

## Energetische Bewertung von Ersatzbrennstoffen

Prof. Dr.-Ing. M. Beckmann, Bauhaus-Universität Weimar

### 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 Wärmetübertragung 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.

## 2 Beurteilungskriterien

Wie bereits einleitend erwähnt, müssen für die Beurteilung von Ersatzbrennstoffen zunächst brennstofftechnische Eigenschaften untersucht werden. Aus brennstofftechnischer Sicht ist ein Brennstoff im wesentlichen durch die

- chemischen,
- mechanischen,
- kalorischen und
- reaktionstechnischen Eigenschaften

charakterisiert [z.B.1]. Ausgehend von diesen Eigenschaften ergibt sich dann eine entsprechende Einteilung z.B. von Brenngasen, Heizölen und Kohlen. Die nähere Untergliederung dieser Eigenschaften soll im folgenden am Beispiel fester Brennstoffe, zu denen auch Ersatzbrennstoffe z.B. aus Siedlungsabfall gehören, verdeutlicht werden.

Bei einer Einschätzung der Ersatzbrennstoffe ist darüber hinaus zu beachten, dass diese nicht unabhängig von dem jeweiligen Einsatz, 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.

Weiter müssen im Sinne der Gesamtbetrachtung auch

- die Verfahrensketten mit kumulativen Stoff-, Massen- und Energiebilanzen

untersucht werden (Bild 2-1).

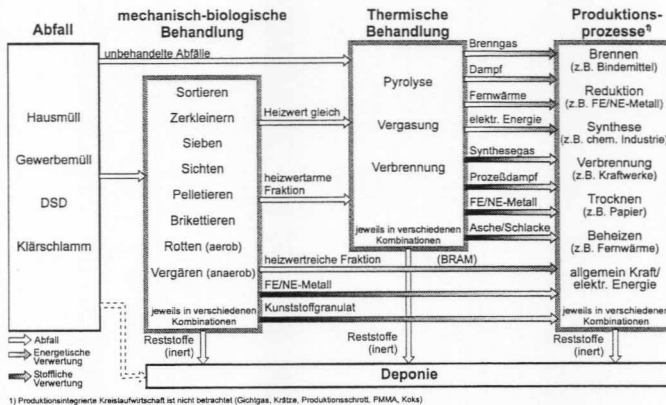


Bild 2-1. Grundoperationen der Abfallbehandlung-Verfahrensketten (Beispiele).

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.

Zu den brennstofftechnischen Eigenschaften sei an dieser Stelle zusammenfassend betont, dass man bei den chemischen Eigenschaften einzelne Kriterien aus anlagenbezogener Sicht zunächst formulieren kann. Die Schadstoffgehalte im Ersatzbrennstoff sind jedoch 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.

### 3 Kalorische Eigenschaften

#### 3.1 Allgemeines

Wie einleitend erwähnt, liegt der Schwerpunkt dieses Beitrages auf den kalorischen Eigenschaften. Eine ausführlichere Beschreibung zu den weiteren brennstofftechnischen Eigenschaften ist z.B. in [8] enthalten.

Zu den **kalorischen Eigenschaften** eines Brennstoffes zählen u.a. Heiz- und Brennwert, spezifischer Mindestluftbedarf, spezifische Mindestabgasmenge, adiabate Verbrennungstemperatur, Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit usw. können die für Regelbrennstoffe üblichen Angaben auf Ersatzbrennstoffe ebenfalls übertragen werden. Auf die Auswirkungen von z.B. verschiedenen Heizwerten, Mindestluftbedarf usw. von Ersatzbrennstoffen und Regelbrennstoff wird weiter unten noch ausführlich eingegangen, da diese für die Brennstoffsubstitution von sehr großer Bedeutung sind.

## 3.2 Einfluss kalorischer Eigenschaften bei der Substitution

### 3.2.1 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.

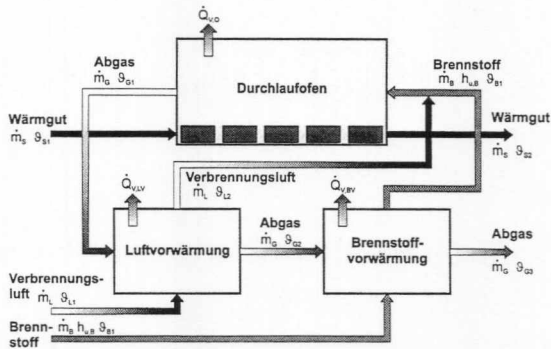


Bild 3-1. Schematische Darstellung eines Durchlaufofens mit Luft- und Brennstoffvorwärmung.

