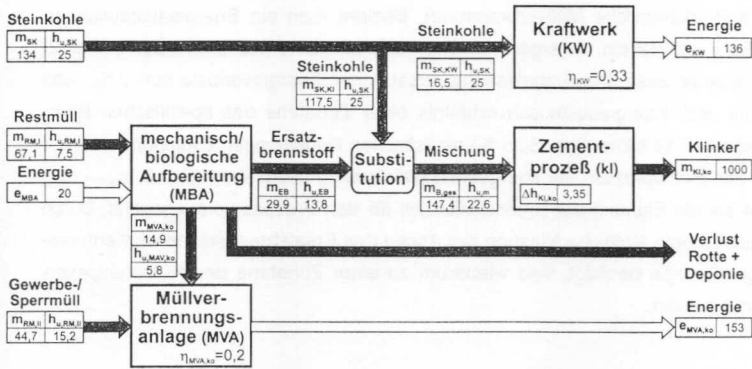
wieder größer eins, jedoch aufgrund der Möglichkeit der gestuften Brennstoffzufuhr deutlich niedriger als $E_{RK1,\vartheta}$.

Bei einer Einschätzung der genannten Kriterien ist wie eingangs erwähnt zu beachten, dass diese nicht unabhängig von der jeweiligen Aufgabe, d.h. vom verfahrenstechnischen Prozess, betrachtet werden dürfen. Im Zusammenhang mit einer Brennstoffsubstitution sind insbesondere auch Fragen zur Prozessoptimierung und zur Energierückgewinnung durch innerbetrieblichen und außerbetrieblichen Energieverbund unter den veränderten Randbedingungen des Ersatzbrennstoffes zu beantworten.

Brennstoffeigenschaften allein reichen somit für die Beurteilung eines Ersatzbrennstoffes nicht aus.

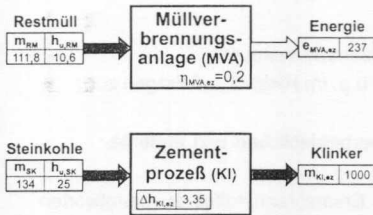
Koppelprozess (ko)

Bilanzgrenze



Einzelprozesse (ez)

Bilanzgrenze



Bezeichnung	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4
Parametervariationen				
E	1	1,012	1,012	1,012
[%] Zusatzenergie (Bypass usw.)	0	0	2	2
[%] Zusatzenergie (gesamt)	0	1,3	3,35	1,25
ξ _{AS,EB}	nein	nein	nein	ja
Massen [kg] im Koppelprozess				
m _{SK,kl}	117,5	117,6	119,9	117,7
m _{SK,KW}	16,5	16,4	14,1	16,3
m _{RM,kl}	67,1	73,1	74,6	73,1
m _{GM,kl}	44,7	48,7	49,7	48,8
m _{MVA,kl}	14,9	16,2	16,6	16,2
m _{EB,kl}	29,9	32,6	33,3	32,6
m _{SB,kl}	147,4	150,2	153,2	150,3
Massen [kg] im Koppel- und Einzelprozess				
m _{SK}	134			
m _{RM}	111,8	121,8	124,3	121,9
m _{kl}	1000			
Heizwerte und spez. Energieaufwand [MJ/kg] im Koppelprozess				
h _{u,RM,kl}	7,5			
h _{u,GM,kl}	15,2			
h _{u,MVA,kl}	5,8			
h _{u,EB}	13,8			
h _{u,SB}	13,8			
h _{u,kl}	22,6	22,6	22,6	22,6
Δh _{Kl,kl}	3,35	3,390	3,458	3,392
Spezifischer Energieaufwand [MJ/kg] im Einzelprozess				
Δh _{kl,kl}	3,35			
Heizwerte [MJ/kg] im Koppel- und Einzelprozess				
h _{u,SK}	25			
h _{u,RM}	10,6			

Bezeichnung	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4
Energien [MJ] und Bilanzierung				
e _{MBA}	20	22	23	22
e _{KW}	136	135	116	134
e _{MVA,kl}	153	167	170	167
e _{MVA,ez}	237	258	263	258
e _{kl}	269	280	263	279
z _{Nutz}	1,14	1,09	1	1,08
Δm _{SK}	1,28	0,88	0	0,84

Bild 5-1. Vereinfachte Darstellung einer Verfahrenskette mit Substitution von Primärbrennstoff und der zugehörigen Einzelprozesse (enthält nur die hier wesentlichen Stoff- und Energiepfade ohne Zusatzstoffe, Rohmaterial, Zusatzenergie usw.; Zahlenwerte sind Auszug einer detaillierten Massen- und Energiebilanz).

