

Schnittstelle und Aufbereitungstiefe von Ersatzbrennstoffen für die energetische Verwertung

**Prof. Dr.-Ing. Michael Beckmann; Dipl.-Ing. Martin Horeni, Weimar;
Prof. Dr.-Ing. Reinhard Scholz, Clausthal**

Zusammenfassung

Ersatzbrennstoffe werden durch mechanische oder mechanisch-biologische Aufbereitungsverfahren aus Abfällen mit dem Ziel hergestellt, Regelbrennstoffe in Prozessen der Grundstoffindustrie und Kraftwerksindustrie zu substituieren.

Wichtig für die Beurteilung der Regelbrennstoffsubstitution sind vor allem die Eigenschaften von Ersatzbrennstoffen im Zusammenhang mit verfahrenstechnischen Prozessen, sowie der Anpassung dieser Prozesse, die durch die veränderten Brennstoffeigenschaften erforderlich sind. In welchem Umfang die Einsparung fossiler Energieträger in einem Prozess der Grundstoffindustrie (z. B. der Zementherstellung) den erhöhten Aufwand für die Herstellung des Ersatzbrennstoffes in der Aufbereitung rechtfertigt, kann nur mit Hilfe von Energie- und Schadstoffbilanzen (einschl. CO₂-Betrachtung) der Koppelprozesse bzw. der gesamten Verfahrenskette¹ beantwortet werden.

Aus den brennstofftechnischen Anforderungen an die Ersatzbrennstoffe und der energetischen Bilanzierung der gesamten Verfahrenskette ergeben sich die Schnittstelle und die Aufbereitungstiefe bei der Herstellung von Ersatzbrennstoffen.

Derzeit besteht jedoch im Hinblick auf die Charakterisierung (Methoden) und die Klassifizierung von Ersatzbrennstoffen ein erheblicher Entwicklungsbedarf.

In dem vorliegenden Beitrag werden zunächst kurz Ersatzbrennstoffe hinsichtlich Einteilung, Einsatzmöglichkeiten und Einsatzpotenzialen beschrieben. Danach wird auf die brennstofftechnische Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen und die Optimierung des Einsatzes aus verfahrenstechnischer Sicht eingegangen.

Anhand von vereinfachten Modellvorstellungen werden dann Ergebnisse im Hinblick auf den Einfluss der Aufbereitungstiefe diskutiert. Abschließend werden noch bestehende Entwicklungsaufgaben zusammengefasst.

¹ Verfahrenskette ist die Summe der Einzelprozesse, die bei der Behandlung von Abfallstoffen für die Verwertung und Entsorgung aller Teilfraktionen erforderlich sind (Ersatzbrennstoffherstellung, Verbrennung, Deponierung der verbleibenden Restfraktionen, Energieumwandlung im Kraftwerk usw.).

1 Einteilung der Ersatzbrennstoffe, Einsatzmöglichkeiten und Potenziale

1.1 Einteilung der Ersatzbrennstoffe

Ersatzbrennstoffe (EBS) sind Brennstoffe aus Abfällen, die Primärbrennstoffe in thermischen Verfahren der Grundstoffindustrie oder im Bereich der Energieumwandlung ersetzen. Der damit verbundene Nutzen, d.h. die Einsparung an Primärenergie, CO₂-Emissionen usw. darf nicht nur in Verbindung mit der unmittelbaren Nutzung in dem jeweils betrachteten Prozess (Zementklinkerherstellung, Kraftwerk usw.), sondern muss vielmehr in Verbindung mit der Bilanzierung der gesamten Verfahrenskette bewertet werden.

Ersatzbrennstoffe lassen sich gemäß ihres Aufbereitungsaufwandes grundsätzlich in zwei Gruppen einteilen:

- **Gruppe 1:** Abfallarten, die bereits an der Anfallstelle als Monofraktion erfasst werden und ohne aufwendige Aufbereitungsanstrengungen einer Mitverbrennung zugeführt werden können und
- **Gruppe 2:** heizwertreiche Abfallströme² aus einer mechanisch-biologischen Anlage, die aufgrund einer Mischerfassung vor der Mitverbrennung aufbereitet werden müssen.

Diesen einzelnen Gruppen lassen sich folgende Abfälle zuordnen:

Gruppe 1:

- Altholz,
- Altöl,
- Altreifen und Altgummi,
- DSD-Kunststoffe,

² Bei einem Abfall mit z. B. einem mittleren Heizwert $h_u = 9,5$ MJ/kg sind die Fraktionen, deren Heizwert deutlich oberhalb dieses mittleren Heizwert liegen, als heizwertreich und die Fraktionen, deren Heizwert deutlich unterhalb des mittleren Heizwert liegen, als heizwertarm einzustufen. Die Begriffe heizwertreich und heizwertarm orientieren sich darüber hinaus auch am Prozess, in dem die jeweiligen Brennstoffe eingesetzt werden. Wird beispielsweise eine Abfallfraktion mit einem Heizwert $h_u = 15$ MJ/kg (die aus der zuvor genannten Sicht als heizwertreich betrachtet werden kann) im Zementbrennprozess eingesetzt, so ist diese im Vergleich zum substituierten Regelbrennstoff (z. B. Steinkohle, $h_u > 29$ MJ/kg) als heizwertarm anzusehen.

- DSD-Sortierreste,
- Klärschlämme,
- Kunststoffe,
- Lösungsmittel,
- Shredderleichtfraktion und
- Tiermehle und -fette.

Gruppe 2:

- heizwertreiche Leichtfraktion nach mechanischer Behandlung (Folien, Altholz, Papier, Kunststoffe, etc.),
- heizwertreiche Fraktion nach mechanischer und aerober biologischer Behandlung und
- heizwertreiche Fraktion nach mechanischer und anaerober biologischer Behandlung.

Für die Diskussion der Mitverbrennung von Ersatzbrennstoffen wurde im Rahmen dieser Studie der Fokus auf Fraktionen gerichtet, die aus Abfällen der mechanisch-biologischen Aufbereitung (MBA) gewonnen werden (Gruppe 2).

Zu den Inputfraktionen einer MBA zählen i. d. R. folgende Abfälle (s. [1]):

Restabfall aus Haushalten

- Hausmüll,
- Sperrmüll.

Restabfall aus Industrie und Gewerbe

- hausmüllähnliche Gewerbeabfälle,
- produktionsspezifische Gewerbeabfälle,
- Baustellenabfälle und
- Sortierreste.

1.2 Einsatzmöglichkeiten für Ersatzbrennstoffe

Ersatzbrennstoffe aus Fraktionen von Restabfällen aus Haushalten, Industrie und Gewerbe können grundsätzlich in Prozessen der **Grundstoffindustrie**, wie z. B.:

der Bindemittelindustrie

- Zementklinkerbrennprozess,
- Brennprozesse der Kalk- und Gipsherstellung,
- Asphaltmischprozess,
- usw.

der Eisen- und Stahlindustrie

- Roheisenerzeugung,
- Sinterprozesse,
- usw.

und im Bereich der **Energieumwandlung**, z. B. in:

Kraftwerken

- Staubfeuerungen,
- Wirbelschichtfeuerungen,
- usw.

so genannten Energieverwertungsanlagen (ähnlich Müllverbrennungsanlagen, MVA)

- Rostfeuerungen,
- Vergasungsanlagen,
- usw.

eingesetzt werden.

