

BEWERTUNGSKRITERIEN FÜR DEN EINSATZ VON SEKUNDÄRBRENNSTOFFEN

Beckmann, M.; Horeni, M. ; Bauhaus-Universität Weimar

1 Zusammenfassung

Der Einsatz von Sekundär- bzw. Ersatzbrennstoffen in industriellen Hochtemperaturprozessen hat in den vergangenen Jahren ständig zugenommen. Das betrifft sowohl Art als auch Menge der eingesetzten Ersatzbrennstoffe. Einen Überblick über die Entwicklung

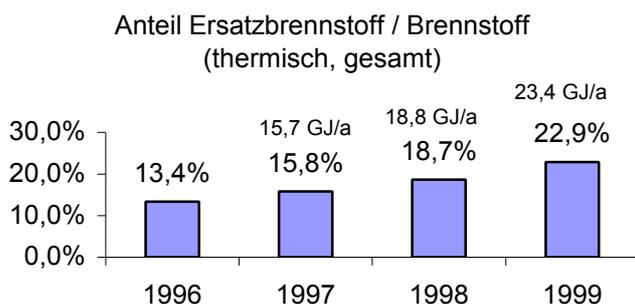


Abb. 1. Übersicht über den Einsatz von Ersatzbrennstoffen in der Zementindustrie [1], [2].

des Einsatzes von Ersatzbrennstoffen in der Zementindustrie, bezogen auf den gesamten thermischen Energieeinsatz gibt Abb. 1.

In den thermischen Prozessen der Zementindustrie stellen die Ersatzbrennstoffe Altreifen, Altöl und Fraktionen aus Industrie- und Gewerbeabfall die einerseits mengenmäßig und andererseits energetisch maßgeblichen Anteile am Gesamteinsatz dar (Abb. 2). 1999 wurden nahezu 85 % (thermisch) zu jeweils einem Drittel durch diese drei Fraktionen abgedeckt¹. Sonstige Fraktionen, wie gemischte Siedlungsabfälle bzw. Hausmüll oder Altholz haben in der Summe einen geringen Anteil von nur 15 % (thermisch) an der Gesamtmenge der eingesetzten Ersatzbrennstoffe. Für Fraktionen aus Siedlungsabfällen, die wiederum nur ein Teil dieser sonstigen Fraktionen sind, ergibt sich

1999 wurden nahezu 85 % (thermisch) zu jeweils einem Drittel durch diese drei Fraktionen abgedeckt¹. Sonstige Fraktionen, wie gemischte Siedlungsabfälle bzw. Hausmüll oder Altholz haben in der Summe einen geringen Anteil von nur 15 % (thermisch) an der Gesamtmenge der eingesetzten Ersatzbrennstoffe. Für Fraktionen aus Siedlungsabfällen, die wiederum nur ein Teil dieser sonstigen Fraktionen sind, ergibt sich

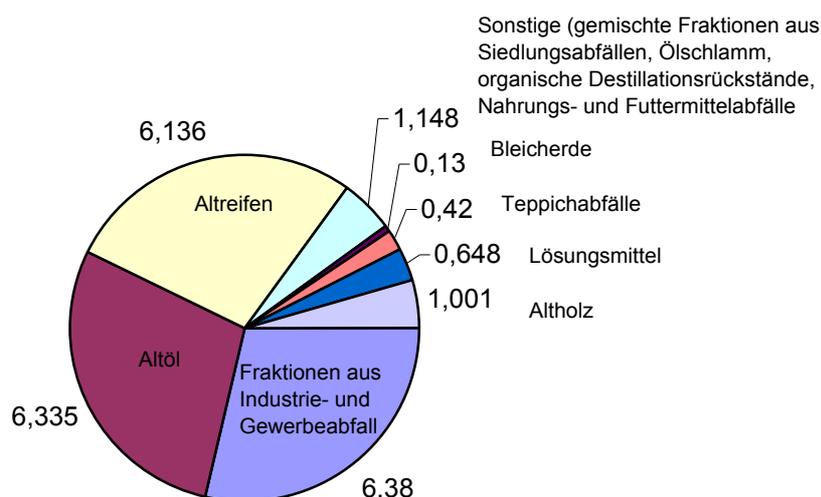


Abb. 2. Ersatzbrennstoffe in der Zementindustrie nach Art und Energieeinsatz in [GJ/a] [2].

¹ Summe Energieeinsatz aus Abb. 1 (23,4 Mio. GJ/a) ist wegen Verwendung gerundeter Werte nicht identisch mit Summe in Abb. 2 (22,2 Mio. GJ/a).

ein Anteil von nur ca. 5 %, was einer Kapazität von ca. 82.000 t/a entspricht.

Für die Kraftwerksindustrie ist in Abb. 3 beispielhaft für Nordrhein-Westfalen eine Verteilung von einzelnen Abfallarten, die als Ersatzbrennstoffe eingesetzt werden, enthalten.

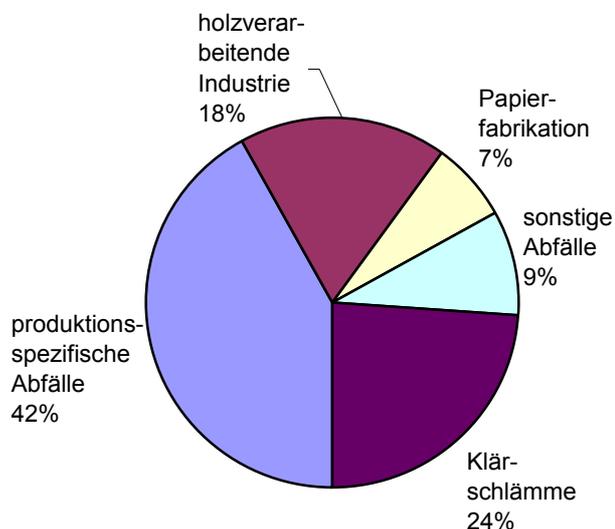


Abb. 3. *Prozentuale Verteilung der eingesetzten Abfallarten bzw. Herkunftsquellen in Kraftwerken in Nordrhein-Westfalen [3].*

Mitverbrennung in Kraftwerksfeuerungen) geeignete Kriterien für die Beurteilung herangezogen werden. D.h. unabhängig vom quantitativen Aufkommen ist eine technische Beurteilung der brennstofftechnischen Eigenschaften von Ersatzbrennstoffe erforderlich, um eine geeignete Anpassung an den jeweiligen Prozess zu ermöglichen.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass für die Beurteilung von Ersatzbrennstoffen

- Brennstofftechnische Kriterien aus den Anforderungen an den Prozess, insbesondere Produktqualität und Energieverbrauch und
- Kriterien aus der Bilanzierung der Verfahrenskette hinsichtlich kumulierter Energieverbrauch, Schadstoffemissionen usw.

gleichermaßen wichtig sind. Dabei müssen jedoch auch Möglichkeiten zur

- Prozessoptimierung sowohl im industriellen Anwendungsprozess als auch bei den übrigen Prozessen der Verfahrenskette

berücksichtigt werden. Auf diese Kriterien wird im folgenden näher eingegangen.

Für die Abschätzung der derzeitigen und der zukünftig zu erwartenden Mengenströme für Abfälle, die für die Herstellung von Ersatzbrennstoffen geeignet sind (Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, produktionsspezifische Abfälle usw.), wurden bereits eine Reihe von Studien durchgeführt (z.B. [4], [5]).

Wird durch den Einsatz von Ersatzbrennstoffen insgesamt eine Substitution von Primärbrennstoffen angestrebt, müssen für den Einsatz je nach Prozessanforderung (Brennen von Zementklinker im Drehrohr,

2 Beurteilung der Brennstoffqualität

Für den Einsatz fossiler Brennstoffe (Kohle, Erdöl, Erdgas usw.) bei industriellen Hochtemperaturverfahren, wie z.B. dem Brennen von Zementklinker, oder im Bereich der Energieumwandlung in Kraftwerksanlagen wurden bereits eine Reihe von Untersuchungen zur Optimierung der Prozessführung durchgeführt. Dabei konnten für die einzelnen Prozesse jeweils entsprechende brennstofftechnische Kriterien abgeleitet werden. Diese Kriterien beschreiben die Eigenschaften eines Brennstoffes aus brennstofftechnischer Sicht im wesentlichen

- chemisch,
- mechanisch,
- kalorisch und
- reaktionstechnisch.

In Abhängigkeit von den jeweiligen Eigenschaften bzw. brennstofftechnischen Kriterien eines Brennstoffes, kann dieser in eine entsprechende Systematik eingeordnet werden, z.B. die Einteilung in Brenngase, Heizöle, Kohlen usw.