Es ist nun zweckmäßig, ein sogenanntes Nutzenergieverhältnis z_{Nutz} zu bilden. Das Verhältnis z_{Nutz} bezieht die Nettostromerzeugung des Koppelprozesses, $e_{ko} = e_{KW} + e_{MVA,ko} - e_{MBA}$, auf die Nettostromerzeugung der Einzelprozesse (hier nur MVA) $e_{MVA,ez}$. Im Fall 1

nicht nur im Vergleich zum Regelbrennstoff zu beurteilen, sondern müssen im Zusammenhang mit Frachtbilanzen der Emissionen (Luft-, Wasser- und Bodenpfade) der gesamten Verfahrenskette betrachtet werden.

Insgesamt ist man bei der Beurteilung der chemischen, mechanischen und reaktionskinetischen Eigenschaften zunächst noch auf empirische Ergebnisse angewiesen.

Einzig bei den kalorischen Eigenschaften können mit Hilfe vereinfachter, jedoch für die Praxis tragfähiger mathematischer Modelle die Wechselwirkungen der Haupteinflussgrößen deutlich gemacht werden. Auf der Basis der Bilanzierung von Feuerungen und Industrieöfen können dann auch Überlegungen hinsichtlich einer Prozessoptimierung oder aber auch zur Energierückgewinnung angeschlossen werden. Aus diesen Überlegungen folgt, dass die kalorischen Eigenschaften von vergleichsweise großer Bedeutung für den Einsatz von Ersatzbrennstoffen sind.

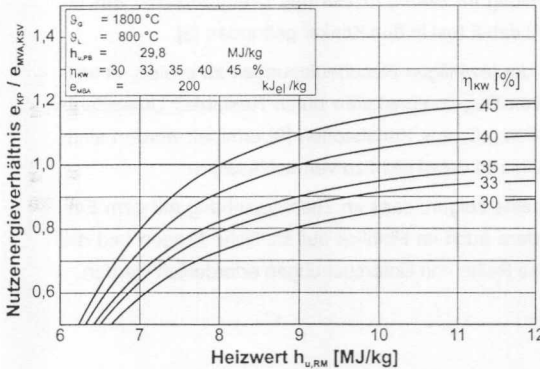


Bild 6-1. Elektrisches Nutzenenergieverhältnis in Abhängigkeit vom Abfallheizwert für verschiedene Kraftwerkswirkungsgrade [10].

Wie erwähnt sollen die Beispiele der Bilanzierung der Verfahrensketten deutlich machen, welcher Einfluss durch die speziellen Randbedingungen und die Auswirkungen einer Brennstoffsubstitution gegeben sind. Das Bild 6-1 zeigt das elektrische Nutzenenergieverhältnis für ausgewählte Randbedingungen in Abhängigkeit des Abfallheizwertes vor der Behandlung [10]. Das Bild zeigt beispielhaft, dass das Verhältnis aus der Energie des

Koppelprozesses und der Einzelprozesse Werte größer und kleiner eins annehmen kann, d.h., dass durch die Brennstoffsubstitution sowohl Ressourcen geschont ($z_{Nutz} > 1$) als auch zusätzlich verbraucht ($z_{Nutz} < 1$) werden können. Wichtige Einflussgrößen auf dieses Verhältnis sind u.a. der Anfangsheizwert des Abfalls, der Wirkungsgrad im Kraftwerk, die Wirkungsgrade der MVA in Abhängigkeit des zugeführten Restmüllheizwertes (für $h_{u,RM,ko} \leq h_{u,RM,eZ}$ gilt i.d.R. $\eta_{MVA,ko} \leq \eta_{MVA,eZ}$), ggf. die Auskopplung von Fernwärme, die Stoffstromaufteilung und der Aufwand in der MBA, die Prozessparameter der energetischen Nutzung z.B. im Klinkerbrennprozess usw. Ebenso wie die energetische Nutzung durch die Randbedingungen des Einzelfalls beeinflusst wird, ist das Emissionsverhalten durch den technischen Anlagenstandard des Einzelfalls bestimmt [z.B. 11].

