

Notwendigkeit der Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen

Michael Beckmann, Martin Horeni, Reinhard Scholz und Frank Rüppel

1.	Einsatzmöglichkeiten von Ersatzbrennstoffen	214
2.	Brennstofftechnische Eigenschaften	216
3.	Brennstofftechnische Untersuchungen	218
4.	Optimierung der Prozessführung.....	220
5.	Bilanzierung der gesamten Verfahrenskette	224
6.	Quellen	229

In Prozessen der Energieumwandlung zur Bereitstellung thermischer und elektrischer Energie – z.B. in Heiz- und Kraftwerken – sowie in Hochtemperaturprozessen zur Stoffumwandlung und -behandlung – z.B. im Zementklinkerbrennprozess oder bei der Stahlherstellung – werden derzeit in der Bundesrepublik etwa 12,1 TJ an Primärenergieträgern in Form von fossilen Brennstoffen (Erdgas, Heizöl, Braun- und Steinkohlen) eingesetzt. Das entspricht etwa 84 % des Gesamtprimärenergieeinsatzes [4]. Im Hinblick auf die Erzielung einer hohen Effizienz bei der Energieumwandlung, der Verringerung von Emissionen und Korrosionserscheinungen, der Verminderung von Verschlackungen, einer möglichst hohen Produktqualität und Anlagenverfügbarkeit usw. sind in diesen Prozessen jeweils angepasst an die Eigenschaften der Primärenergieträger gezielt Anlagensysteme – z.B. Kessel, Brennersysteme – entwickelt und die Prozessführung optimiert worden.

Gegenwärtige Entwicklungen, z.B. zur NO_x -Minderung im Zementklinkerbrennprozess oder zur Wirkungsgradsteigerung im Kraftwerksbereich zeigen, dass dieser Prozess weiter anhält und das Entwicklungspotential noch nicht ausgeschöpft ist. Die brennstofftechnische Charakterisierung und die Optimierung der Prozessführung sind Voraussetzung für den Einsatz fossiler Brennstoffe sowie für die Beurteilung ihrer Austauschbarkeit. Für fossile Brennstoffe liegen umfangreiche Erfahrungen zu den brennstofftechnischen Eigenschaften, die sich grob in

- chemische,
- mechanische,

- kalorische und
- reaktionstechnische Eigenschaften

unterteilen lassen, vor, und es werden für die Prüfung der jeweiligen Einsatzmöglichkeiten dieser Primärbrennstoffe diesbezügliche Untersuchungen vorgenommen. In Abhängigkeit von den Eigenschaften und brennstofftechnischen Kriterien eines Primärbrennstoffes, kann dieser in eine Systematik eingeordnet werden – z.B. die Einteilung in Brenngase, Heizöle, das Klassifikationssystem für Kohlen.

Die Substitution von Primärbrennstoffen durch Ersatzbrennstoffe in Prozessen der Energieumwandlung und in Hochtemperaturprozessen zur Stoffumwandlung hat in den vergangenen Jahren ständig zugenommen. Ziele der Substitution sind dabei u.a. die Reduzierung der Brennstoffkosten und die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit der Anlagen, die Reduzierung der Emission fossilen Kohlenstoffdioxides – z.B. im Rahmen der Selbstverpflichtung der Industrie zur CO₂-Reduktion – und die energieeffiziente Nutzung der in Abfällen enthaltenen Energie, u.a. im Hinblick auf die Umsetzung der Abfallablagereverordnung.

Mit dieser Zielstellung, Ersatzbrennstoffe in Prozessen der Energieumwandlung und Hochtemperaturprozessen der Stoffumwandlung einzusetzen, ergibt sich für Ersatzbrennstoffe – wie für Primärbrennstoffe – die Notwendigkeit einer brennstofftechnischen Charakterisierung entsprechend der prozesseitigen Anforderungen. Darüber hinaus ist in gleicher Weise, wie das bei Einsatz von Primärbrennstoffen geschieht, die Optimierung der Prozessführung auch bei Einsatz von Ersatzbrennstoffen erforderlich. Ein weiteres Optimierungspotential ergibt sich, wenn die Prozesse der Herstellung der Ersatzbrennstoffe und der Behandlung der verbleibenden, heizwertarmen Restfraktionen berücksichtigt werden, d.h. die gesamte Verfahrenskette betrachtet wird. Für die Beurteilung des Nutzens des Ersatzbrennstoffeinsatzes sind Stoff- und Energiebilanzen für die einzelnen Prozesse und die gesamte Verfahrenskette durchzuführen [10].

Im vorliegenden Beitrag wird, nach einer kurzen Darstellung der Einsatzmöglichkeiten und -potentiale von Ersatzbrennstoffen, zusammenfassend auf deren brennstofftechnische Eigenschaften, die Untersuchung dieser Eigenschaften und sich ergebende Fragen der Prozessführung und -optimierung eingegangen.

Kap. 1.