Die brennstofftechnischen Eigenschaften von Sekundär- bzw. Ersatzbrennstoffen weisen i.a. große Unterschiede zu denen des substituierten Regelbrennstoffes auf. Die Auswirkungen, z.B. von Abweichungen im Zünd- und Ausbrandverhalten beider Brennstoffe ist bei Substitutionsraten von z.B. 1 bis 5 % des betreffenden Stoffes i.d.R. kaum mit nennenswerten Auswirkungen auf den Prozess verbunden. Unterstellt man höhere Substitutionsraten (20% und höher), müssen auch für Ersatzbrennstoffe aus Abfällen geeignete brennstofftechnische Kriterien definiert und bei den jeweiligen Prozessbedingungen berücksichtigt werden. Diese Bewertungskriterien müssen allerdings heute noch aus den Erfahrungen im Einsatz unterschiedlicher Regelbrennstoffe abgeleitet werden, da im Zusammenhang mit Ersatzbrennstoffen selbst bislang wenig Erfahrungswerte zu brennstofftechnischen Eigenschaften im Sinne einer systematischen Charakterisierung existieren. Berücksichtigt werden muss weiterhin auch das Potenzial einer Anpassung der Prozessführung. Durch die veränderten Randbedingungen bei der Prozessführung ergeben sich insbesondere Fragen zu

- Prozessoptimierung und
- Energierückgewinnung durch innerbetrieblichen und außerbetrieblichen Energieverbund.

Im Sinne der Gesamtbetrachtung des jeweiligen Prozesses müssen darüber hinaus auch

- Verfahrensketten mit kumulativen Stoff-, Massen- und Energiebilanzen

untersucht werden.

Dabei werden die einzelnen Prozesse für Aufbereitung bzw. Herstellung der Ersatzbrennstoffe, sowie die Prozesse der Verwertung dieser Brennstofffraktion und der weiteren Behandlung der verbleibenden Restfraktionen (Abb. 4) betrachtet, unabhängig davon ob die Behandlung dann eine Verwertung oder eine Entsorgung darstellt.

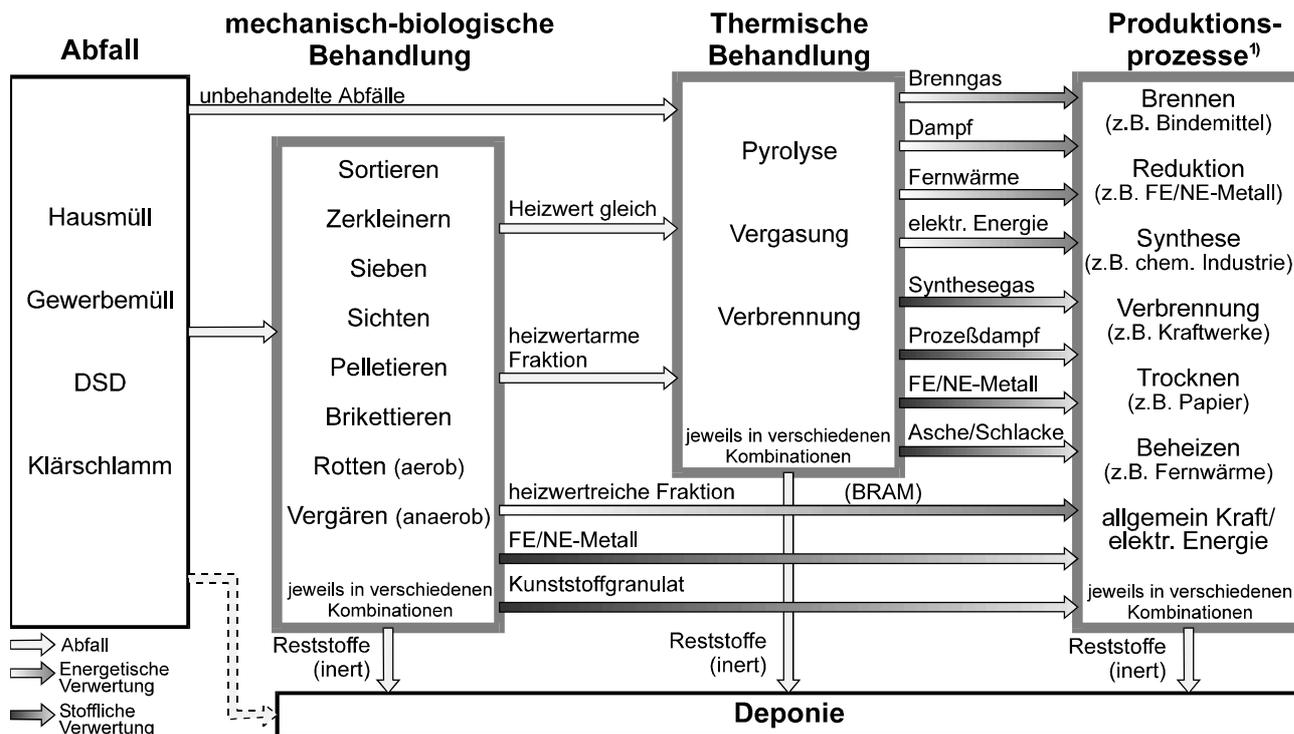


Abb. 4. Grundoperationen der Abfallbehandlung - Verfahrensketten (Beispiele) [6].

3 Brennstofftechnische Eigenschaften

Die Beurteilung der brennstofftechnischen Eigenschaften von Ersatzbrennstoffen ist heute weitestgehend nur auf Grundlage von empirischen Ergebnissen möglich (z.B. [7] bis [11]).

Kalorische Eigenschaften von Ersatzbrennstoffen können bereits jetzt mit Hilfe vereinfachter, für die Praxis jedoch tragfähiger mathematischer Modelle zu den Wechselwirkungen der Haupteinflussgrößen deutlich gemacht werden [12]. Darüber hinaus können zusätzliche Überlegungen hinsichtlich einer Prozessoptimierung oder aber auch zur Energierückgewinnung auf der Basis der Bilanzierung von Feuerungen und Industrieöfen angeschlossen werden. Aus diesen Überlegungen folgt, dass die kalorischen Eigenschaften als Kriterium von entsprechend großer Bedeutung sind.

Die eingangs erwähnte Untergliederung brennstofftechnischer Eigenschaften in chemische, mechanische, kalorische und reaktionstechnische Eigenschaften wird im folgenden am Beispiel fester Brennstoffe, zu denen auch Ersatzbrennstoffe z.B. aus Siedlungsabfall gehören, verdeutlicht.

Bei den **chemischen Eigenschaften** unterscheidet man zunächst nichtbrennbare Bestandteile (Asche, Wasser) und brennbare Bestandteile eines Brennstoffes. Diese Einteilung kann ohne weiteres auf Ersatzbrennstoffe übertragen werden, wobei bei diesen eine weitere Unterteilung der brennbaren Substanz in Kunststoffe (hoher Gehalt an Flüchtigen) und in sonstige organische Bestandteile sinnvoll ist (was z.B. für Vergleichsfragen oder Prozessoptimierungsfragen von Bedeutung ist).

Weiterhin werden die chemischen Eigenschaften eines Brennstoffes durch die Elementar- und Spurenzusammensetzungen, dem Anteil von fixem Kohlenstoff und dem Gehalt an flüchtigen Bestandteilen, sowie der Ascheerweichungspunkte dargestellt. Diese Unterteilung kann für die Beurteilung von Ersatzbrennstoffen problemlos herangezogen werden. Auch der Gehalt an sogenannten Spurenstoffen (Schwermetalle, Chlor, Phosphor, Schwefel usw.) beschreibt die chemischen Eigenschaften eines Brennstoffes, insbesondere im Hinblick auf die Bewertung der Emissionssituation und der Produktqualität.

Anforderungen an die chemischen Eigenschaften von Einsatzstoffen für Feuerungs- und Ofenanlagen lassen sich aus anlagenbezogener Sicht zunächst formulieren. Allerdings ist der Schadstoffgehalt bzw. der Gehalt an Spurenstoffen in Ersatzbrennstoffen, der herstellungsbedingt i.d.R. höher ist, nicht nur im Vergleich zu der Zusammensetzung des Regelbrennstoffes zu beurteilen, sondern muss im Zusammenhang mit den Frachtbilanzen der Emissionen (Luft-, Wasser- und Bodenpfade) der gesamten Verfahrenskette betrachtet werden.

Mechanische Eigenschaften von Regel- und Ersatzbrennstoffen sind im wesentlichen die Dichte der brennbaren und nicht brennbaren Substanz, die Schütteeigenschaften des Materials (Schüttdichte, -winkel, -fähigkeit usw.), die Mahlbarkeit und die Korngrößenverteilung, sowie allgemein die Handhabung des Brennstoffes im Sinne der Lagerfähigkeit (mechanisch) und der Zufuhr des Brennstoffes zur Anlage (Brenner usw.).

Auch hinsichtlich der **kalorischen Eigenschaften** können die für Regelbrennstoffe üblichen Angaben auf Ersatzbrennstoffe übertragen werden. Kalorische Eigenschaften sind in diesem Zusammenhang z.B. Heiz- und Brennwert, spezifischer Mindestluftbedarf, spezifische Mindestabgasmenge, adiabate Verbrennungstemperatur, Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit usw.

Die **reaktionstechnischen Eigenschaften** sind eng mit dem Zünd- und Ausbrandverhalten verbunden, und stellen ein wichtiges Kriterium für den Einsatz von Ersatzbrennstoffen dar. Das Zünd- und Ausbrandverhalten ist von einer Reihe von Parametern wie dem Anteil der flüchtigen Bestandteile, der Korngrößenverteilung, der Wärmeleitfähigkeit usw. abhängig. Ebenso lässt sich das Korrosionspotenzial nicht durch eine Größe wie z.B. den Chlorgehalt allein ausdrücken. Vielmehr ist das Korrosionspotenzial eines Brennstoffes als Summenparameter zu verstehen, der durch die chemischen, mechanischen und kalorischen Eigenschaften beeinflusst wird.