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].

### 3.2.2 Einfluss des Mindestluftbedarfes

Industrieöfen finden in nahezu allen bedeutenden Zweigen der Grundstoffindustrie Anwendung. Beispiele sind das Brennen von Klinkern im Drehrohrofen in der Zementindustrie, das Brennen von Kalkstein im Schachtofen, das Brennen von Baukeramik in Tunnelöfen, das Erzeugen von Roheisen im Hochofenprozess, das Schmelzen von Schrott im Kupolofen usw.

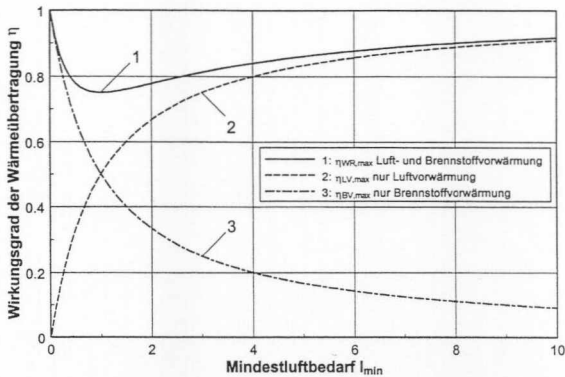


Bild 3-2. Maximale Wirkungsgrade für die Wärmerückgewinnung durch Luft- und /oder Brennstoffvorwärmung in Abhängigkeit vom Mindestluftbedarf des Brennstoffes [7].

Die Grundlage für die wärmetechnische Beurteilung von Industrieöfen sind bekanntlich Energiebilanzen, sowohl für Anlagenteile als auch für die Gesamtanlage (Vorwärm-, Brenn- und Kühlprozesse usw.). Das Bild 3-1 zeigt hierzu entsprechend vereinfacht ein Beispiel mit einer Luft und Brennstoffvorwärmung und einem kontinuierlichen Durchlaufprozess mit einem chemischen oder physikalischen Umwandlungsvorgang im Gut (Brennen von Kalk, Schmelzen von Metallen usw.).

Für das Beispiel in Bild 3-1 ergibt sich die Gesamtbilanz:

$$\dot{m}_B \cdot h_u = \dot{m}_S \cdot (\Delta h_{R,S} + c_{S2U} \cdot (g_{S2} - g_U)) + \dot{m}_G \cdot c_{G3U} \cdot (g_{G3} - g_U) + \sum \dot{Q}_V \quad (3.1).$$

In dem hier gewählten allgemeinen Fall wird aus dem heißen Abgas über einen Rekuperator Wärme zur Vorwärmung an die Verbrennungsluft und über einen in Reihe geschalteten zweiten Rekuperator zur Vorwärmung des Brennstoffes übertragen. Insbesondere im Zusammenhang mit der Brennstoffsubstitution ist die Frage zu stellen, inwieweit eine Luft- und/oder Brennstoffvorwärmung sinnvoll ist. Die für die Bilanzierung benötigten zu- und abgeführten Massenströme an Luft, Brennstoff und Gas ( $\dot{m}_L$ ,  $\dot{m}_B$ ,  $\dot{m}_G$ ) sind mit dem spezifischen Min-

dehluftbedarf des Brennstoffes  $l_{min}$  über die Verbrennungsrechnung miteinander verknüpft. Die Wärmekapazitätsstromverhältnisse beider Rekuperatoren sind kleiner eins. Somit kann bei einer Gegenstromschaltung die Luft maximal bis auf  $\vartheta_{Lz} = \vartheta_{G1}$  und der Brennstoff bis auf  $\vartheta_{Bz} = \vartheta_{G2}$  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  $\vartheta_{L1} = \vartheta_{B1} = \vartheta_U$  der in Bild 3-2 dargestellte Zusammenhang.

Das Bild 3-2 zeigt die maximalen Wirkungsgrade  $\eta_{LV,max}$  und  $\eta_{BV,max}$  in Abhängigkeit von dem Mindestluftbedarf  $l_{min}$ . 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.

### 3.2.3 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] und in VDI-Berichte Nr. 1540 [9] erschienen.

Es ist aus der Bilanz Gleichung (3.1) zusammen mit Bild 3-1 sofort ersichtlich, dass der Abgasverlust bei einem bestimmten Brennstoff um so größer ist, je höher die auf den Heizwert  $h_u$  bezogene Abgasmenge  $\dot{m}_G$  oder die Abgastemperatur  $\vartheta_{G3}$  sind. Bei diesem Anstieg des Abgasverlustes kann entsprechend weniger Brennstoffenergie für den Prozess genutzt werden und der spezifische Energieaufwand steigt.