Bei einer thermischen Vorbehandlung der Ersatzbrennstoffe durch Vergasung und Pyrolyse lassen sich die Einsatzmöglichkeiten und auch die Substitutionsraten u. U. bedeutend erweitern. Als Beispiele hierfür können die Vergasung von Ersatzbrennstoffen in einer Zirkulierenden Wirbelschicht und die Nutzung des Vergasungsgases als Ersatzbrennstoff in der Calcinatorfeuerung der Ofenlinie 5 des Zementwerkes Rüdersdorf [2] oder die Pyrolyse von Ersatzbrennstoffen in einem Drehrohr und die Zufuhr des Pyrolysegases und des Pyrolysekokes, nach entsprechender Aufbereitung, zu dem Kessel des Kraftwerkes Hamm [3] genannt werden.

Es sei bereits an dieser Stelle deutlich gemacht, dass der Grund für den Einsatz von Ersatzbrennstoffen in den o. g. Prozessen i. d. R. nicht in den brennstofftechnischen Eigenschaften zu sehen ist, sondern vielmehr ein wirtschaftliches Interesse besteht. Dieser legitime Grund sollte in der Diskussion um Ersatzbrennstoffe nicht negativ belegt werden, aber auch nicht außer Acht gelassen werden [4].

1.3 Abschätzung des Potenzials für den Einsatz von Ersatzbrennstoffen

Für die Abschätzung des Potenzials für den Einsatz von Ersatzbrennstoffen gibt es im Wesentlichen zwei Möglichkeiten³:

- die Berechnung des theoretischen Potenziales aus der Prognose der Mengenströme verschiedener, für die Herstellung von Ersatzbrennstoffen geeigneter Abfallarten und der Bestimmung des heizwertreichen Potenzials und
- die Berechnung des technischen Potenziales aus der Ermittlung des Gesamtenergieverbrauches in der Grundstoffindustrie und der Energieumwandlung und der Annahme einer spezifischen Substitutionsrate des Regelbrennstoffes.

Beide Methoden sind mit erheblichen Unsicherheiten behaftet, geben aber Aufschluss darüber, in welche Größenordnungen der Einsatz von Ersatzbrennstoffen einerseits im Hinblick auf die gesamte in Deutschland produzierte Abfallmenge und andererseits im Hinblick auf den Gesamtenergieverbrauch in Deutschland einzuordnen ist.

Berechnet man zunächst den Teil des theoretischen Potenziales für den Einsatz von Ersatzbrennstoffen, der nur aus der Menge der mechanisch-biologisch zu behandelnden Abfälle resultiert, so ergeben sich jährlich ca. 0,8 bis 1,3 Mio. t an heizwertreicher MBA-Leichtfraktion [5].

Mit einer vereinfachten Berechnung (einheitlicher Durchschnittsheizwert, keine Berücksichtigung des Energieaustauschverhältnisses) ergeben sich jährliche Ersatzbrennstoffmengen von 10 bis 20 Mio. t für den Einsatz in Kohlekraft- und Zementwerken. Die Anwendung von Ersatzbrennstoffen insbesondere in der Kraftwerksindustrie muss sich jedoch erst noch in der Praxis erweisen, hier sind noch eine Reihe von Fragen, die mit der Charakterisierung der Ersatzbrennstoffe, Korrosionen, Gütesicherung, Zwischenlager usw. zusammenhängen, zu untersuchen. Insofern erscheinen die aufgrund des Bedarfs abgeschätzten Ersatzbrennstoffmengen von 5 Mio. t/a zum Zeitpunkt nicht realistisch.

Unabhängig vom gewählten Berechnungsansatz für die Abschätzung des Potenzials lässt sich erkennen, dass die derzeit eingesetzte Menge an Ersatzbrennstoffen deutlich geringer ist, als die theoretisch bzw. technisch mögliche.

³ Auf die Berücksichtigung des wirtschaftlichen Potenziales soll hier verzichtet werden.

Für diese Diskrepanz gibt es mehrere Gründe, die sich im wesentlichen auf Fragestellungen der Verfahrenstechnik, der Wirtschaftlichkeit und der tatsächlich verfügbaren Anlagenkapazität beziehen, aber auch im Hinblick auf die öffentliche Akzeptanz und den damit verbundenen Umweltgesichtspunkten zu suchen sind.

Dies zeigt – wie bereits erwähnt v. a. im Hinblick auf Fragestellung der Verfahrenstechnik (Anpassung der erzeugten Ersatzbrennstoffe an die Anwendungsprozesse, Anpassung der Prozesse an die eingesetzten Ersatzbrennstoffe, sowie energetische und stoffliche Optimierung der Prozesse) – den zukünftigen Forschungsbedarf auf. Grundlagen für die Steigerung der derzeit eingesetzten Mengen an Ersatzbrennstoff sind somit die weitergehende Untersuchung der Anwendungsprozesse, der anwendungsorientierten Herstellung der Ersatzbrennstoffe, und, gewissermaßen als notwendiges Bindeglied zwischen Herstellung und Anwendung, Untersuchungen zu den brennstofftechnischen Eigenschaften der Ersatzbrennstoffe bzw. zu deren brennstofftechnischer Charakterisierung.

In diesem Zusammenhang muss auch auf die Untersuchung der gesamten Verfahrenskette Gewinnung – Herstellung – Anwendung bzw. Einsatz der Ersatzbrennstoffe einschl. Entsorgung der verbleibenden Restfraktionen (heizwertarme Abfallbestandteile) und der damit verbundenen Transporte hingewiesen werden, da nur dadurch ermittelt werden kann, ob ein bestimmter Ersatzbrennstoff im Vergleich zur herkömmlichen energetischen Behandlung des Abfalls auch Brennstoff „ersetzt“, und somit die Bezeichnung „Ersatzbrennstoff“ gerechtfertigt ist. Dies betrifft auch die energetische Verwertung von Abfällen in so genannten Energieverwertungsanlagen (EVA), die im Vergleich zu Müllverbrennungsanlagen (MVA) möglicherweise nur geringere Steigerungen des energetischen Wirkungsgrades ermöglichen, aber eine mehr oder weniger aufwendigere und damit energieintensivere Behandlung des Abfalls voraussetzen.

2 Brennstofftechnische Charakterisierung der Ersatzbrennstoffe

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 wurde 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 Abweichungen, z. B. im Zünd- und Ausbrandverhalten beider Brennstoffe, beeinflussen den Prozess bei geringen Substitutionsraten von 1 bis 5 % des betreffenden Stoffes i. d. R. kaum. Unterstellt man höhere Substitutionsraten (z. B. > 20%), müssen auch für Brennstoffe 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 wenige Erfahrungswerte zu brennstofftechnischen Eigenschaften im Sinne einer systematischen Charakterisierung existieren. Berücksichtigt werden muss weiterhin auch das Potenzial einer Anpassung der Prozessführung.

Die Beurteilung der brennstofftechnischen Eigenschaften von Ersatzbrennstoffen ist heute weitestgehend nur auf Grundlage von empirischen Ergebnissen möglich (z. B. [2], [6] bis [9]). 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 [10]. 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 Bedeu-

tung sind. Zur näheren Beschreibung der eingangs genannten brennstofftechnischen Eigenschaften sei hier auf [11] und [12] verwiesen.