Ein weiteres Kriterium, das eng mit den reaktionstechnischen Eigenschaften zusammenhängt, betrifft die Lagerfähigkeit, die somit nicht nur unter rein mechanischen Gesichtspunkten beurteilt werden kann.

Die Betrachtung der chemischen, mechanischen, kalorischen und reaktionstechnischen Eigenschaften allein reicht für die Beurteilung eines Ersatzbrennstoffes aber nicht aus. Vielmehr müssen diese in Abhängigkeit von der jeweiligen Aufgabe, d.h. dem verfahrenstechnischen Prozess bewertet werden. Wie bereits erwähnt betrifft dies bei höheren Brennstoffsubstitutionsraten insbesondere Fragen der Prozessoptimierung und der Energierückgewinnung durch innerbetrieblichen und außerbetrieblichen Energieverbund unter den durch die Substitution veränderten Randbedingungen des Prozesses.

Zusammengefasst sei an dieser Stelle erwähnt, dass man zunächst mit den kalorischen und reaktionstechnischen Eigenschaften (hier Zünd- und Ausbrandverhalten, Korrosionspotenzial usw.) in Verbindung mit der Bilanz der Verfahrenskette die Eignung der Ersatzbrennstoffe im jeweiligen Prozess und die Einsparung an Primärenergie in der gesamten Verfahrenskette beurteilen kann. Danach sind selbstverständlich weitere Untersuchungen hinsichtlich der Schadstoffemission (ebenfalls kumuliert) durchzuführen.

3.1 Kalorische Eigenschaften, Einfluss der kalorischen Verbrennungstemperatur

Im Zusammenhang mit der Gesamtbetrachtung eines speziellen thermischen Verfahrens und des dafür eingesetzten Brennstoffgemisches in Abhängigkeit einer bestimmten Substitutionsrate sind zunächst die kalorischen Eigenschaften von grundlegender Bedeutung, da diese über den Heizwert bereits eine gewisse Vorauswahl bezüglich der einsetzbaren Primär- und Ersatzbrennstoffe gestatten. Weiter erscheint es wichtig auf Fragen des Zünd- und Ausbrandverhaltens und die zugehörigen brennstofftechnischen Eigenschaften einzugehen, da diese eng im Zusammenhang mit der Wärmefreisetzung in der Flamme und der Wärmeübertragung an das Brenngut stehen. In diesem Zusammenhang soll hier insbesondere auf die kalorische Verbrennungstemperatur, in Beziehung zum entsprechenden Heizwert, eingegangen werden. Für eine ausführliche Betrachtung, auch z.B. hinsichtlich des Mindestluftbedarfes, sei hier auf [12], [13] verwiesen.

Die kalorische Verbrennungstemperatur ist eng mit den kalorischen Brennstoffgrößen wie Heizwert, Mindestluftbedarf, spezifische Wärmekapazität usw. verbunden. Der Einfluss dieser Größen auf die Substitution wird im weiteren zusammengefasst dargestellt. Für

eine ausführlichere Beschreibung sei auf entsprechende Veröffentlichungen (ZEMENT-KALK-GIPS INTERNATIONAL, Heft 6 und 8 1999 [12] und in VDI-Berichte Nr. 1540 [14]) verwiesen.

Der Abgasverlust bei einem bestimmten Brennstoff ist um so größer, je höher die auf den Heizwert bezogene Abgasmenge oder die Abgastemperatur sind. Bei 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):

$$\Delta\dot{H}_G = \dot{Q}_{RK} \quad (1)$$

Je nach kalorischer Verbrennungstemperatur J_{kal} , Guttemperatur J_S und Wärmeübertragungsverhältnissen (Konvektion, Strahlung) stellt sich im Ofen eine Gastemperatur (Bilanztemperatur) J_G ein:

$$\dot{Q}_{RK} = \alpha_{\alpha\varepsilon} \cdot A_S \cdot (\vartheta_G - \vartheta_S) \quad (2),$$

(mit $\alpha_{\alpha\varepsilon}$...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:

$$\Delta\dot{H}_G = \dot{m}_G \cdot c_{G,kalG} \cdot (\vartheta_{kal} - \vartheta_G) \quad (3)$$

Bei Substitution des Primärbrennstoffes (PB) durch den Ersatzbrennstoff (EB) besteht u.a. die Anforderung, dass die Guttemperatur J_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 J_{kal} eines Ersatzbrennstoffes sich an die zu erreichende Guttemperatur ϑ_G annähert, desto höher muss der Brennstoffmassenstrom \dot{m}_{EB} werden.

Es wird nun ein Energieaustauschverhältnis E eingeführt:

$$E = \frac{\dot{m}_{EB} \cdot h_{u,EB}}{\dot{m}_{PB} \cdot h_{u,PB}} \quad (4),$$

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 [12] näher erörterten Modellannahmen und zugehörigen Gleichungen lassen sich die in Abb. 5 beispielhaft dargestellten Energieaustauschverhältnisse $E_{RK,J}$ ermitteln. Abb. 5 zeigt $E_{RK,J}$ für den Ersatz eines Primärbrennstoffes mit $h_{u,PB} = 25 \text{ MJ/kg}$ durch Ersatzbrennstoffe mit $h_{u,EB} = 11 \text{ MJ/kg}$, $h_{u,EB} = 15 \text{ MJ/kg}$, $h_{u,EB} = 20 \text{ MJ/kg}$, $h_{u,EB} = 30 \text{ MJ/kg}$ und $h_{u,EB} = 35 \text{ MJ/kg}$ in Abhängigkeit von der Gastemperatur ϑ_G für verschiedene Substitutionsfälle.

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

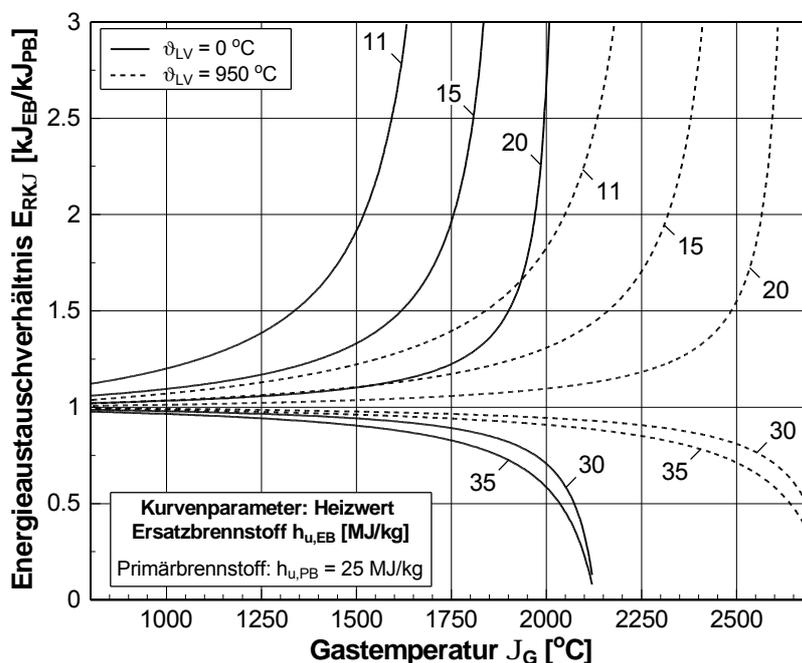


Abb. 5. Energieaustauschverhältnis bei statischer Betrachtung $E_{RK,J}$

Wärmerückgewinnung (z.B. Wärmerückgewinnung aus dem Gut (Rostkühler Klinkerbrennprozess)) deutlich.

In [14] wird beispielsweise über praktische Erfahrungen bei der Umstellung eines Brennprozesses von Heizöl ($h_u \approx 40 \text{ MJ/kg}$) auf Braunkohlenstaub ($h_u \approx 20 \text{ MJ/kg}$) berichtet. Diese Umstellung führte u.a. zu einer größeren Flammenlänge, einer Verlagerung der Sinterzone in Richtung Ofeneinlauf und zu einem Anstieg der Temperaturen am Ofeneinlauf und nach dem Vorwärmer. Selbstverständlich spielt dabei auch das unterschiedliche Abbrandverhalten von Braunkohlenstaub gegenüber Heizöl eine Rolle. Insgesamt ergab sich eine Zunahme des spezifischen Energieaufwandes um ca. $170 \text{ kJ/kg}_{\text{Kl}}$. Der Mehraufwand wird jeweils ungefähr zur Hälfte auf die Vergrößerung des Abgasvolumenstromes und auf Korngrößenschwankungen und deren Auswirkungen auf den Temperaturverlauf zurückgeführt.