Weniger unmittelbar ersichtlich ist der Einfluss der kalorischen Verbrennungstemperatur auf die Prozessbedingungen in Verbindung mit den anderen vorgenannten Größen. Zur Erörterung dieser Fragestellung sei daher folgende Überlegung angestellt:

Bei einem mit fossilen Brennstoffen betriebenen Ofenprozess wird Wärme von den Verbrennungsgasen an das zu behandelnde Gut übertragen (adiabate Betrachtung):

$$\Delta \dot{H}_G = \dot{Q}_{RK} \quad (3.2)$$

Je nach kalorischer Verbrennungstemperatur  $\vartheta_{kal}$ , Guttemperatur  $\vartheta_S$  und Wärmeübertragungsverhältnissen (Konvektion, Strahlung) stellt sich im Ofen eine Gastemperatur (Bilanztemperatur)  $\vartheta_G$  ein:

$$\dot{Q}_{RK} = \alpha_{\alpha\alpha} \cdot A_S \cdot (\vartheta_G - \vartheta_S) \quad (3.3),$$

(mit  $\alpha_{\alpha\alpha}$ : Wärmeübertragungskoeffizient Konvektion und Strahlung,  $A_S$ : Gutoberfläche).

Die Temperaturdifferenz aus der kalorischen Temperatur und der Bilanztemperatur stellt gewissermaßen eine Potenzialdifferenz dar. Mit dem Gasmassenstrom und der spezifischen Wärmekapazität ergibt sich der für den Ofenprozess erforderliche Energieaufwand:

$$\Delta \dot{H}_G = \dot{m}_G \cdot c_{G,kalG} \cdot (\vartheta_{kal} - \vartheta_G) \quad (3.4)$$

Bei Substitution des Primärbrennstoffes (PB) durch den Ersatzbrennstoff (EB) besteht u.a. die Anforderung, dass die Guttemperatur  $\vartheta_S$  und die Ofenleistung, d.h. der übertragene Wärmestrom  $\dot{Q}$ , unverändert bleiben sollen. Eine niedrigere kalorische Verbrennungstemperatur erfordert entsprechend der v.g. Überlegungen einen höheren Gasmassenstrom.

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. Je näher die kalorische Verbrennungstemperatur  $\vartheta_{kal}$  eines Ersatzbrennstoffes sich an die zu erreichende Guttemperatur  $\vartheta_G$  annähert, desto höher muss der Brennstoffmassenstrom  $\dot{m}_{EB}$  werden.

Es wird nun ein Energieaustauschverhältnis  $E$  eingeführt:

$$E = \frac{\dot{m}_{EB} \cdot h_{u,EB}}{\dot{m}_{PB} \cdot h_{u,PB}} \quad (3.5),$$

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).

Mit den in [8] näher erörterten Modellannahmen und zugehörigen Gleichungen lassen sich die in Bild 3-3 beispielhaft dargestellten Energieaustauschverhältnisse  $E_{RK, \vartheta}$  ermitteln.

Das Bild 3-3 zeigt  $E_{RK,\vartheta}$  für den Ersatz eines Primärbrennstoffes mit  $h_{u,PB} = 25$  MJ/kg durch Ersatzbrennstoffe mit  $h_{u,EB} = 11$  MJ/kg,  $h_{u,EB} = 15$  MJ/kg,  $h_{u,EB} = 20$  MJ/kg,  $h_{u,EB} = 30$  MJ/kg,  $h_{u,EB} = 35$  MJ/kg und  $h_{u,EB} = 40$  MJ/kg in Abhängigkeit von der Gastemperatur  $\vartheta_G$  für verschiedene Substitutionsfälle.