Klassifikationssysteme von fossilen Brennstoffen sind bekanntermaßen seit Jahren mit dem Ziel entwickelt worden, Qualität und damit Einsatzmöglichkeiten von Einzelbrennstoffen leichter im Voraus zu erkennen, ohne sie jedes mal grundsätzlich untersuchen zu müssen. Die verschiedenen Tests für fossile Brennstoffe lassen Schlussfolgerungen zum Abbrandverhalten in realen Brennräumen zu.

Bis jetzt besteht kein Klassifizierungssystem von sog. Ersatzbrennstoffen. Das System der Abfallschlüsselnummern kann eine gewisse Hilfe bei der Einordnung von Ersatzbrennstoffen aus verschiedenen Abfällen hinsichtlich ihrer Herkunft geben, ist jedoch für die Charakterisierung der Ersatzbrennstoffe selbst nicht ausreichend.

Die Erarbeitung eines geeigneten Klassifizierungssystems, das eine breite Verwendung von EBS in großen Industriefeuerungen allein oder als Zusatzbrennstoff zu fossilen Brennstoffen erleichtern würde, stellt ein besonders schwieriges Problem mindestens aus drei Gründen dar:

- Die Herkunft und damit die chemische Zusammensetzung der Ersatzbrennstoffe sind sehr unterschiedlich, was nicht nur das Brennverhalten, sondern auch die Umweltverträglichkeit bei ihrer Verwendung stark beeinflussen kann.
- Die Form, in der Ersatzbrennstoffe vorhanden sind (stückige oder staubförmige Sekundärbrennstoffe, aufgearbeitete, z. B. zu Briketts verarbeitete Sekundärbrennstoffe usw.) kann die Möglichkeiten ihrer Verwendung stark einschränken.
- Im Gegensatz zu den fossilen Brennstoffen sind Ersatzbrennstoffe sehr heterogen zusammengesetzt. Es sind daher entsprechend modifizierte Versuchsmethoden mit größeren Probenmengen erforderlich, um aus den Ergebnissen der Tests bei Ersatzbrennstoffen ebenso wie bei fossilen Brennstoffen Rückschlüsse auf das Abbrandverhalten in realen Brennräumen zuzulassen.

Daraus folgt, dass die Ersatzbrennstoffe ähnlich wie fossile Brennstoffe sowohl nach ihren chemischen und kalorischen Eigenschaften, aber auch nach ihrer Form und nach ihrem spezifischen Verhalten bei einer energetischen Nutzung klassifiziert werden sollten. Ein solches Klassifizierungssystem würde eine breitere Verwendung derartiger Brennstoffe erleichtern.

3 Optimierung der Prozessführung

Wie bereits im Abschnitt 2 erwähnt, müssen für die Beurteilung von Ersatzbrennstoffen zunächst brennstofftechnische Eigenschaften untersucht 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.

Die alleinige Betrachtung der chemischen, mechanischen, kalorischen und reaktionstechnischen Eigenschaften reicht für die Beurteilung eines Ersatzbrennstoffes i. d. R. 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 über die kalorischen (v. a. im Hinblick auf so genannte Energieaustauschverhältnisse) und reaktionstechnischen Eigenschaften (hier Zünd- und Ausbrandverhalten, Korrosionspotential usw.) in Verbindung mit der Gesamtbilanz 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.

Die bei Einsatz von Ersatzbrennstoffen in Prozessen der Grundstoffindustrie zu berücksichtigenden Energieaustauschverhältnisse lassen sich zunächst grob in

- ein Energieaustauschverhältnis unmittelbar im Teilprozess der Substitution ohne Prozessoptimierung bei unveränderter Produktionsleistung und

-
- Energieaustauschverhältnisse für den Gesamtprozess mit Berücksichtigung von Maßnahmen zur Prozessoptimierung bei ebenfalls unveränderter Produktionsleistung

unterteilen.

Diese Energieaustauschverhältnisse werden aus brennstofftechnischer Sicht wesentlich durch die kalorischen Eigenschaften eines Brennstoffes bestimmt. Hierzu zählen insbesondere

- Heiz- und Brennwert,
- spezifischer Mindestluftbedarf,
- spezifische Mindestabgasmenge und
- adiabate Verbrennungstemperatur.

Darüber hinaus werden die Energieaustauschverhältnisse durch die Prozessführung in den Teilprozessen des Gesamtverfahrens wie z. B.:

- Luftüberschussverhältnis,
- Luft- und Brennstoffvorwärmung,
- Brennstoffstufung,
- Sauerstoffanreicherung und
- Abgas- und Wärmeverluste

beeinflusst (z.B. [10], [13]).

4 Bilanzmodelle – Grundlagen

Für bestehende Verfahren der Abfallbehandlung oder der Stoffbehandlung können bei Vorliegen der Daten bezüglich der Stoff- und Energieströme mit Hilfe von Bilanzmodellen für den stationären Zustand spezifische Kennziffern, wie z. B. Wirkungsgrad, Energieverbrauch und Abgasmengen, relativ einfach ermittelt werden. Für Verfahren, die sich in der Planungsphase befinden (hierbei sei auch der Fall einer geplanten Umrüstung oder einer Brennstoffsubstitution eingeschlossen), lassen sich die erforderlichen Daten der Stoff- und Energieströme mit Hilfe der v. g. Prozessmodelle abschätzen. Wichtig für einen Vergleich ist die Festlegung einheitlicher Bilanzgrenzen und einheitlicher Ziele (Energieerzeugung, Produktionsziel usw.). Je nach Bilanzrahmen und Zielstellung ergeben sich ganz unterschiedliche spezifische Kennziffern. Die Vorgehensweise bei der Bildung dieser Kennziffern ist ausführlich u. a. in [14] beschrieben.

In Abb. 1 ist beispielsweise die Vorgehensweise bei der Bildung des Nettoprimärwirkungsgrades für eine Abfallbehandlungsanlage dargestellt. Die Bildung eines Nettoprimärwirkungsgrades ist vor dem Hintergrund sinnvoll, dass man sich bemühen sollte, für eine Abfallbehandlung möglichst wenig Primärenergie einzusetzen. Der zur Behandlung erforderliche Primärenergieaufwand könnte als Ressource geschont werden, wenn es den zu behandelnden Abfall nicht gäbe. Man kann folglich einen „Abfallnutzen“ H_{Netto} bilden, in dem man von der Nutzenergie H_{Nutz} die benötigten Primärenergien ΣH_p abzieht. Es würde also die Primärressource dann durch „eigene erzeugte“ Nutzenergie ersetzt bzw. substituiert bzw. gedanklich rückgeführt, wie in