Primärbrennstoffes ist, nimmt das Energieaustauschverhältnis umgekehrt Werte kleiner eins an. Das betrifft beispielsweise die Substitution von Steinkohle durch hochkalorische Kunststoffabfälle beim Klinkerbrennprozess in der Primärfeuerung. Vergleicht man die Energieaustauschverhältnisse in Abb. 5 für einen bestimmten Ersatzbrennstoff mit und ohne Luftvorwärmung, so wird weiter die Bedeutung der

3.2 Reaktionstechnische Eigenschaften - Zünd- und Ausbrandverhalten

Wie erwähnt hat im Zusammenhang mit den reaktionskinetischen Eigenschaften fester Brennstoffe insbesondere das Zünd- und Ausbrandverhalten bei der Betrachtung von technischen Feuerungen eine wesentliche Bedeutung. Besonders interessieren dabei die

- Zeit bzw. Geschwindigkeit der Freisetzung der Flüchtigen Bestandteile und die
- Geschwindigkeit der Verbrennung der Flüchtigen Bestandteile und des Restkokes.

Die reaktionskinetischen Eigenschaften und damit auch das Zünd- und Abbrandverhalten (die wiederum wesentlichen Einfluss auf die Wärmeübertragungsbedingungen in der Feuerung haben) müssen in Verbindung mit den übrigen brennstofftechnischen Eigenschaften betrachtet werden. Dies sind v.a.:

kalorische Eigenschaften

- Spezifische Wärmekapazität,
- Wärmeleitfähigkeit,
- Heizwert der flüchtigen Bestandteile und
- Heizwert des Restkokes,

chemische Eigenschaften:

- Gehalt flüchtiger Bestandteile,
- Restkoks und

mechanische Eigenschaften

- Korngrößenverteilung.

Im Zusammenhang mit der Einstellung einer bestimmten Korngrößenverteilung ist weiterhin auch das

- Mahlbarkeitsverhalten

zu berücksichtigen.

Im folgenden wird das Zünd- und Ausbrandverhalten am Beispiel der Prozessbedingungen des Klinkerbrennprozesses im Drehrohr erörtert.

Je nach Region werden in den deutschen Zementwerken unterschiedliche Braun- und Steinkohlen als fossile Regelbrennstoffe eingesetzt. Im Einzugsbereich des Ruhrgebietes und des Rheinischen Braunkohlebeckens werden überwiegend gemahlene Steinkohle und Braunkohlenstaub eingesetzt. In Mittel-, Nord- und Süddeutschland kommt hingegen häufig Importkohle zum Einsatz, die im Werk vermahlen werden muss. Bevorzugt werden aschearme Kohlen mit 12 bis 14 Ma.-% Aschegehalt, einem Anteil an Flüchtigen Bestandteilen von 24 bis 30 Ma.-% und Wassergehalten zwischen 8 bis 14 Ma.-% eingesetzt [15]. Diese Angaben sind im Zusammenhang mit den optimalen Zünd- und Ausbrandbedingungen zu sehen. Im Hinblick auf eine optimale Flammenlänge und einen vollständigen Ausbrand muss der Steinkohlenstaub ausreichend fein aufgemahlen werden. Der Siebrückstand R 90 μm sollte kleiner 10 Ma.-% betragen. Daher werden sehr hohe Anforderungen an die Mahlbarkeit der Kohlen ge-

richtet. Die beste Mahlbarkeit² weisen Steinkohlen mit einer mittleren Inkohlung und damit einem Gehalt der Flüchtigen Bestandteile im o.g. Bereich von 24 bis 30 Ma.-% auf. Damit liegen für diese Kohlen auch die Asche- und Wassergehalte fest. Diese Angaben zu den Größen Aschegehalt, Flüchtige Bestandteile, Wassergehalt und Korngröße sind als zusammengehörig für den Brennstoff Steinkohle zu betrachten.

Eine unmittelbare Übertragung einzelner Werte im Sinne einer Ableitung von Anforderungen an andere Brennstoffe, wie z.B. Ersatzbrennstoffe, erscheint nicht sinnvoll. Vielmehr muss darauf geachtet werden, dass das Zünd- und Abbrandverhalten der Ersatzbrennstoffe denen der Regelbrennstoffe entspricht, oder wenn nicht, wie durch die Prozessführung das Zünd- und Abbrandverhalten der Ersatzbrennstoffe dem der Regelbrennstoffe angenähert werden kann.

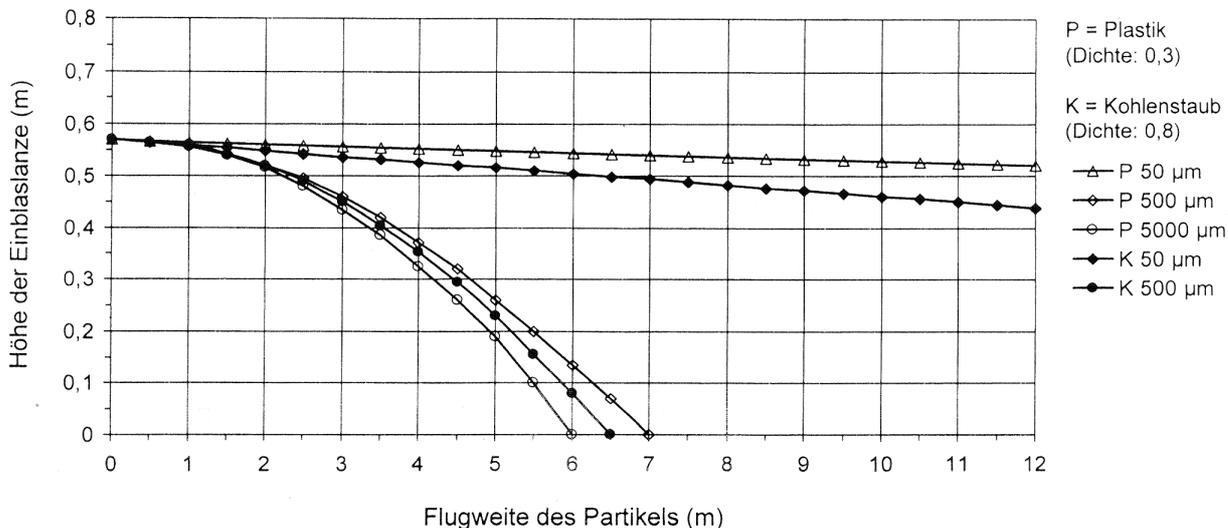
Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass Veränderungen der Flamme durchaus zu nennenswerten Qualitätsverlusten bei der Klinkererzeugung führen können. So können z.B. extrem kurze Flammen mit raschem Zündverhalten zu entsprechend hohen Temperaturen am Drehrohrauslauf und damit zu ungünstig hohen Temperaturgradienten in der Abkühlphase beim Übergang vom Drehrohfen zum Klinkerkühler führen. Hohe Kühlgeschwindigkeiten haben wiederum Spannungsrisse im Klinker mit entsprechend hohen Staubgehalten aber auch langsamere Erstarrungsneigung des Zementes zur Folge. In diesem Fall könnte die Flamme z.B. durch eine gröbere Aufmahlung des Brennstoffes oder entsprechend verminderte Durchwirbelung bzw. Vermischung von Brennstoff mit Luft oder durch erhöhte Einblasgeschwindigkeiten verlängert werden. Umgekehrt kann bei schwer entzündbaren Brennstoffen (z.B. niedriger Gehalt Flüchtiger Bestandteile, großer Partikeldurchmesser) durch niedrige Einblasgeschwindigkeiten und intensive Durchmischung die Zündung durch eine brennernahe Zündung unterstützt werden. Es ist dabei allerdings zu beachten, dass bei geringeren Einblasgeschwindigkeiten und größeren Partikeldurchmessern, die Flugweite der Brennstoffpartikeln entsprechend abnimmt (Abb. 6). Aus der Sicht der Produktqualität ist der Eintrag von nicht ausgebrannten Brennstoffpartikeln in das Bett zu vermeiden. Gleichfalls wirken sich erhöhte CO-Konzentrationen oberhalb des Klinkerbettes nachteilig auf die Klinkerqualität aus.

² Mahlbarkeit weist darauf hin, mit welchem Aufwand eine Kohle unter bestimmten Bedingungen zu mahlen ist, siehe u.a. Hardgrove-Index, z.B. [16].