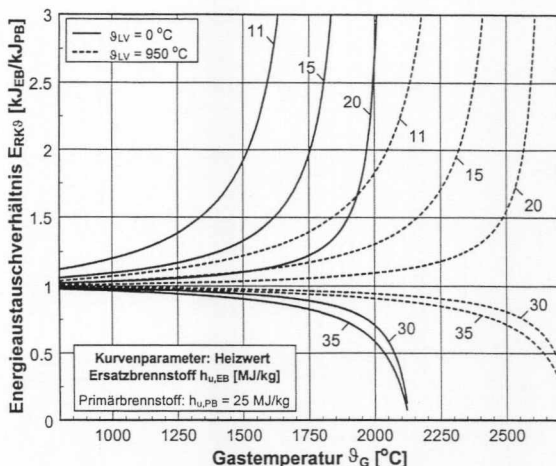


Bild 3-3. Energieaustauschverhältnis bei statischer Betrachtung  $E_{RK,\vartheta}$

Das Energieaustauschverhältnis ist um so größer, je höher die zu erreichende Bilanztemperatur und je niedriger der Heizwert des Ersatzbrennstoffes im Vergleich zum Primärbrennstoff sind. Für den Fall, dass der Heizwert des Ersatzbrennstoffes größer als der des Primärbrennstoffes ist, nimmt das Energieaustauschverhältnis umgekehrt Werte kleiner eins an. Das betrifft beispielsweise die Substitution von Steinkohle durch hochkalorige Kunststoffabfälle beim Klinkerbrennprozess in der Primärfeuerung. Vergleicht man die Energieaustauschverhältnisse in Bild 3-3 für einen bestimmten Ersatzbrennstoff mit und ohne Luftvorwärmung, so wird weiter die Bedeutung der Wärmerückgewinnung (z.B. Wärmerückgewinnung aus dem Gut (Rostkühler Klinkerbrennprozess)) deutlich.

### 3.2.4 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  $h_{u,EB} = 11$  MJ/kg werden Gastemperaturen  $\vartheta_G > 1700^\circ\text{C}$  nur durch eine entsprechende Luftvorwärmung erreicht (Bild 3-3).



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 eins 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.

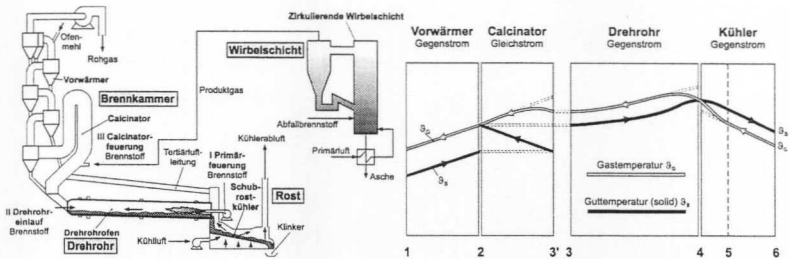


Bild 3-4. Schematische Darstellung des Zementprozesses in Kombination mit einer Wirbelschichtfeuerung einschließlich dem zugehörigen Temperaturverlauf.

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 (z.B. Klinkerbrennprozess Bild 3-4), wie im folgenden Beispiel gezeigt wird.

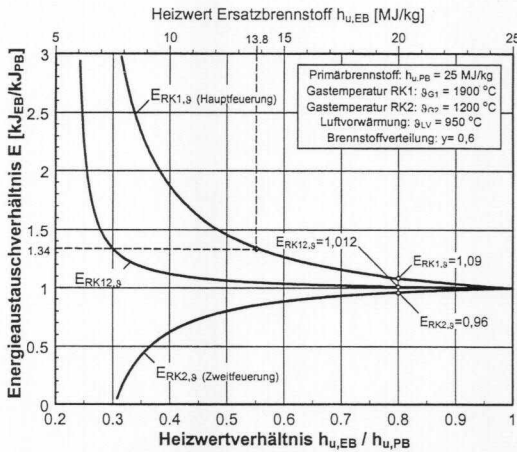


Bild 3-5. Energieaustauschverhältnis bei statischer Betrachtung  $E_{RK,j}$  in Abhängigkeit von der Brennstoffsubstitution  $h_{u,EB} / h_{u,PB}$  für eine Prozessführung mit zweistufiger Brennstoffzufuhr.

Für den 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 3-5 das Energieaustauschverhältnis  $E_{RK1,j}$  für die erste Stufe in Abhängigkeit von  $h_{u,EB}$ . Weiterhin ist für eine festliegende Bilanztemperatur  $\vartheta_{G2} = 1200$  °C die Kurve für  $E_{RK2,j}$  in der zweiten Stufe eingetragen, die aufgrund der Einsparung an Primärenergie im zweiten Rührkessel-Element bei dem hier vorliegenden Substitutionsfall Werte kleiner eins annimmt.  $E_{RK12,j}$  ist dann wieder größer eins, jedoch aufgrund der Möglichkeit der gestuften Brennstoffzufuhr deutlich niedriger als  $E_{RK1,j}$ .

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.