Einsatzmöglichkeiten von Ersatzbrennstoffen

Ersatzbrennstoffe können grundsätzlich in Prozessen der **Grundstoffindustrie**, wie:

- der Bindemittelindustrie – Zementklinkerbrennprozess, Brennprozesse der Kalk- und Gips Herstellung, 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 – 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 [9] oder die Pyrolyse von Ersatzbrennstoffen in einem Drehrohr und die Zufuhr des Pyrolysegases und des Pyrolysekokes, nach vorheriger Aufbereitung, zum Kessel des Kraftwerkes Hamm [14] genannt werden.

In Abhängigkeit des jeweiligen Anwendungsprozesses und der Möglichkeiten der Beeinflussung der Prozessführung ergeben sich, wie einleitend bereits erwähnt, unterschiedliche Anforderungen an die Eigenschaften des Brennstoffes. Damit verbunden sind die jeweiligen Einsatzpotentiale für Ersatzbrennstoffe in den einzelnen Prozessen. Im Zementbrennprozess, der aufgrund der hohen Temperaturen, der guten Einbindung der mineralischen Phase des Brennstoffes, der geringeren Anforderungen an die Abgasreinigung usw. relativ unempfindlich gegenüber Änderungen in der Brennstoffzusammensetzung ist, werden heute bereits hohe Substitutionsraten erreicht. So betrug der Anteil der aus Ersatzbrennstoffen bereitgestellten Prozessenergie im Jahr 2001 über 30 % am Gesamtbrennstoffenergieverbrauch. Allerdings ist hier der Anteil von Ersatzbrennstoffen aus getrennt erfassten Abfällen – Altreifen, Altöl, produktionsspezifische Industrie- und Gewerbeabfälle – mit etwa 62 % sehr viel höher, als z.B. der Anteil von Ersatzbrennstoffen aus gemischt gesammelten Siedlungsabfällen (etwa 8 %)¹ [16, 17]. Anders stellt sich diese Situation im Bereich der Energieumwandlung in Kraftwerken dar, die aufgrund der Bau- und Betriebsweise – Brennstoffaufbereitung durch Mahlung, Zuführung zu den Brennern, Bauart und Anordnung der Brenner, konstruktive Beschränkungen bei der Wärmeauskopplung, nahestöchiometrische Fahrweise usw. – relativ hohe Anforderungen an den eingesetzten Brennstoff stellen und mit geringeren möglichen Substitutionsraten beaufschlagt werden.

Für die Abschätzung des Potentials für den Einsatz von Ersatzbrennstoffen wurden bereits eine Reihe von Studien durchgeführt, z.B. [5, 15]. Aus diesen ergeben sich in Abhängigkeit der gewählten Berechnungsgrundlagen Einsatzpotentiale für Ersatzbrennstoffe von etwa 7 bis 18 Mio. t [11]. Diesen standen im Jahr 2001 lediglich etwa 4 Mio. t/a derzeit eingesetzte Ersatzbrennstoffe gegenüber [15].

Die Voraussetzung, um Ersatzbrennstoffe in den vorgenannten Prozessen gezielt einsetzen zu können, ist, wie einleitend erwähnt, u.a. deren brennstofftechnische Charakterisierung. Hierzu gehören, neben Heizwert und Schadstoffgehalt auch andere brennstofftechnische Eigenschaften, wie Gehalt an flüchtigen Bestandteilen, Reaktions- und Zünd-, Ausbrand- und Korrosionsverhalten.

¹ Anteil am thermischen Energieeinsatz aus Ersatzbrennstoffen, Bezugsjahr 2001

Das Ziel für den Einsatz von Ersatzbrennstoffen sollte eine auf den Anwendungsfall orientierte und optimierte Herstellung von Ersatzbrennstoffen sein. Darüber hinaus sind vor dem Hintergrund, dass Ersatzbrennstoffe Primärbrennstoffe ersetzen müssen und dabei die gesamte Verfahrenskette eine positive Energiebilanz aufweisen muss, die Möglichkeiten der Optimierung mechanisch-biologischer und thermischer Verfahren weiter auszuschöpfen.

Kap. 2.

Brennstofftechnische Eigenschaften

Wie einleitend erwähnt, müssen für Ersatzbrennstoffe geeignete brennstofftechnische Kriterien definiert und bei den jeweiligen Prozessbedingungen berücksichtigt werden. Zur Beschreibung der chemischen und mechanischen Eigenschaften – die in erster Linie stoffliche Eigenschaften darstellen – dienen die **chemischen Eigenschaften** – Anteil nichtbrennbarer und brennbarer Bestandteile, Anteil Kunststoffe und sonstiger organischer Bestandteile, Elementar- und Spurenzusammensetzungen, Anteil von fixem Kohlenstoff, Gehalt an flüchtigen Bestandteilen und die verschiedenen Ascheerweichungspunkte – und die **mechanischen Eigenschaften** – Dichte der brennbaren und nicht brennbaren Substanz, Schütteeigenschaften des Materials wie Schüttdichte, -winkel, -fähigkeit usw., Mahlbarkeit, Korngrößenverteilung und die allgemeine Handhabung des Brennstoffes im Sinne der Lagerfähigkeit und der Zufuhr des Brennstoffes zur Anlage. Demgegenüber sind die kalorischen und reaktionskinetischen Eigenschaften eher zu den energetischen Eigenschaften eines Brennstoffes zu zählen.