Partikelflugbahnen bei Austrittsgeschwindigkeit 20 m/s

(Sekundärluftgeschwindigkeit 7 m/s, Temperatur 1200°C)

Quelle: Rechnerische Simulation durch IFRF



Partikelflugbahnen bei Austrittsgeschwindigkeit 80 m/s

(Sekundärluftgeschwindigkeit 7 m/s, Temperatur 1200°C)

Quelle: Rechnerische Simulation durch IFRF

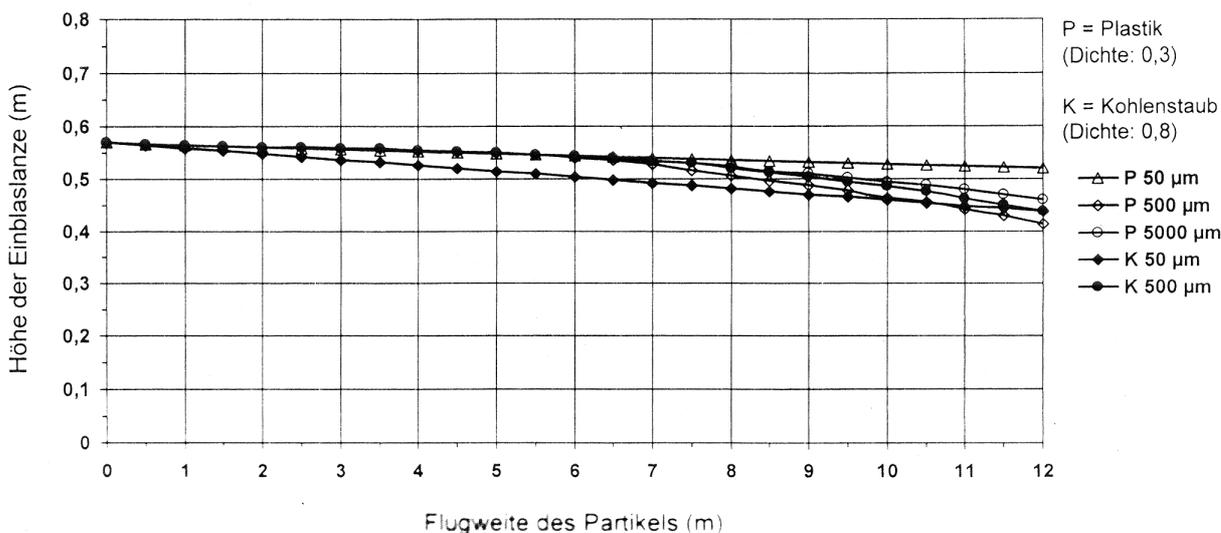


Abb. 6. Einfluss der Austrittsgeschwindigkeit auf die Flugbahn der Brennstoffpartikeln für verschiedene Ausgangspartikeldurchmesser bei Kohle und Plastik [17].

Dass bei Einsatz eines Ersatzbrennstoffes mit zunächst im Vergleich zum Regelbrennstoff sehr verschiedenen Eigenschaften bei richtiger Abstimmung der Prozessbedingungen ebenfalls gute Brennergebnisse erreicht werden können, zeigt das Beispiel der Umstellung von Steinkohlen- auf Braunkohlenstaub in den 80er Jahren. Der Braunkohlenstaub aus dem Lausitzer Revier war deutlich gröber als die zuvor eingesetzte Importkohle. Jedoch hatte die Braunkohle deutlich höhere Gehalte an flüchtigen Bestandteilen als die Steinkohle [18].

Ein weiteres Beispiel zu den Zünd- und Ausbrandeigenschaften sei im Zusammenhang mit der Zweitfeuerung erwähnt. Hier ergeben sich prozessbedingt ganz andere Anforderungen als bei der Primärfeuerung. Für die Zweitfeuerung ist, wegen der gegenüber der Primärfeuerung deutlich niedrigeren Temperaturen, das temperaturbezogene Energieaustauschverhältnis weniger von Bedeutung. Bei zu erreichenden Gastemperaturen von $J_G \approx 1200 \text{ °C}$ ergeben sich entsprechend Abb. 5 auch bei einer Reduzierung des Heizwertes von 25 MJ/kg auf 15 MJ/kg Energieaustauschverhältnisse nur geringfügig größer als eins. Wichtig bei der Substitution in der Zweitfeuerung sind wiederum die Zünd- und Ausbrandeigenschaften des Brennstoffes. Grobstückige Brennstoffe wie z.B. Reifenschnitzel fallen in den Drehrohrenlauf und führen dort zu einem Temperaturanstieg. Durch unvollkommene Verbrennung kann sich die Verbrennung bis in den Vorwärmerbereich hineinziehen. In Abb. 7 sind hierzu Ergebnisse aus Praxisuntersuchungen [19] dargestellt.

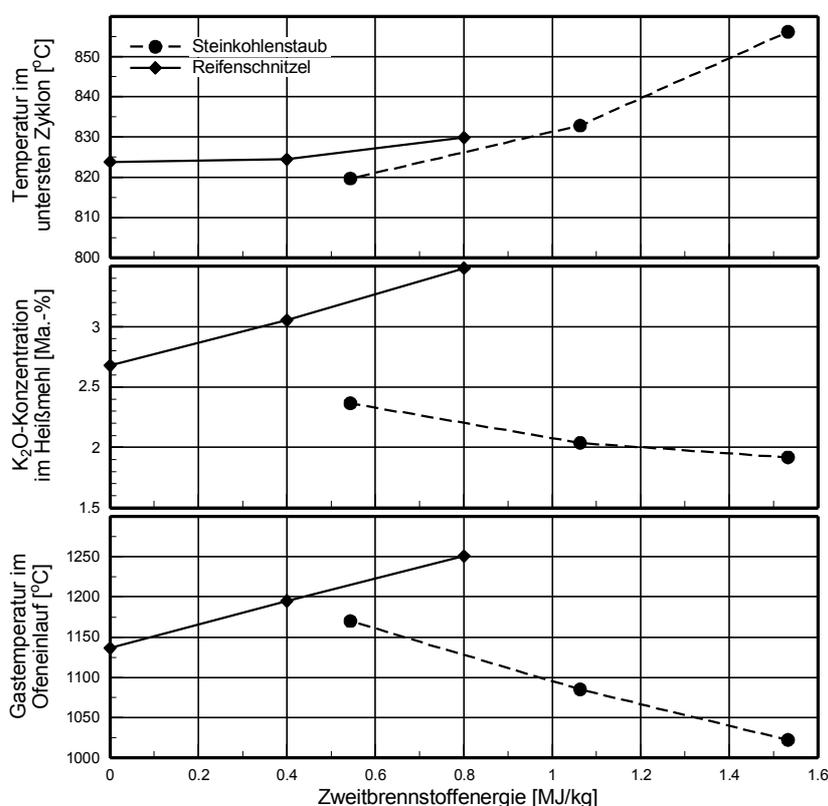


Abb. 7. Beeinflussung der Prozessführung in Abhängigkeit von Ort und Zeit der Zweitbrennstoffzufuhr [19].

Man erkennt u.a. in der Abbildung, dass durch Erhöhung der auf die Klinkermasse bezogenen Zweitbrennstoffenergie im Fall von Reifenschnitzel die Gastemperaturen im Ofeneinlauf ansteigen. Mit diesem Temperaturanstieg ist wiederum eine verstärkte Alkalisalzverdampfung im Drehrohrfen verbunden. Umgekehrt erfolgt bei der Zufuhr eines Brennstoffes mit vergleichsweise guten Ausbrandeigenschaften der Umsatz hauptsächlich in der Gassteigleitung

des Calcinators, und es ist dann mit einer Verminderung der Alkalisalzrezirkulation zu rechnen. Im vorliegenden Beispiel führt die Erhöhung des Zweitbrennstoffanteils durch Zufuhr von Steinkohlenstaub wegen der damit verbundenen Verminderung des Erstbrennstoffanteils zu einer Absenkung der Gastemperatur im Drehrohrfen einlauf und damit zur Verminderung der K₂O-Freisetzung. Eine verminderte Menge der Alkalien im Kreislauf führt schließlich zu einem geringeren spezifischen Energieaufwand. Dabei ist allerdings ein vollständiger Ausbrand des Zweitbrennstoffes im Calcinator vorausgesetzt.

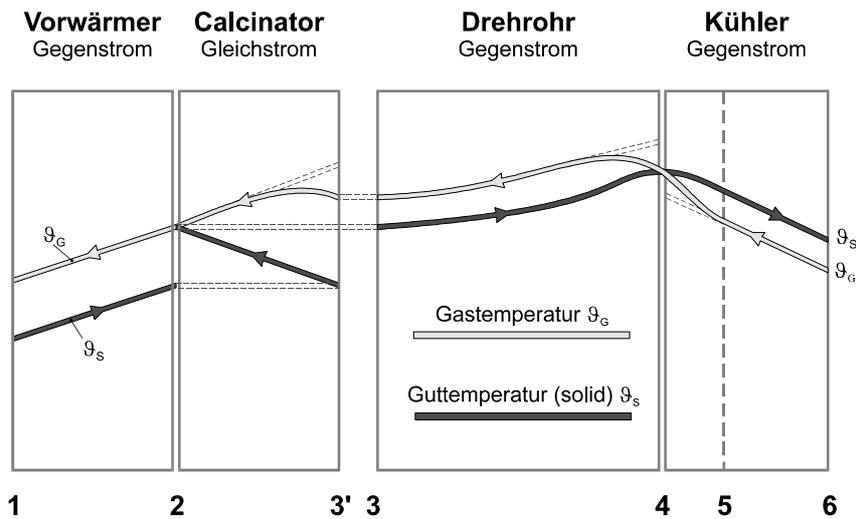


Abb. 9. Schematische Darstellung des Zementprozesses in Kombination mit einer Wirbelschichtfeuerung einschließlich dem zugehörigen Temperaturverlauf.

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 Energie-

rückgewinnung durch innerbetrieblichen und außerbetrieblichen Energieverbund unter den veränderten Randbedingungen des Ersatzbrennstoffes zu beantworten. Brennstoffeigenschaften allein reichen somit für die Beurteilung eines Ersatzbrennstoffes nicht aus.