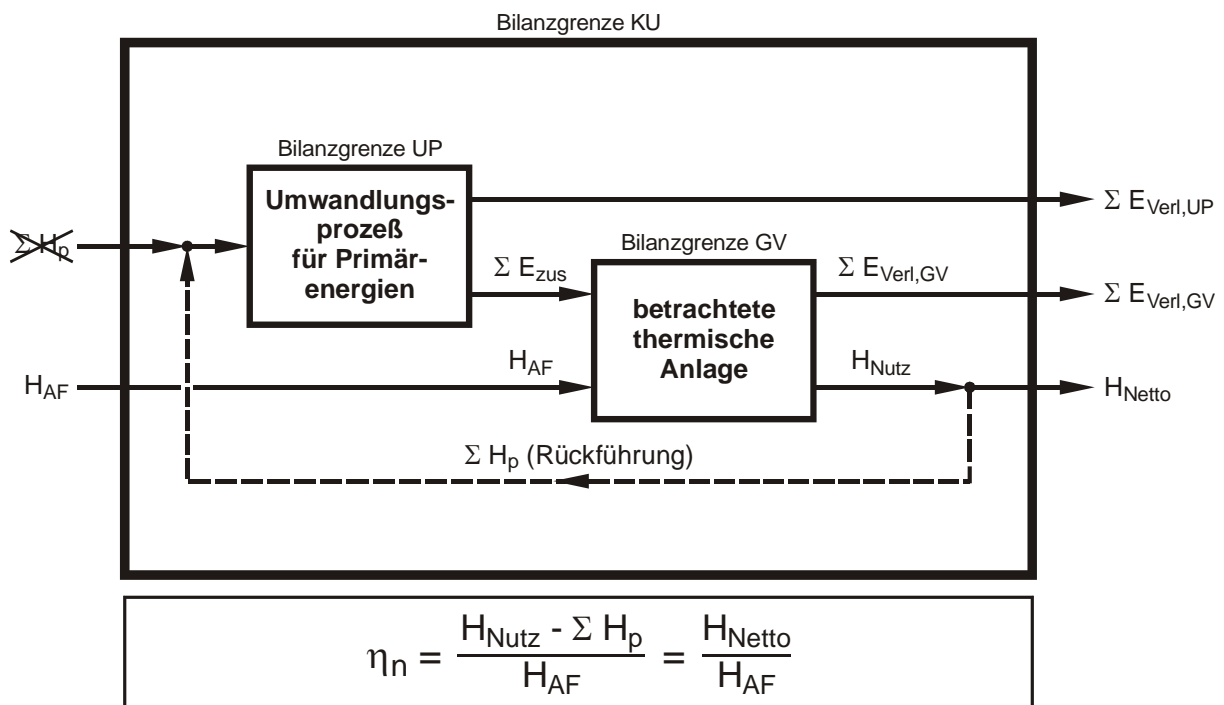


Abb. 1. Vereinfachte Energiebilanz zur Bildung des Nettoprimärwirkungsgrades η_n (Erklärung im Text) [14].

Abb. 1 gestrichelt dargestellt. Es verbleibt damit als Aufwand nur noch die zugeführte Abfallenergie H_{AF} und als Nutzen die Nettoenergie H_{Netto} , so dass sich auf diese Weise der sog. Nettoprimärwirkungsgrad ergibt.

Hier ist es sehr wichtig darauf hinzuweisen, dass die Substitution von einer Energieart (z. B. Erdgasenthalpie) durch eine andere (z. B. erzeugte Dampfenthalpie) in der Regel nicht im gleichen Verhältnis (1:1) erfolgen kann, d.h., dass auch hier ein Energieaustauschverhältnis (s. o.) zu berücksichtigen ist.

Werden nun Abfallbehandlungskonzepte betrachtet, die Kombinationen aus mechanisch-biologischen Verfahren, Verfahren der Ersatzbrennstoffnutzung in der Grundstoffindustrie (z. B. Klinkerbrennprozess) und thermische Abfallbehandlungsanlagen enthalten (z. B. [15]), so sind die Bilanzgrenze und die Zielstellungen entsprechend zu erweitern.

Die Abb. 2 zeigt beispielhaft einen Vergleich zwischen einem herkömmlichen System (HkS), bestehend aus den getrennten Einzelprozessen mit

- dem Einsatz des Restabfalls aus Hausmüll in einem klassischen Müllkraftwerk (A1+T1) und
- einem Hochtemperaturprozess zur Grundstoffherstellung (vereinfacht dargestellt, hier als Verfahrenslinie G1 bezeichnet, z. B. Zementklinkerbrennprozess)

und einem Verbundsystem (VbS), bestehend aus

- einer Vorbehandlung (A2, A3, ...),
- dem Einsatz einer heizwertreichen Restabfallfraktion in einem Hochtemperaturprozess zur Produktion von Grundstoffen (G1),

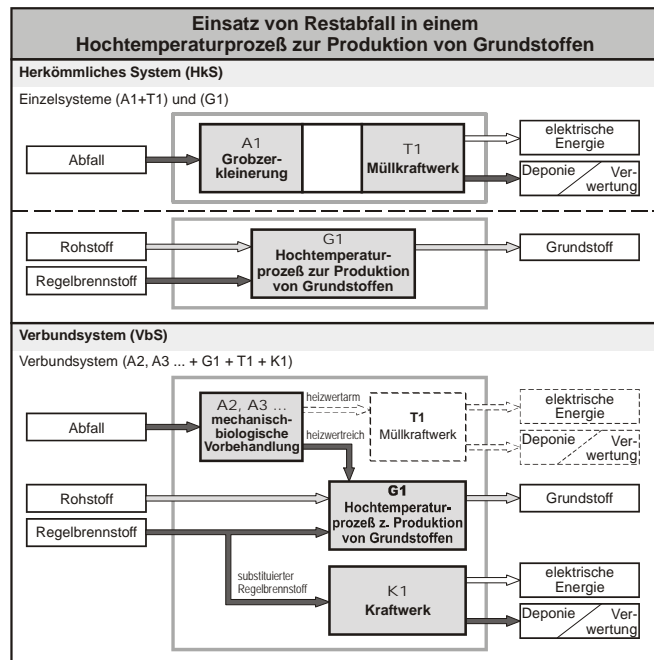


Abb. 2. Herkömmliches System bestehend aus Abfallbehandlung in einem Müllkraftwerk und Regelbrennstoffeinsatz in einem Grundstoffherstellungsprozess im Vergleich zu einem Verbundsystem bestehend aus Vorbehandlung und anschließendem Einsatz einer heizwertreichen Restabfallfraktion in einem Grundstoffherstellungsprozess und einer eventuell verbleibenden heizwertarmen Restabfallfraktion in einem Müllkraftwerk [14].

- der Behandlung einer eventuell verbleibenden heizwertarmen Restabfallfraktion in einem Müllkraftwerk (T1) und
- der gedanklichen Umsetzung der eingesparten Regelbrennstoffenergie in elektrische Energie in einem konventionellen Kraftwerk (K1), da die energetische Gegenüberstellung der Systeme hier auf Basis der elektrischen Energie erfolgen soll und die Systeme bei gleichen Eintrittsbedingungen (Inputgleichheit) anhand unterschiedlicher Ergebnisse (am Austritt) verglichen werden.

Insgesamt kann damit das herkömmliche System als Verfahrenslinie (A1+T1) und (G1) sowie das Verbundsystem als Verfahrenslinie (A2, A3, ..., +G1+T1+K1) betrachtet werden.