#### 4 Bilanzierung von Verfahrensketten

Betrachtet man einen Energieumwandlungs- oder Produktionsprozess, bei dem ein Regelbrennstoff durch einen Ersatzbrennstoff aus Abfall ersetzt wird, so ist wie eingangs erwähnt, zur Beurteilung der Umweltauswirkungen unbedingt die gesamte Verfahrenskette der Herstellung des Ersatzbrennstoffes und der Behandlung der verbleibenden Restfraktionen zu bilanzieren. Die sich dabei ergebenden kumulierten Sachbilanzen (Stoff-, Massen- und Energiebilanzen) können dann den Sachbilanzen von Vergleichsprozessen, wie z.B. der thermischen Abfallbehandlung in Müllverbrennungsanlagen, gegenübergestellt werden. Erst danach lässt sich beurteilen, welche Einsparungen von Ressourcen z.B. von fossilen Brennstoffen oder welche Vermeidung an Schadstoffemissionen oder Verringerung des  $\text{CO}_2$ -Ausstoßes usw. gegeben sind. Für diese Bewertung ist die genaue Bilanzierung der Einzelprozesse der Verfahrenskette eine wesentliche Grundlage. Die Bewertung kann deshalb nicht pauschal vorgenommen werden, sondern muss unter Beachtung der speziellen Randbedingungen z.B. eines Standortes erfolgen. Wichtig ist dabei u.a. auch das Energieaustauschverhältnis, wie das folgende Beispiel deutlich machen soll. Das [Bild 4-1](#) zeigt schematisch für vier verschiedene Fälle, die ausführlicher in ZEMENT-KALK-GIPS INTERNATIONAL, Heft 6 und 8 1999 [8], erläutert sind, die jeweilige Verfahrenskette aus den Bausteinen:

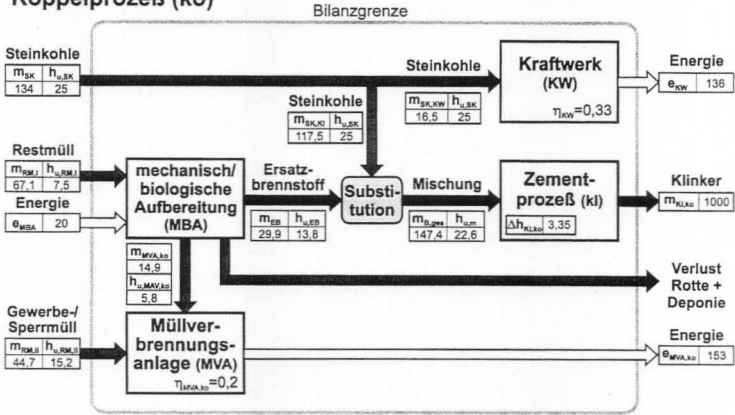
- mechanisch-biologische Aufbereitung (MBA) von Restsiedlungsabfall,
- thermische Behandlung (MVA),
- Zementklinkerbrennprozess und
- Kraftwerk

als Koppelprozess. Dem gegenüber gestellt ist die herkömmliche Verfahrensweise, dass Zementprozess und Müllverbrennung unabhängig voneinander getrennte Prozesse darstellen (hier als Einzelprozesse bezeichnet).

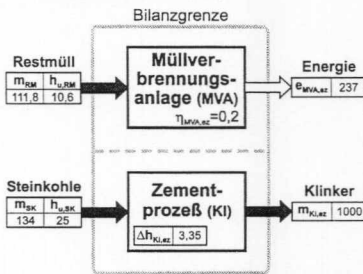
Als Basis ist hier die Herstellung von  $m_{\text{Kl}} = 1000$  kg Klinker gewählt. Die vier Fälle unterscheiden sich in der Bilanzierung der Brennstoffsubstitution. Die zugehörigen Werte sind in der Tabelle in [Bild 4-1](#) eingetragen. Zum besseren Vergleich enthält das Schema die Werte für den Fall 1. Die vier Fälle können grob wie folgt charakterisiert werden:

- Fall 1: keine Berücksichtigung des Energieaustauschverhältnisses und der Asche aus den Brennstoffen, ohne zusätzliche Verluste,  $E_{\text{RK}12} = 1,0$ ,
- Fall 2: wie Fall 1, jedoch mit Berücksichtigung des Energieaustauschverhältnisses  $E_{\text{RK}12} = 1,012$  ([Bild 3-5](#)),
- Fall 3: wie Fall 2, jedoch mit zusätzlichen Verlusten (Bypass, 2% Wärmeverlust),
- Fall 4: zusätzlich zu Fall 3 mit Berücksichtigung der Asche (Ersatzbrennstoff:  $\xi_{\text{A,EB}} = 0,27$ , Steinkohle:  $\xi_{\text{A,SK}} = 0,05$ ).