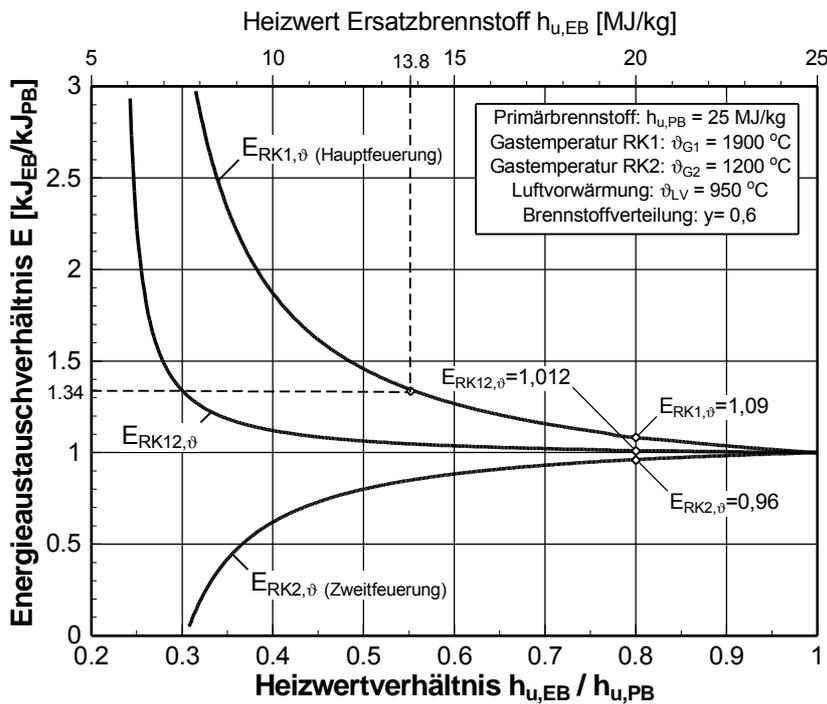


Abb. 10. Energieaustauschverhältnis bei statischer Betrachtung $E_{RK,J}$ in Abhängigkeit von der Brennstoffsubstitution $h_{u,EB} / h_{u,PB}$ für eine Prozessführung mit zweistufiger Brennstoffzufuhr

5 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 CO₂-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. Abb. 11 zeigt schematisch für vier verschiedene Fälle, die ausführlicher in ZEMENTKALK-GIPS INTERNATIONAL, Heft 6 und 8 1999 [12], erläutert sind, die jeweilige Verfahrenskette aus den Bausteinen:

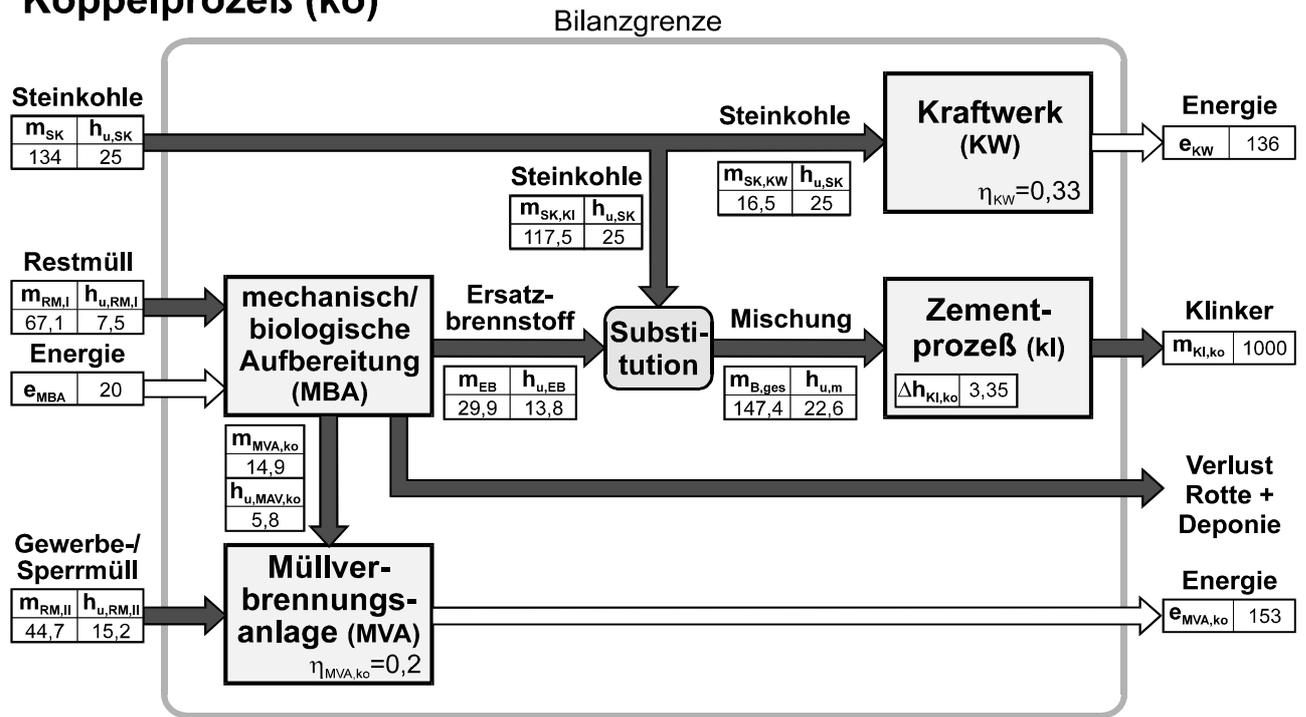
- mechanisch-biologische Aufbereitung (MBA) von Restsiedlungsabfall,
- thermische Behandlung (MVA),
- Zementklinkerbrennprozess und
- Kraftwerk

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

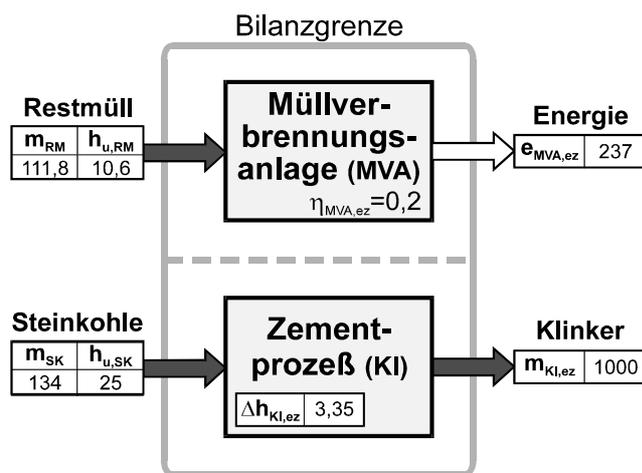
Als Basis ist hier die Herstellung von $m_{\text{Kl}} = 1000$ kg Klinker gewählt. Die vier Fälle unterscheiden sich in der Bilanzierung der Brennstoffsubstitution. Die zugehörigen Werte sind in der Tabelle in Abb. 11 eingetragen. Zum besseren Vergleich enthält das Schema die Werte für den Fall 1. Die vier Fälle können grob wie folgt charakterisiert werden:

- Fall 1: keine Berücksichtigung des Energieaustauschverhältnisses und der Asche aus den Brennstoffen, ohne zusätzliche Verluste, $E_{\text{RK12}} = 1,0$,
- Fall 2: wie Fall 1, jedoch mit Berücksichtigung des Energieaustauschverhältnisses $E_{\text{RK12}} = 1,012$ (Abb. 10),
- 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
Parametervariationen					
E	Energieaustauschverhältnis	1	1,012	1,012	1,012
[%]	Zusatzenergie (Bypass usw.)	0	0	2	2
[%]	Zusatzenergie (gesamt)	0	1,3	3,35	1,25
ξ _{A,EB}	Berücksichtigung Aschegehalt	nein	nein	nein	ja
Massen [kg] im Koppelprozess					
m _{SK,KI}	Steinkohle Zementprozeß	117,5	117,6	119,9	117,7
m _{SK,KW}	Steinkohle Kraftwerk	16,5	16,4	14,1	16,3
m _{RM,I}	Restmüll zur MBA	67,1	73,1	74,6	73,1
m _{RM,II}	Gewerbe-/Sperrmüll	44,7	48,7	49,7	48,8
m _{MVA,ko}	Restmüll aus MBA zur MVA	14,9	16,2	16,6	16,2
m _{EB}	Ersatzbrennstoff	29,9	32,6	33,3	32,6
m _{B,ges}	Substitutionsbrennstoff	147,4	150,2	153,2	150,3
Massen [kg] im Koppel- und Einzelprozess					
m _{SK}	Steinkohle gesamt	134			
m _{RM}	Restmüll gesamt (m _{RM,I} +m _{RM,II})	111,8	121,8	124,3	121,9
m _{KI}	Klinker	1000			
Heizwerte und spez. Energieaufwand [MJ/kg] im Koppelprozess					
h _{u,RM,I}	Restmüll zur MBA	7,5			
h _{u,RM,II}	Gewerbe-/Sperrmüll	15,2			
h _{u,MVA,ko}	Restmüll aus MBA zur MVA	5,8			
h _{u,EB}	Ersatzbrennstoff	13,8			
h _{u,ges}	Substitutionsbrennstoff	22,6	22,6	22,6	22,6
Δh _{KI,ko}	Spez. Energieaufwand Klinker	3,35	3,390	3,458	3,392
Spezifischer Energieaufwand [MJ/kg] im Einzelprozess					
Δh _{KI,ez}	Spez. Energieaufwand Klinker	3,35			
Heizwerte [MJ/kg] im Koppel- und Einzelprozess					
h _{u,SK}	Steinkohle	25			
h _{u,RM}	Restmüll gesamt	10,6			