Für beide Verfahrenslinien können nun, wie zuvor anhand Abb. 1 dargestellt, Netto-primärwirkungsgrade und darüber hinaus weitere spezifische Kennziffern ermittelt werden und für einen Vergleich zueinander ins Verhältnis gesetzt werden. Damit ergibt sich ein so genanntes Nutzenergieverhältnis z

$$z = \frac{\eta_{n, \text{Verbundsystem}}}{\eta_{n, \text{Herkömmliches System}}} = \frac{\text{Nutzenergie}_{n, \text{VbS}}}{\text{Nutzenergie}_{n, \text{HkS}}}$$

Erst nach dieser kumulierten Betrachtung kann aufgrund des Nutzenergieverhältnis z eine Aussage über den Nutzen z. B. des Ersatzbrennstoffeinsatzes getroffen werden. Es wird bei der Darstellung in Abb. 2 deutlich, dass sich auch bei einem höheren spezifischen Energieeinsatz für den Stoffbehandlungsprozess im Verbundsystem aufgrund eines besseren Wirkungsgrades bei der Erzeugung von elektrischer Energie in dem (gedachten) Kraftwerk gegenüber dem in einem Müllkraftwerk, ein Nutzen des Ersatzbrennstoffeinsatzes ergeben kann. Entscheidend dabei sind allerdings der Aufwand bei der Ersatzbrennstoffherstellung, die dabei erzielte Qualität des Ersatzbrennstoffes und das Substitutionsverhältnis im Stoffbehandlungsprozess. Das Nutzenergieverhältnis z hängt naturgemäß von einer Reihe von Randbedingungen ab, die durch die Prozessbedingungen bzw. die Prozessführung vorgegeben werden. Die Abb. 3 zeigt ein Beispiel, wie sich das Nutzenergieverhältnis in einem ganz bestimmten Verfahrenvergleich eines herkömmlichen Abfallbehandlungsverfahrens mit einem Verbundsystem (vgl. Abb. 2) bei Variation des Abfallheizwertes, des Aufwandes bei der Ersatzbrennstoffherstellung, dem Wirkungsgrad des Kraftwerkes usw. verändert. Aus den Darstellungen im Zusammenhang mit dem Energieaustauschverhältnis wird deutlich, dass keineswegs ein linearer Zusammenhang zwischen dem Nutzenergieverhältnis und dem Substitutionsverhältnis Ersatzbrennstoff zu Primärbrennstoff im Stoffbehandlungsprozess bestehen muss. Geringere Heizwerte des erzeugten Ersatzbrennstoffes bedeuten mit zunehmendem Substitutionsverhältnis eine entsprechende Heizwertverringerung des Mischbrennstoffes aus Primär- und Ersatzbrennstoff. Mit abnehmendem Heizwert steigt jedoch das Energieaustauschverhältnis stärker an, d. h., es ist dann entsprechend mehr Ersatzbrennstoff für den Prozess bei gleichem Produktionsergebnis und gleicher Einsparung an Primärenergie (bzw.

Erzeugung an elektrischer Energie im gedachten Kraftwerk) erforderlich. Damit steigt der für die Ersatzbrennstoffherstellung erforderliche Restmüllstrom ebenfalls an. Für den Einzelprozess im Vergleich bedeutet ein Anstieg der Restmüllmenge allerdings eine Erhöhung der erzeugten Energie. Diese einfachen Überlegungen zeigen, dass sich das Nutzenergieverhältnis mit dem Substitutionsverhältnis laufend ändern muss. Es sei an dieser Stelle daher deutlich darauf hingewiesen, dass Betrachtungen, bei denen von vorn herein ein linearer Zusammenhang zwischen dem Nutzenergieverhältnis und dem Substitutionsverhältnis besteht, die energieverfahrenstechnischen Erfordernisse der Brennstoffsubstitution, wie sie hier zusammengefasst in den vorangegangenen Abschnitten und insbesondere im Zusammenhang mit den Prozessmodellen dargestellt sind, nicht in entsprechendem Maße berücksichtigen.

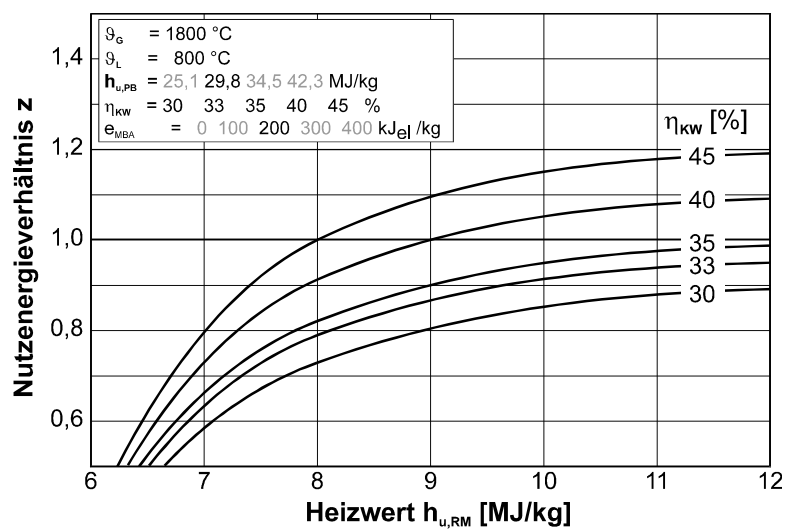


Abb. 3. Elektrisches Nutzenergieverhältnis in Abhängigkeit vom Abfallheizwert für verschiedene Kraftwerkswirkungsgrade [10].

5 Bilanzmodelle – Beispiele

Die dargestellten Grundlagen für die Bilanzierung eines Verfahrens für die Aufbereitung und den Einsatz von Ersatzbrennstoffen sollen nun an einem konkreten Anwendungsbeispiel, der Substitution von Regelbrennstoff im Zementklinkerbrennprozess, dargestellt werden (Bilanzschema entsprechend Abb. 2). Um die Bedeutung der verschiedenen Möglichkeiten der Brennstoffzugabe und den Einfluss des entsprechenden Energieaustauschverhältnisses der Prozessführung E_{PF} zu verdeutlichen, wird hier nur die Brennstoffzugabe über die Hauptfeuerung betrachtet. Die Modelle für den Einzel- und Koppelprozess unterliegt dabei folgenden Parametern:

- Herstellung von 1.000 kg Zementklinker,
- Primärenergieträger bei der Zementklinkerherstellung: Steinkohle, $h_{u,SK} = 29,6 \text{ MJ/kg}$,
- Energieaufwand für die Zementklinkerherstellung: $e_{KI} = 3,15 \text{ MJ/kg}_{KI}$,
- ausschließlich mechanische Behandlung des Abfalls (Klassierung),
- Energieaufwand für die mechanische Aufbereitung: $e_{MA} = 0,15 \text{ MJ/kg}$,
- Masse des zu behandelnden Abfalls: $m_{AF} = 1.000 \text{ kg}$ und
- betrachtete Substitutionsraten $\xi_{SBS/BS} = 0,1 / 0,25$ und $0,5$.