## Koppelprozeß (ko)



## Einzelprozesse (ez)



Bezeichnung	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4
<b>Energien [MJ] und Bilanzierung</b>				
$e_{MBA}$	20	22	23	22
$e_{KW}$	136	135	116	134
$e_{MVA,ki}$	153	167	170	167
$e_{MVA}$	237	258	263	258
$e_{ki}$	269	280	263	279
$Z_{Koppel}$	1,14	1,09	1	1,08
$\Delta m_{SK}$	1,28	0,88	0	0,84

Bezeichnung	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4
<b>Parametervariationen</b>				
E	1	1,012	1,012	1,012
[%] Zusatzenergie (Bypass usw.)	0	0	2	2
[%] Zusatzenergie (gesamt)	0	1,3	3,35	1,25
$\xi_{AS}$	nein	nein	nein	ja
<b>Massen [kg] im Koppelprozeß</b>				
$m_{MVA}$	117,5	117,6	119,9	117,7
$m_{KW}$	16,5	16,4	14,1	16,3
$m_{RM}$	67,1	73,1	74,6	73,1
$m_{G/S}$	44,7	48,7	49,7	48,8
$m_{MVA,ki}$	14,9	16,2	16,6	16,2
$m_{EB}$	29,9	32,6	33,3	32,6
$m_{SB}$	147,4	150,2	153,2	150,3
<b>Massen [kg] im Koppel- und Einzelprozeß</b>				
$m_{SK}$	134			
$m_{RM}$	111,8	121,8	124,3	121,9
$m_{G/S}$	1000			
<b>Heizwerte und spez. Energieaufwand [MJ/kg] im Koppelprozeß</b>				
$h_{u,ki}$	7,5			
$h_{u,MVA}$	15,2			
$h_{u,MVA,ki}$	5,8			
$h_{u,EB}$	13,8			
$h_{u,SB}$	22,6	22,6	22,6	22,6
$\Delta h_{Kli,ki}$	3,35	3,390	3,458	3,392
<b>Spezifischer Energieaufwand [MJ/kg] im Einzelprozeß</b>				
$\Delta h_{Kli,ki}$	3,35			
<b>Heizwerte [MJ/kg] im Koppel- und Einzelprozeß</b>				
$h_{u,SK}$	25			
$h_{u,RM}$	10,6			

Bild 4-1. 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  $z_{\text{Nutz}}$  zu bilden. Das Verhältnis  $z_{\text{Nutz}}$  bezieht die Nettostromerzeugung des Koppelprozesses,  $e_{\text{ko}} = e_{\text{KW}} + e_{\text{MVA,ko}} - e_{\text{MBA}}$ , auf die Nettostromerzeugung der Einzelprozesse (hier nur MVA)  $e_{\text{MVA,ez}}$ . Im Fall 1 einer Brennstoffsubstitution im Klinkerbrennprozess ohne Verluste, erhält man eine ca. 14 % bessere Energienutzung ( $z_{\text{Nutz}} = 1,14$ ) durch den Koppelprozess gegenüber dem Einzelprozess (herkömmliche Müllverbrennung). Bezieht man ein Energieaustauschverhältnis von  $E_{\text{RK12}} = 1,012$  ein, so ergibt sich nur noch eine 8 % bessere Nutzung (Fall 2) durch den Koppelprozess. Bei Einbeziehung zusätzlicher Energieverluste von 2 %, was zusammen mit dem Energieaustauschverhältnis einer Zunahme des spezifischen Energieaufwandes von  $112 \text{ kJ/kg}_{\text{Kl}}$  (ca. 3,35 %) realistischen Bedingungen entspricht, sind der Koppel- und der Einzelprozess als energetisch gleichwertig anzusehen (Fall 3,  $z_{\text{Nutz}}=1,0$ ). In dem Fall 4 sei die Eignung der Brennstoffasche für den Prozess vorausgesetzt. Durch die nun berücksichtigte stoffliche Nutzung der Asche des Ersatzbrennstoffes wird entsprechend weniger Energie benötigt, was wiederum zu einer Zunahme des Nutzenergieverhältnisses um 8 % führt.