Bezeichnung	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	
Energien [MJ] und Bilanzierung					
e _{MBA}	Energieaufwand MBA	20	22	23	22
e _{KW}	Nutzenergie Kraftwerk	136	135	116	134
e _{MVA,ko}	Nutzenergie MVA, Koppelproz.	153	167	170	167
e _{MVA,ez}	Nutzenergie MVA, Einzelproz.	237	258	263	258
e _{ko}	Energiebilanz e _{KW} +e _{MVA,ko} -e _{MBA}	269	280	263	279
z _{Nutz}	Nutzenergieverhältnis e _{ko} /e _{MVA,ez}	1,14	1,09	1	1,08
Δm _{SK}	Einsparung SK [kg _{SK} /Mg _{KI}]	1,28	0,88	0	0,84

Abb. 11. 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).

Würde man nun nur den Bilanzkreis der Substitution des Primärbrennstoffes Kohle durch den Ersatzbrennstoff betrachten, so würde sich eine Einsparung von 16,5 kg Steinkohle je 1000 kg Klinkererzeugung ergeben.

Aus dem Beispiel ist zu erkennen, welcher Einfluss durch die speziellen Randbedingungen und die Auswirkungen einer Brennstoffsubstitution gegeben sind. Abb. 12 zeigt das

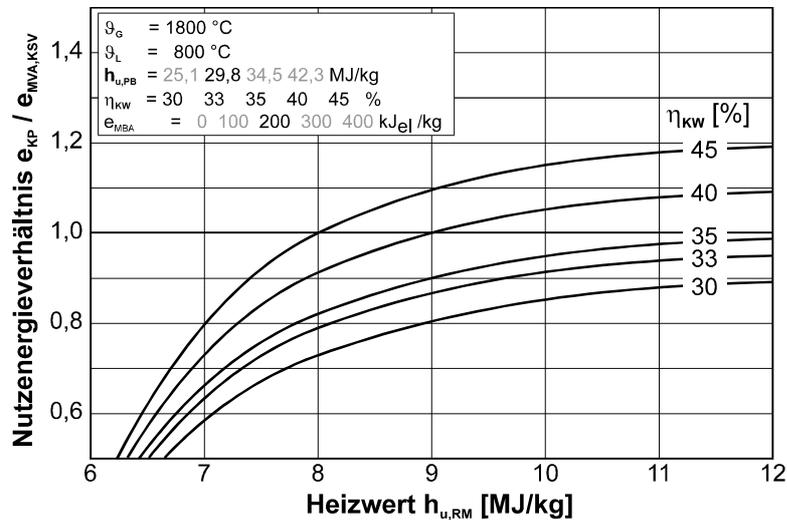


Abb. 12. Elektrisches Nutzenergieverhältnis in Abhängigkeit vom Abfallheizwert für verschiedene Kraftwerkswirkungsgrade [21].

elektrische Nutzenergieverhältnis für ausgewählte Randbedingungen in Abhängigkeit des Abfallheizwertes vor der Behandlung (für die Indizierung der Koppelprozesse wurde anstelle von "KO" in Abb. 11 in Abb. 12 der Index "KP" gewählt) [21]. Das Verhältnis aus der Energie des Koppelprozesses und der Einzelprozesse kann Werte größer und kleiner als eins annehmen, d.h. durch die Brennstoffsubstitution können sowohl Ressourcen geschont

($z_{Nutz} > 1$) als auch zusätzlich verbraucht ($z_{Nutz} < 1$) werden. 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. [22]).

Über diese kumulierte Bilanzierung lässt sich auch feststellen, ob z.B. eine weniger aufwendige Aufbereitung in der MBA, die zu entsprechend aschereichen und heizwertarmen Ersatzbrennstoffen führt, in Verbindung mit einer Sauerstoffanreicherung zur Anhebung der adiabaten Verbrennungstemperaturen einen Vorteil gegenüber derzeit üblichen Konzepten der MBA ergibt.

6 Charakterisierung der Sekundärbrennstoffe

Wie bereits im Abschnitt 2 dargestellt, ist ein Brennstoff durch die brennstofftechnischen Eigenschaften, die sich in chemische, mechanische, kalorische und reaktionstechnische Eigenschaften unterteilen lassen, gekennzeichnet. Für fossile Brennstoffe liegen sehr umfangreiche Ergebnisse diesbezüglich vor. Bei den Sekundär- bzw. Ersatzbrennstoffen ist die Datenlage im Vergleich dazu bislang nur unvollständig. Eine wesentliche Ursache dafür ist in den zahlreichen, zum Teil sehr unterschiedlichen und heterogenen Zusammensetzungen von Abfällen zu sehen. Weiter hat man sich bei den Herstellern von Ersatzbrennstoffen zunächst sehr stark an den chemischen Eigenschaften und speziell an den Schadstoffgehalten im Vergleich zu fossilen Regelbrennstoffen orientiert. Die für den Prozess ebenso wichtigen Kriterien hinsichtlich der kalorischen und reaktionskinetischen Eigenschaften sind bislang nur vereinzelt untersucht worden.

Im folgenden werden brennstofftechnische Daten für verschiedene Ersatzbrennstoffe dargestellt und diskutiert:

- | | |
|--------------------------------|---------------------|
| 1. Altholz | 7. Klärschlamm |
| 2. Altöl | 8. Mischkunststoffe |
| 3. Altreifen | 9. Spuckstoffe |
| 4. BPG | 10. Tiermehl |
| 5. DSD – Kunststoffe | 11. Trockenstabilat |
| 6. Heizwertreiche MBA Fraktion | |

Tab. 1 zeigt eine Übersicht über Heizwert, Wasser- und Aschegehalte sowie Anteil Flüchtiger Bestandteile der einzelnen Ersatzbrennstoffe.

Ersatzbrennstoff	Heizwert H_u [MJ/kg]	Wasser [Ma.-%]	Asche [Ma.-%]	Flüchtige [Ma.-%]	Gruppe	Quelle
Granulat	40,8	0,01	0,5	99,4		
Kunststoffe, Folien	37,7	3,1	1	98,7	h-I	[23]
Mischkunststoffe	34	4,9	6			[24]
Altreifen	33,1	2	2,7			[25]
Altöl						
BPG	24,5	17	8,2	66,8	h-II	[26]
Spuckstoffe	19,5	17,8	9,9	62,4		[27]
Heizwertreiche MBA-Fractionen	14,4 bis 22,8	3,6 bis 33,7	15,1 bis 17,1			[28]
Tiermehl	18	4,6	22			[29]
Altholz	17	8 bis 50	0,5	81,3	h-III	[30]
Trockenstabilat	15 bis 18	ca. 15	28,9	70 bis 80*		[31, 32]
Klärschlamm	1 bis 14	3 bis 80	7 bis 58,2			[33]

*...bezogen auf den wasser- und aschefreien Zustand

Tab. 1. Übersicht über Heizwert, Wasser-, Asche- und Flüchtigen-Gehalt in Ersatzbrennstoffen.

Die Aufteilung erfolgt hier in drei Gruppen entsprechend des Heizwertes. In der Gruppe h-I sind Ersatzbrennstoffe mit Heizwerten $h_u > 25$ MJ/kg aufgeführt, die Gruppe h-II enthält Ersatzbrennstoffe mit $25 < h_u < 20$ MJ/kg und in die Gruppe h-III sind Ersatzbrennstoffe

mit $h_u < 20$ MJ/kg eingeordnet. Die Ersatzbrennstoffe der Gruppe h-I könnten aus Sicht des Heizwertes (siehe kalorische Eigenschaften, Abschnitt 3.1) mit einem Energieaustauschverhältnis $E \approx 1$ gegen Steinkohle als Regelbrennstoff in der Hauptfeuerung substituiert werden. Bei den Ersatzbrennstoffen der Gruppe h-II wäre eine geringfügige und bei den Stoffen der Gruppe h-III eine u.U. deutliche Erhöhung des Energieaustauschverhältnisses zu berücksichtigen. Wichtig für die Substitution sind weiter die Anteile der flüchtigen Bestandteile. Man erkennt aus Tab. 1, dass Kunststoffe zwar zunächst aus der Sicht des Heizwertes in h-I eingeordnet werden können und damit auch für den Einsatz in der Hauptfeuerung in Frage kommen. Zu beachten ist allerdings, dass Kunststoffe nahezu 100 % flüchtige Bestandteile aufweisen und damit im Vergleich zu den fossilen Regelbrennstoffen Braunkohle (ca. 40 %) und Steinkohle (ca. 24 %) ein deutlich anderes Zünd- und Abbrand- sowie Wärmeentbindungsverhalten aufweisen. BPG2, das ebenfalls für den Einsatz in der Hauptfeuerung entsprechend des Heizwertes geeignet erscheint, hat auch mit ca. 67 % einen relativ hohen Anteil flüchtiger Bestandteile. Bei Ersatzbrennstoffen aus gemischten Siedlungsfractionen oder aus Gewerbeabfällen kann ein hoher Heizwert i.d.R. nur durch einen entsprechend hohen Anteil an Kunststoffen eingestellt werden. Alle anderen Fraktionen (z.B. im Siedlungsmüll) weisen Heizwerte $h_u < 20$ MJ/kg auf. Altholz und Trockenstabilat zeigen zwar ähnliche Anteile an flüchtigen Bestandteilen, sind aber aufgrund des vergleichsweise niedrigen Heizwertes nur in die Gruppe h-III einzuordnen. Diese Stoffe sind daher besonders für den Einsatz in der Calcinatorfeuerung in Verbindung mit einer vorgeschalteten Vergasung als eine Art thermische Brennstoffaufbereitung (wie in Rüdersdorf) interessant.