Die Zusammensetzung des Modellabfalls, die der Zusammensetzung eines Hausmülls angenähert wurde, einschl. der unteren Heizwerte der einzelnen Fraktionen können Tab. 1 entnommen werden. Durch Klassieren des Abfalls mittels eines Siebschnittes entstehen zwei Fraktionen, die im Weiteren als Leichtfraktion und als Schwerfraktion bezeichnet werden, wobei die Leichtfraktion als Ersatzbrennstoff im Zementwerk mitverbrannt werden soll, und die Schwerfraktion vor der Deponierung in einer Müllverbrennungsanlage thermisch behandelt wird.

Für die Berechnung der Zusammensetzung der Leichtfraktion (und der Schwerfraktion, die sich entsprechend durch die Zusammensetzung des zu behandelnden Abfalls und der Leichtfraktion ergibt), wurde ein mathematisches Berechnungsmodell auf Basis eines

Fraktion i	Masseanteil ξ_i [-]	unterer Heizwert $h_{u,i}$ [MJ/kg]
Papier	0,110	10,60
Kunststoffe	0,066	28,04
Organik	0,163	6,68
Metalle	0,039	-0,12
Glas	0,029	-0,17
Textilien	0,137	16,37
Sonstiges	0,458	9,29

Tab. 1. Zusammensetzung des Modellabfalls, eigenen Berechnungen auf Grundlage [15].

ein mathematisches Berechnungsmodell auf Basis eines

Simplexalgorithmus verwendet, das für einen bestimmten Heizwert der Leichtfraktion $h_{u,LF}$ (der vorgegeben wird) den Siebschnitt ermittelt, bei dem die Masse der erzeugten Leichtfraktion m_{SBS} maximal wird. Dabei wurden im Modell zwei Fälle unterschieden: 1. der mechanisch zu behandelnde Abfall entspricht in seiner Zusammensetzung dem Ausgangsabfall, und 2. aus dem Ausgangsabfall wurden die Fraktionen Papier, Glas, Metalle (die alternativ einer stofflichen Verwertung zugeführt werden können), Organika und die Fraktion „Sonstige“, die hauptsächlich aus mineralischen Bestandteilen besteht, aussortiert. D. h., im Fall 2 stehen für die Herstellung der Leichtfraktion bzw. des Ersatzbrennstoffes nur die heizwertreichen Fraktionen Kunststoffe und Textilien zur Verfügung. Die Masseverteilung auf die einzelnen Siebfraktionen wurde entsprechend den praktischen Ergebnissen einer Müllseparierung durch Absieben gewählt (s. Abb. 4 und [16]).

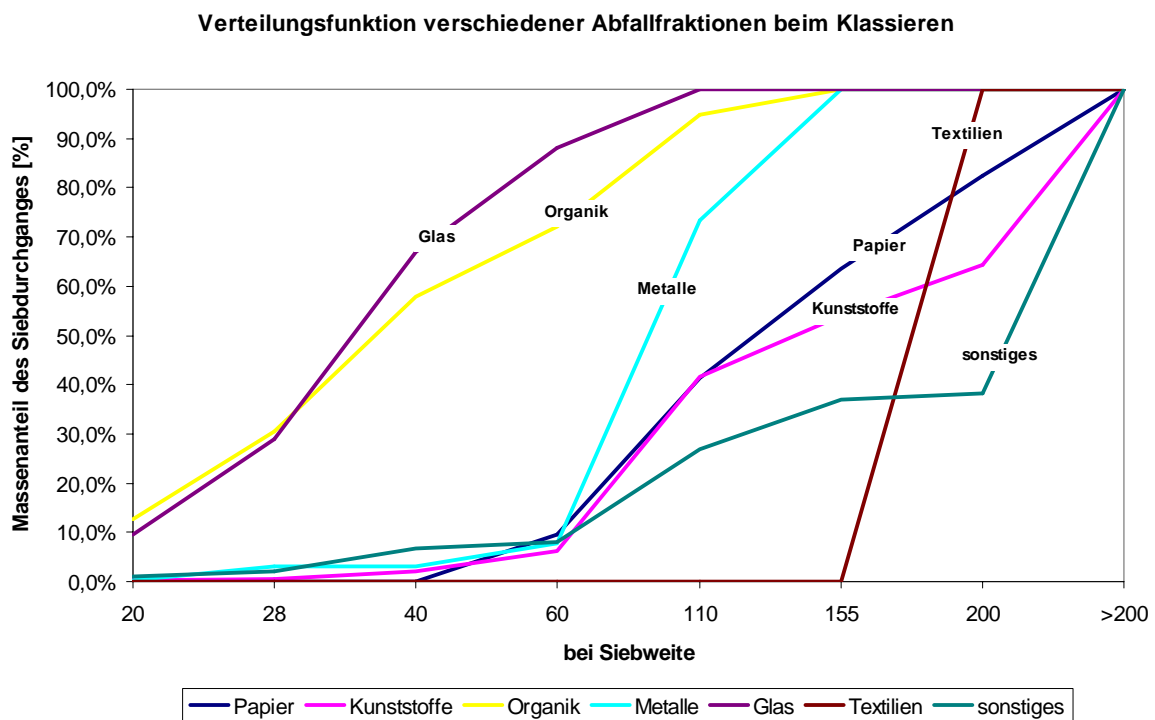


Abb. 4. Summenverteilung verschiedener Abfallfraktionen beim Klassieren [16].

Gibt man nun einen Heizwert für die Leichtfraktion bzw. den Ersatzbrennstoff vor, ergibt sich (nach der Aufbereitung) über den betrachteten Anteil der Leichtfraktion $\xi_{SBS/BS}$ einerseits der Heizwert des Mischbrennstoffes (der aus dem Primärenergieträger und dem Ersatzbrennstoff besteht) und gleichzeitig eine Elementarzusammensetzung für den Mischbrennstoff. Über die Verbrennungsrechnung kann nun das Energieaustauschverhältnis in der Hauptfeuerung $E_{RK1,9}$ berechnet werden, aus dem sich der Brennstoffbedarf für den Klinkerbrennprozess ergibt. Aus dem berechneten Brennstoffbedarf erhält man nun einerseits die Menge an Primärbrennstoff, die entweder eingespart werden kann, oder zusätzlich in den Prozess eingetragen werden

muss. Andererseits ergibt sich die Menge an bereitzustellender Leichtfraktion, aus der sich wiederum die gleichzeitig entstehende Menge Schwerfraktion und in der Summe aus beiden, die erforderliche Menge an Abfall zur mechanischen Behandlung ergibt. Ist nun die Menge an zu behandelndem Abfall geringer als die Menge des gesamt anfallenden Abfalls ($m_{AF} = 1.000 \text{ kg}$), muss die Differenz aus beiden ebenfalls einer thermischen Behandlung in einer Müllverbrennungsanlage zugeführt werden.

Ist die Menge des mechanisch zu behandelnden Abfalls größer als die Bilanzmenge, kann die Bilanzierung für diesen Fall nicht durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Berechnung sind in Abb. 5 dargestellt.