## 5 Zusammenfassung

Die Kriterien für den Einsatz von Ersatzbrennstoffen zur Substitution von Regelbrennstoffen können mit den v.g. Ausführungen wie folgt zusammengefasst werden. Für die Beurteilung von Ersatzbrennstoffen sind:

- brennstofftechnische Eigenschaften im Zusammenhang mit
- verfahrenstechnischen Randbedingungen u.a. im Hinblick auf Fragen zur
  - ◆ Prozessoptimierung und
  - ◆ zur Energierückgewinnung durch innerbetrieblichen und außerbetrieblichen Energieverbund

auch unter den veränderten Randbedingungen des Ersatzbrennstoffes zu beantworten sowie darüber hinaus im Sinne der Gesamtbetrachtung auch

- die Verfahrensketten mit kumulativen Stoff-, Massen- und Energiebilanzen zu bewerten.

Bei den brennstofftechnischen Eigenschaften lässt sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt feststellen, dass man bei den chemischen Eigenschaften einzelne Kriterien aus anlagenbezogener Sicht zunächst formulieren kann. Hier spielen anlagentechnische (Korrosion, Wirkungsgrad usw.) und stoffliche Überlegungen (Einbindung in die Klinkerphase usw.) eine Rolle. Beim Einsatz von Ersatzbrennstoffen darf es zu keiner nachteiligen Veränderung der Emissionssituation kommen. Um dem Argument des „Auffüllens“ von Grenzwerten zu begegnen bedarf es bei der Anwendung der Mischungsregel der Zugrundelegung von Messwerten einer sogenannte Nullmessung mit 100 % Regelbrennstoff. Weiter ist die Verteilung der Schadstoffe in den Pfaden Abgas, Schlacke, Abwasser und Abgasreinigungsrückstände zu betrachten. Hierzu sind noch eine Reihe von Untersuchungen in Pilotversuchen und Praxistests erforderlich. Die Schadstoffgehalte im Ersatzbrennstoff sind 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.

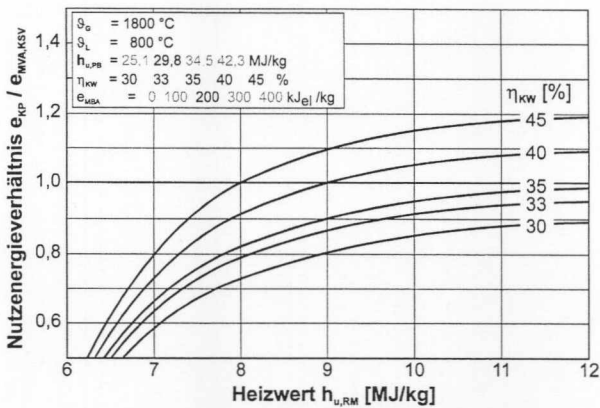


Bild 5-1. Elektrisches Nutzenenergieverhältnis in Abhängigkeit vom Abfallheizwert für verschiedene Kraftwerkswirkungsgrade [10].

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 5-1 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].

Vor dem hier geschilderten Hintergrund sei daher deutlich betont, das aus technischer Sicht die Anerkennung der Verwertung nicht davon abhängt, in welchem Teilprozess der Verfahrenskette Schadstoffe inertisiert, Energie oder Stoffe substituiert werden. Der Einsatz mechanisch-biologisch vorbehandelter Fraktionen mit vergleichsweise geringen Schadstoffkonzentrationen als Ersatzbrennstoffe ist vom Konzept her zunächst völlig gleichwertig mit dem Einsatz des unbehandelten Abfalls in einer MVA. In dem ersten Fall werden ein großer Teil der Schadstoffe vor dem Verbrennungsprozess, in dem zweiten Fall nach dem Verbrennungsprozess dem Abfall entzogen. Welcher Gesamtwirkungsgrad und welche Ressourcenschonung jeweils damit verbunden sind, lässt sich anhand des Konzeptes allein noch nicht beantworten. Auch durch eine thermische Vorbehandlung kann ein Ersatzbrennstoff bereitgestellt werden. Im Zementwerk Rüdersdorf wird z.B. in einer Vergasungsstufe ein Schwachgas erzeugt, das sich sehr gut als Ersatzbrennstoff in der Calcinatorfeuerung eignet. Darüber hinaus erfolgt bei diesem Beispiel eine stoffliche Verwertung der Asche aus der Vergasung im Brennprozess des Drehrohrofens. Ein erheblicher Anteil der Schwermetalle wird dabei fest in den Klinker gebunden [3].