- [9] Heyde, M.; Kremer, M.: Verwertung von Kunststoffabfällen aus Verkaufsverpackungen in der Zementindustrie. Fraunhofer-Institut Lebensmitteltechnologie und Verpackung, Freising, 1997.
- [10] Schulenburg, F.; Scholz, R.: Energetische Bilanzierung von Verfahrenslinien aus mechanisch-biologischer und nachgeschalteter thermischer Abfallbehandlung. Zentrum für Abfallwirtschaft Heft 13, Stoffstromspezifische Abfallbehandlung im Hinblick auf thermische Verfahren. Braunschweig, 1998, S.15 - 52. ISSN 0934-9243.
- [11] BMBF-Abschlußbericht Förderkennzeichen 1471114: Möglichkeiten der Kombination von mechanisch-biologischer und thermischer Behandlung von Restabfällen, im Druck.

8 Symbolverzeichnis

Symbole

<i>A</i>	Fläche	<i>EB</i>	Ersatzbrennstoff
<i>c</i>	spezifische Wärmekapazität (in Verbindung mit Temperaturdifferenzen immer mittlere -)	<i>G</i>	Brenngas/Abgas
<i>e</i>	Energie	<i>kal</i>	kalorisch
<i>E</i>	Energieaustauschverhältnis	<i>Kl</i>	Klinker
<i>h</i>	spezifische Enthalpie	<i>ko</i>	Koppelprozess
<i>H</i>	Enthalpie	<i>KW</i>	Kraftwerk
<i>l</i>	spezifischer Luftbedarf	<i>LV</i>	Luftvorwärmung
<i>m</i>	Masse	<i>max</i>	maximal
<i>Q</i>	Wärme	<i>min</i>	mindest-
<i>x</i>	Masse Brennstoff Stufe 2 bezogen auf Stufe 1	<i>MBA</i>	Mechanisch-biologische Aufbereitung
<i>y</i>	Masse Brennstoff Stufe 2 bezogen auf Gesamt	<i>MVA</i>	Müllverbrennungsanlage
<i>z</i>	Energieverhältnis	<i>Nutz</i>	Nutzen
α	Wärmeübergangskoeffizient	<i>PB</i>	Primärbrennstoff
Δ	Differenz	<i>R</i>	Reaktion
η	Wirkungsgrad	<i>RK</i>	Rührkessel
ϑ	Temperatur	<i>RM</i>	Restmüll
λ	Stöchiometrieverhältnis, Luftzahl	<i>S</i>	Solid
ξ	Konzentration, Feststoff	<i>SK</i>	Steinkohle
<i>St</i>	Stanton-Zahl	<i>th</i>	theoretisch
		<i>u</i>	unter (Heizwert)
		<i>U</i>	Umgebung
		<i>V</i>	Verlust
		<i>WR</i>	Wärmerückgewinnung
		<i>1,2</i>	Stufe 1, Stufe 2
		<i>I</i>	Restmüll I (Restsiedlungsabfall)
		<i>II</i>	Restmüll II (Gewerbeabfall, Sperrmüll)
		α	Konvektion
		ε	Strahlung
		ϑ	konstante Gastemperatur (statische Betrachtung)

Indizes (hochgestellt)

- Strom
- Primärbrennstoff im RK 2 im Fall
Ersatzbrennstoff im RK1 (Fall II in Bild 4-3)

Indizes (tielgestellt)

- A* Asche
- B* Brennstoff
- BV* Brennstoffvorwärmung
- ez* Einzelprozess