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass sich durch den Einsatz von Ersatzbrenn-

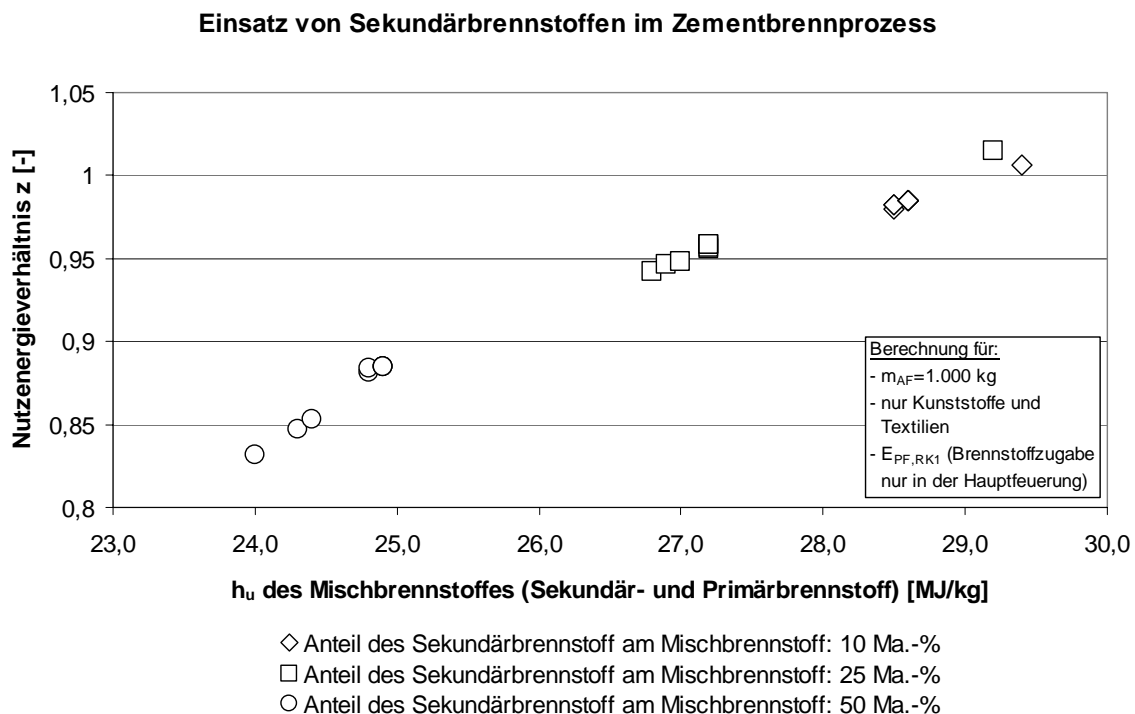


Abb. 5. Abhängigkeit des Nutzenergieverhältnisses vom Heizwert des Mischbrennstoffes bei alleiniger Brennstoffzufuhr über die Hauptfeuerung. Berücksichtigung der Fraktionen Kunststoffe und Textilien für die Herstellung des Sekundärbrennstoffes .

stoffen in der Hauptfeuerung des Zementdrehrohrofens bei einer vereinfachten, mechanischen Aufbereitung von Hausmüll mit der gewählten Zusammensetzung nur in Einzelfällen Nutzenergieverhältnisse $z > 1$ erreichen lassen. Dies hat folgende, wesentliche Ursachen (s. Abb. 5):

- Da das Energieaustauschverhältnis in der Prozessführung E_{PF} bzw. $E_{RK1,9}$ nie kleiner als 1 ist (keine der Hausmüllfraktionen weist einen höheren Heizwert auf

als der Primärenergieträger Steinkohle, $E_{PF,min} = 1,03$), wird immer mehr Energie für den betrachteten Prozess (Klinkerbrennprozess) benötigt als im Einzelprozess.

- Umso höher der Anteil Sekundärbrennstoff am Mischbrennstoff (Substitutionsrate $\xi_{SBS/BS}$) gewählt wird,
 - umso geringer wird der Heizwert des Mischbrennstoffes und
 - umso größer ist das Energieaustauschverhältnis,
 - d.h. umso geringer ist das Nutzenergieverhältnis.
- Umso höher der Heizwert des Sekundärbrennstoffes ist (was eine Verringerung von $E_{RK1,9}$ zur Folge hat), umso größer wird die Menge Restabfall aus der MBA mit einem geringeren Heizwert als der betrachtete Hausmüll. Dieser Restabfall muss dann mit einem entsprechend geringerem Wirkungsgrad in einer MVA thermisch behandelt werden.

Aus diesen Zusammenhängen folgt wiederum, dass bei Einsatz von Sekundärbrennstoffen im Zementklinkerbrennprozess die genannten Kriterien der Prozessführung und Prozessoptimierung (insbesondere die Brennstoffstufung, aber auch Möglichkeiten der Brennstoff- und Luftvorwärmung) eine wichtige Rolle spielen. Aus den Verhältnissen in Abb. 5, wo eine Vielzahl von Fällen zwischen $z = 0,83$ bis $1,02$ dargestellt sind, zeigt sich die große Spannbreite der zu untersuchenden Randbedingungen, um sicherzustellen, dass der jeweilige Einsatz von Sekundärbrennstoffen auch wirklich zu einer Substitution von Primärenergie führt.

6 Zusammenfassung

Bislang erfolgt noch keine auf den Anwendungsfall orientierte bzw. optimierte Herstellung von Ersatzbrennstoffen unter brennstofftechnischen Gesichtspunkten. Vielmehr werden Ersatzbrennstoffe unter Aspekten wie Heizwert oder auch Schadstoffgehalt erzeugt und danach der Anwendungsfall gesucht. Ersatzbrennstoffe sind, wie die Bezeichnung selbst ausdrückt, für den Ersatz von Regelbrennstoffen (fossile Brennstoffe) in Kraft- und Prozessfeuerungen bestimmt. Ein Ersatzbrennstoff ist dann geeignet, wenn er nach einer entsprechenden Aufbereitung einerseits die technischen Anforderungen im Prozess erfüllt und andererseits eine günstige Energie- bzw. Ökobilanz im Vergleich zu anderen (Ersatz-) Brennstoffen aufweist.

Im Gegensatz zu den fossilen Brennstoffen sind die so genannten Ersatzbrennstoffe, zu denen u. a. Biomassen, brennbare Abfälle bzw. Fraktionen und Schlämme zählen, bis jetzt noch nicht als Brennstoff und bezüglich ihres Potenzials als Rohstoffe charakterisiert. Dadurch ist es wiederum nicht möglich, einheitliche Standards für deren Herstellung bzw. Aufbereitung festzulegen, was die Produktion von Ersatzbrennstoffen, sowohl im Hinblick auf die technische Umsetzung, als auch bezüglich der Wirtschaftlichkeit entsprechender Anlagen behindert.

Um Ersatzbrennstoffe im Markt unterzubringen, müssen in zunehmendem Maße neben Heizwert und Schadstoffgehalt auch andere brennstofftechnische Eigenschaften, wie z.B. Gehalt an Flüchtigen, Reaktions- bzw. Zünd-, Ausbrand- und Korrosionsverhalten berücksichtigt werden. Die Berücksichtigung dieser Aspekte wiederum bedeutet aus brennstoff-technischer Sicht eine auf den Anwendungsfall orientierte bzw. optimierte Herstellung von Ersatzbrennstoffen. Darüber hinaus sind aus ökologischer Sicht vor dem eingangs genannten Kriterium, dass Ersatzbrennstoffe Regelbrennstoffe ersetzen müssen, und dabei die gesamte Verfahrenskette eine positive Energiebilanz aufweisen muss, die Möglichkeiten der Optimierung mechanisch-biologischer Prozesse und die bei den thermischen Verfahren bestehenden Optimierungsmöglichkeiten weiterzuentwickeln. In diesem Zusammenhang sind geeignete Optimierungsstrategien, unterstützt durch mathematische Modelle z.B.