Es ist deshalb sehr sorgfältig anhand der jeweiligen Randbedingungen zu prüfen, in welchem Umfang bei einer Substitution von Regelbrennstoffen durch Restabfall Umweltentlastungen, wie sie bei Ersatzbrennstoffen z.B. aus Kunststoffen [12] ermittelt worden sind, eintreten. Das Energieaustauschverhältnis ist dabei nicht zu vernachlässigen.

Die hier dargestellten prinzipiellen Aspekte zeigen, dass im Zusammenhang mit dem Einsatz von Ersatzbrennstoffen insbesondere auch im Hinblick auf stoffliche Fragen und die industrielle Umsetzung künftig noch eine Reihe von Untersuchungen erforderlich werden.

## 6 Schrifttum

- [1] Zelkowski, J.: Kohleverbrennung Brennstoff, Physik und Theorie, Technik. VGB-Kraftwerkstechnik GmbH, Essen, 1. Auflage 1986.
- [2] Sander, H.J.: Mitverbrennung von Ersatzbrennstoffen aus aufbereiteten Siedlungsabfällen. VDI Bildungswerk 430403, 13./14. März 2000, Düsseldorf.

- [3] Kehl, P.; Scharf, K.-F.; Scur, P.; Wirthwein, R.: Die Betriebsergebnisse aus den ersten 30 Monaten mit der neuen Ofenlinie 5 im Zementwerk Rüdersdorf. Zement-Kalk-Gips ZKG International 51 (1998) 8, S. 410-426.
- [4] Mark, F. E.; Rodriguez, J.: Energy recovery of greenhouse PE film: Co-combustion in a coal fired power plant. Sonderdruck APME 8031/GB/07/99, <http://www.apme.org>.
- [5] Hannes, J.P.; Wachenhausen, M.: Mitverbrennung von „Refuse Derived Fuel“ in kohle-gefeuerten Kraftwerkskesseln. VDI-Berichte 1492, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 1999, S. 381-386, ISBN 3-18-091492-0.
- [6] Hoinig, V.: Emissionen beim Einsatz von Sekundärbrennstoffen in Drehofenanlagen der Zementindustrie. Wissenschaftliche Konferenz „Einsatz von industriellen und kommunalen Abfällen im Zementherstellungsprozess“, Opole-Jarmoltówek, 15.-16. Oktober 1998, S.45-54. ISSN 0860-9160.
- [7] Specht, E.; Jeschar, R.: Beurteilung von Industrieöfen bei Wärmerückgewinnung. Seminar zu Methoden der Energieeinsparung bei Industrieöfen, TU Clausthal, Institut für Energieverfahrenstechnik, 1990.
- [8] Beckmann, M.; Scholz, R.: Energetische Bewertung der Substitution von Regelbrennstoffen durch Ersatzbrennstoffe aus Abfällen bei Hochtemperaturprozessen zur Stoffbehandlung. Zement-Kalk-Gips ZKG International, Teil 1: 52(1999) 6, S.287-303; Teil 2: 52(1999)8, S. 411-419.
- [9] Beckmann, M.; Scholz, R.: Kriterien zur Substitution von Regelbrennstoffen durch Ersatzbrennstoffe. VDI Berichte Nr. 1540, 2000.
- [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, Laufzeit 01.06.1997-28.02.1998.
- [12] Heyde, M.; Kremer, M.: Verwertung von Kunststoffabfällen aus Verkaufsverpackungen in der Zementindustrie. Fraunhofer-Institut Lebensmitteltechnologie und Verpackung, Freising, 1997.



**Prof. Dr.-Ing. Michael Beckmann**

Bauhaus Universität Weimar  
Fakultät Bauingenieurwesen Verfahren und Umwelt  
Coudraystraße 13  
99423 Weimar

Telefon: 03643 – 584675      Telefax: 03643 - 584790

---

geboren:                    1964, Dresden

1984-89                    Studium Verfahrenstechnik/ Brennstofftechnik, Bergakademie Freiberg.

1989/90                    Dipl.-Ing., Braunkohlenkombinat Senftenberg /Trocknungstechnik

1990-95                    wiss. Mitarbeiter Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH (CUTEC)

1995                        Promotion zum Dr.-Ing. an der Technischen Universität Clausthal

1995                        Abteilungsleiter „Thermische Behandlung“ und zusätzlich

1997 –2000                Hauptabteilungsleiter „Verfahrens- und Umwelttechnik“ CUTEC

seit 1. März 2000        Univ.-Prof. an der Bauhaus- Universität Weimar, Lehrstuhl  
„Verfahren und Umwelt“