Wichtig für den Einsatz der Ersatzbrennstoffe ist weiter das Mahlverhalten. Es sei an dieser Stelle auf den Verlauf der Flugbahnen beim Eintrag in den Zementofen in Abhängigkeit von Einblasgeschwindigkeit und Partikelgröße (Abb. 6) erinnert. Über das Mahlverhalten liegen jedoch nur sehr wenige und oftmals auch nur qualitative Erfahrungen vor. So ist z.B. bekannt, dass die Zerkleinerung von Altreifen als sehr schwierig einzustufen ist. Fasrige Stoffe wie Holz lassen sich ebenfalls nur mit hohem Aufwand zerkleinern.

7 Quellen

- [1] Endres, G.: Verfahrenstechnische Gesichtspunkte zur Mitverbrennung von Abfällen in Drehrohröfen. 11. DVV-Kolloquium Stoffliche und thermische Verwertung von Abfällen in industriellen Hochtemperaturprozessen. Braunschweig, September 1999, S. 69-102. ISBN 3-00-003384-X.
- [2] Hoenig, V.: Einsatz von Sekundärstoffen in Drehrohranlagen der Zementindustrie. 11. DVV-Kolloquium Stoffliche und thermische Verwertung von Abfällen in industriellen Hochtemperaturprozessen. Braunschweig, September 1999, S. 47-68. ISBN 3-00-003384-X.
- [3] Alwast, H.; Both, G.: Energetische Verwertung von Abfällen in Kraft- und Zementwerken in den Bundesländern. erschienen in Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Reformbedarf in der Abfallwirtschaft, Tagungsband zum 10. Internationalen Recycling Congress, 29./30.10.2001 Berlin, TK Verlag Thomé-Kozmiensky, 2001, ISBN: 3-935317-05-0.
- [4] Thomé-Kozmiensky, K. J.: Alternativen der Ersatzbrennstoffherstellung aus Hausmüll. erschienen in Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Reformbedarf in der Abfallwirtschaft, Tagungsband zum 10. Internationalen Recycling Congress, 29./30.10.2001 Berlin, TK Verlag Thomé-Kozmiensky, 2001, ISBN: 3-935317-05-0.
- [5] Zeschmar-Lahl, B.: Der Markt für Ersatzbrennstoffe - Angebot und Nachfrage im Überblick - Versuch einer Prognose für das Jahr 2005. erschienen in Sächsisches Informations- und Demonstrationszentrum SIDAF (Hrsg.): Abfallkolloquium 2001 - Entwicklungen in der Abfallbehandlung nach Inkrafttreten neuer Rechtsnormen, Freiberg 15.-16.11.2001, Medienzentrum der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, 1. Auflage, 2001
- [6] Scholz, R.; Beckmann, M.: Substitution von Brennstoffen und Rohstoffen durch Abfälle in Hochtemperaturprozessen. 11. DVV-Kolloquium "Stoffliche und thermische Verwertung von Abfällen in industriellen Hochtemperaturprozessen, Braunschweig 1998, S. 21-46
- [7] 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.
- [8] Sander, H.J.: Mitverbrennung von Ersatzbrennstoffen aus aufbereiteten Siedlungsabfällen. VDI Bildungswerk 430403, 13./14. März 2000, Düsseldorf.
- [9] 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>.
- [10] Hannes, J.P.; Wachenhausen, M.: Mitverbrennung von „Refuse Derived Fuel“ in kohlegefeuerten Kraftwerkskesseln. VDI-Berichte 1492, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 1999, S. 381-386, ISBN 3-18-091492-0.
- [11] Hoenig, V.: Emissionen beim Einsatz von Sekundärbrennstoffen in Drehofenanlagen der Zementindustrie. Wissenschaftliche Konferenz „Einsatz von industriellen und kommunalen Abfällen im Zementherstellungsprozess“, Opole-Jarnoltówek, 15.-16. Oktober 1998, S.45-54. ISSN 0860-9160.
- [12] 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.

- [13] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren - Verbrennung, Vergasung, Pyrolyse, Verfahrens- und Anlagenkonzepte. B.G. Teubner - Reihe Umwelt, 1. Auflage, 2001, ISBN: 3-519-00402-X
- [14] Beckmann, M; Scholz, R.: Kriterien zur Substitution von Regelbrennstoffen durch Ersatzbrennstoffe. VDI-Berichte Nr. 1540, 2000.
- [15] Hochdahl, O.: Betriebserfahrungen bei der Kohlenmahlung im Zementwerk. VGB Kraftwerkstechnik 70(1990), Heft 8, S. 659-663.
- [16] Zelkowski, J.: Kohleverbrennung. Brennstoff, Physik und Theorie, Technik. VGB-Kraftwerkstechnik GmbH, Essen, VGB-B008, 1. Auflage 1986.
- [17] Endres, G.: Verfahrenstechnische Gesichtspunkte zur Mitverbrennung von Abfällen in Drehrohröfen. 11. DVV-Kolloquium Stoffliche und thermische Verwertung von Abfällen in industriellen Hochtemperaturprozessen. Braunschweig, September 1999, S. 69-102. ISBN 3-00-003384-X.
- [18] Huckauf, H.: Stand und Möglichkeiten der rationellen Energieanwendung beim Zementklinkerbrand, Zement-Kalk-Gips ZKG International 41 (1988) Nr. 4, S. 153-157.
- [19] Rosemann, H.; Locher, F.W.; Jeschar, R.: Brennstoffenergieverbrauch und Betriebsverhalten von Zementdrehofenanlagen mit Vorcalcinierung. Zement-Kalk-Gips ZKG International 40(1987)10, S. 489-498.
- [20] Verein Deutscher Zementwerke e.V., Forschungsinstitut der Zementindustrie, Altöl. Wo Abfall Wunder wirkt.
- [21] 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.
- [22] BMBF-Abschlussbericht Förderkennzeichen 1471114: Möglichkeiten der Kombination von mechanisch-biologischer und thermischer Behandlung von Restabfällen, 1999.
- [23] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ): Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 1999, Düsseldorf, April 1999.
- [24] Calouri, A.; Mark, F.; Moser, M.; Prisse, A.: Plastics waste - an alternative fuel source for cement production, March 1997
- [25] Tabasaran, O.; Thomanetz, E.; Besemer, G.: Ergebnisse der Untersuchungen an einer Versuchsanlage zur Abfallpyrolyse, Müll und Abfall 7/78, S. 233-239.
- [26] Glorius, T.: Erfahrungen mit Produktion und Einsatz qualitätsgesicherter, anpelletierter Sekundärbrennstoffe auf Basis produktionsspezifischer Gewerbeabfälle, UTECH - Umwelttechnologieforum Berlin, 17.-18.02.1998.
- [27] Thielen, W.; Dürrfeld, H.; Kinni, J.: Die Allein- und Mitverbrennung von schwierigen Brennstoffen in der Wirbelschicht, VDI Berichte, 1993.
- [28] Paraknewitz-Kalla, C.; Damiecki, R.: MBRA Horm - Optimierung und Kombination mit thermischen Verfahren - BMBF Statusseminar Potsdam, 17.-19.03.1998.
- [29] Informationen des bayrischen Amtes für Umweltschutz, 24.01.2001.
- [30] Keller, R.: Primärseitige NOX-Minderung mittels Luftstufung bei der Holzverbrennung, BWK Bd. 46 (1994), Nr. 11/12.
- [31] Wengenroth, K.: Technische Entwicklungen und Emissionsminderung im Herhof-Trockenstabilat-Verfahren, Abfallkolloquium 2000, SIDAF-Schriftenreihe 7/2000, S. 80-97.
- [32] Hamel, S.; Funk, G.; Krumm, W.; Mertens, G.: Integrierte Pyrolyse und Verbrennung von Biomassen, 20. Deutscher Flammentag 4./5.09.2001, Essen.
- [33] Hoffmann, V.: Co-Verbrennung von hochkalorischen Abfällen in Kraftwerken, 10. Kasseler Abfallforum, 21.-23.04. 1998.