- zur Aufteilung der Stoffströme in der mechanisch-biologischen Behandlung mit der Bedingung einer bestimmten Zusammensetzung der Ersatzbrennstoffe bei möglichst geringem Eigenenergieeinsatz und möglichst hohem Anteil an direkt weiter verwertbaren Fraktionen bzw. Wertstoffen und
- zu den Auswirkungen von Maßnahmen der Prozessführung bei thermischen Prozessen (Luftstufung, Brennstoffstufung, Luft- und Brennstoffvorwärmung, Abgasrückführung usw.)

zu entwickeln.

Vor diesem Hintergrund besteht nach wie vor ein Forschungs- und Entwicklungspotenzial mit den Schwerpunkten:

- Entwicklung von Methoden zur Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen im Hinblick auf das Abbrandverhalten in realen Feuerungen und der

-
- anwendungsorientierten Herstellung von Ersatzbrennstoffen und der Optimierung der Einzelprozesse der Herstellungs-, Verwertungs- und Entsorgungsverfahren, d.h. der Optimierung der gesamten Verfahrenskette.

7 Symbole und Abkürzungen

Symbole und Abkürzungen

ϑ	Temperatur
η	Wirkungsgrad
Σ	Summe
ξ	Massenanteil
A1,2,3...	Verfahrensbausteine Abfallbehandlung
e	Energie, spezifischer Energiebedarf
E	Energie, Energieaustauschverhältnis
EBS	Ersatzbrennstoff
EVA	Energieverwertungsanlage
G1	Verfahrensbaustein Hochtemperaturprozess zur Grundstoffherstellung
GV	Gesamtverfahren
h	Heizwert
H	Enthalpie
HkS	herkömmliches System
i	Fraktion
KU	Bilanzraum
K1	Verfahrensbaustein Kraftwerk
M	Masse
MBA	mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlage
MVA	Müllverbrennungsanlage
T1	Verfahrensbaustein Müllkraftwerk
UP	Umwandlungsprozess
VbS	Verbundsystem
z	Nutzenergieverhältnis

Indizes (tiefgestellt)

ϑ	Temperatur
AF	Abfall
BS	Brennstoff
G	Gas
GV	Gesamtverfahren
KI	Klinker
KW	Kraftwerk
L	Luft

LF	Leichtfraktion
MA	mechanische Aufbereitung
MBA	Mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlage
min	minimal, Mindest-
n, Netto	Netto
Nutz	Nutzen, Nutzenergie
P	Primär
PB	Primärbrennstoff
PF	Prozessführung
RK1	Rührkessel, 1. Rührkessellement
RM	Restmüll
SBS	Sekundärbrennstoff
SK	Steinkohle
u	unterer (Heizwert)
UP	Umwandlungsprozess
Verl	Verluste
zus	Zusatz-

8 Quellenverzeichnis

- [1] Scholz, R.; Beckmann, M.; Jager, J.; Rüppel, F.; Horeni, M.; Szpadt, E.: Substitution von Primärbrennstoffen durch Sekundärbrennstoffe. Entsorgungsgemeinschaft der Deutschen Entsorgungswirtschaft e.V. – EdDE Dokumentation 5, 2003.
- [2] Kehl, P.; Scharf, K.-F.; Scur, P.; Wirthwein, R.: Die Betriebsergebnisse aus den ersten 30 Monaten mit der neuen Ofenlinie 5 im Zementwerk Rüdersdorf. ZKG INTERNATIONAL 51 (1998) No. 8, S. 410 – 426.
- [3] Stadtmüller, J.; Christen, von F.-E.; Schmidt, R.: Kraftwerksintegrierte Pyrolyse von heizwertreichen Ersatzbrennstoffen. VDI-Berichte 1540. VDI Verlag GmbH Düsseldorf 2000, ISBN: 3-18-091540-4.
- [4] Vehlow, J.: Neues zum Thema Mitverbrennung oder Müllverbrennung. Schriftenreihe des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes, Nr. 151, S. 35 – 46. 2002.
- [5] Quicker, P.; Fojtik, F.; Mocker, M.; Faulstich, M.: Wettbewerbssituation auf dem Ersatzbrennstoffmarkt. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.: Ersatzbrennstoffe 4 – Optimierung der Herstellung und der Verwertung. TK Verlag Karl-Thomé-Kozmiensky, 2004, ISBN 3-935317-18-2, S. 361 ff.
- [6] Hoenig, V.: Emissionen beim Einsatz von Sekundärbrennstoffen in Drehofenanlagen der Zementindustrie. Wissenschaftliche Konferenz „Einsatz von industriellen und kommunalen Abfällen im Zementherstellungsprozess“, Opole-Jarnoltów, 15.-16. Oktober 1998, ISSN 0860-9160, S.45 – 54.
- [7] Sander, H.J.: Mitverbrennung von Ersatzbrennstoffen aus aufbereiteten Siedlungsabfällen. VDI Bildungswerk 430403, 13./14. März 2000, Düsseldorf.
- [8] 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>.
- [9] 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.
- [10] Beckmann, M.; Scholz, R.: Energetische Bewertung der Substitution von Brennstoffen durch Ersatzbrennstoffe bei Hochtemperaturprozessen zur Stoffbehandlung, Teil 1 u. 2. ZKG INTERNATIONAL 52 (1999) No. 6 u. 8.
- [11] Scholz, R.; Beckmann, M.: Kriterien zur Substitution von Regelbrennstoffen durch Ersatzbrennstoffe. 11. Kasseler Abfallforum "Bio- und Restabfallbehandlung", 20. – 22. 04. 1999, K. Wiemer, M. Kern (Hrsg.), Baeza-Verlag, Witzenhausen, ISBN 3-928673-29-7, S. 613–647.
- [12] Beckmann, M.; Horeni, M.; Scholz, R.; Rüppel, F.: Notwendigkeit der Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe 3 - Immissions- und Gewässerschutz, Qualitätssicherung,

Logistik und Verwertung, Deponierung der Schwerfraktion. TK-Verlag Thomé-Kozmiensky, Dez. 2003, S. 213-230, ISBN 3-935317-15-8.

- [13] Scholz, R.; Beckmann, M.: Substitution von Brennstoffen und Rohstoffen durch Abfälle in Hochtemperaturprozessen. 11. DVV-Kolloquium, Braunschweig, September 1998, S. 21 – 46, ISBN 3-00-003384-X.
- [14] 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.
- [15] Umweltbundesamt (Hrsg.): Möglichkeiten der Kombination von mechanisch-biologischer und thermischer Behandlung von Restabfällen. Im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung BMBF, Förderkennzeichen: 14711114, 1998.
- [16] Tabasaran, O.: Separierung schwermetallhaltiger Hausmüllkomponenten durch Absieben. Referat beim 45. Abfalltechnischen Kolloquium an der TU Stuttgart. Müll und Abfall 1/84.