Kalorische Eigenschaften – Heiz- und Brennwert, spezifischer Mindestluftbedarf, spezifische Mindestabgasmenge, adiabate Verbrennungstemperatur, Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit usw. – von Ersatzbrennstoffen können bereits jetzt mit Hilfe vereinfachter, für die Praxis jedoch tragfähiger mathematischer Modelle zu den Wechselwirkungen der Haupteinflussgrößen deutlich gemacht werden [2]. 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 großer Bedeutung sind.

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 Korrosionspotential nicht durch eine Größe wie den Chlorgehalt allein ausdrücken. Vielmehr ist das Korrosionspotential eines Brennstoffes als Summenparameter zu verstehen, der durch die chemischen, mechanischen und kalorischen Eigenschaften beeinflusst wird. Abschätzungen des durch einen Brennstoff zu erwartenden Korrosionspotentials sind z.B. auf Grundlage von Korrosionskennzahlen möglich, die im Wesentlichen auf dem Gehalt an Schwefel, Chlor und freien Alkalien im Brennstoff als Voraussetzung für Korrosionsprozesse – Chlorid-, Salzschnmelzen- und Hochtemperaturchlorkorrosion – basieren [3]. Für eine

weiterführende Betrachtung der Korrosionsprozesse sind darüber hinaus auch Fragen der Prozessführung zu berücksichtigen [13].

Zukünftige Entwicklungen im Hinblick auf eine umfassende brennstofftechnische Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen zeigen u.a. die aktuellen Arbeiten der Bundesgütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe. Nachdem der bisherige Schwerpunkt [5, 6, 7] u.a. in der Erarbeitung einheitlicher Methoden der Probenahme, der Analytik und von Richtwerten für umweltrelevante Parameter lag, wird dem Aspekt der Brennstoffklassifizierung bei den nationalen und internationalen (europäischen) Arbeiten zur Klassifikation und Gütesicherung von Ersatzbrennstoffen zukünftig verstärkt Rechnung getragen. Dabei werden zusätzlich zum vorhandenen Klassifikationssystem v.a. Überlegungen bezüglich der Aufnahme weiterer Angaben zu

- Stoffzusammensetzung – Wasser, Asche, biologisch abbaubare Bestandteile –,
 - Elementaranalyse – C, H, O, N, S, Cl, F –,
 - Kurzanalyse – fixer Kohlenstoff und flüchtige Bestandteile –,
 - Aschezusammensetzung und Ascheschmelzverhalten,
 - mechanischen Eigenschaften – Schüttdichte, Korngrößenverteilung – und
 - kalorischen und reaktionskinetischen Eigenschaften
- angestellt (Bild 1).

Stoffzusammensetzung		Spurenanalyse	
Wasser	Ma.-% r	As	mg/kg d
Asche	Ma.-% d	Be	mg/kg d
Biologisch abbaubare Bestandteile	Ma.-% d	Cd	mg/kg d
Kurzanalyse		Co	mg/kg d
Fixer Kohlenstoff	Ma.-% daf	Cr	mg/kg d
Flüchtige Bestandteile	Ma.-% daf	Cu	mg/kg d
Elementaranalyse		Hg	mg/kg d
C	Ma.-% daf	Mn	mg/kg d
H	Ma.-% daf	Ni	mg/kg d
O	Ma.-% daf	Pb	mg/kg d
N	Ma.-% daf	Sb	mg/kg d
S	Ma.-% daf	Se	mg/kg d
Cl	Ma.-% daf	Sn	mg/kg d
F	Ma.-% daf	Te	mg/kg d
Mechanische Eigenschaften		Tl	mg/kg d
Schüttdichte	kg/m ³ r	V	mg/kg d
Korngrößenverteilung	Ma.-%	Aschezusammensetzung/ Ascheschmelzverhalten	
Kalorische Eigenschaften		Al	mg/kg d
Brennwert	MJ/kg daf	Ca	mg/kg d
Heizwert	MJ/kg daf	Fe	mg/kg d
spezifischer Mindestluftbedarf	kg/kg daf	K	mg/kg d
spezifische Abgasmenge	kg/kg daf	Mg	mg/kg d
adiabate Verbrennungstemperatur	°C	Na	mg/kg d
Reaktionstechnische Eigenschaften		P	mg/kg d
Zünd- und Ausbrandverhalten		Si	mg/kg d
r	im Rohzustand	Ti	mg/kg d
d	trocken	S (min) oder Sulfatgehalt	mg/kg d
daf	trocken und aschefrei	Erweichungstemperatur	°C
		Halbkugeltemperatur	°C
		Fließtemperatur	°C

Bild 1: Vorschlag für die Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen

*Kap. 3.***Brennstofftechnische Untersuchungen**

Voraussetzung für die brennstofftechnische Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen sind diesbezügliche brennstofftechnische Untersuchungen, die nicht ohne weiteres von Primärbrennstoffen übernommen werden können, sondern auf die besonderen Eigenschaften der Ersatzbrennstoffe abgestimmt werden müssen.

Im Rahmen einer Studie [11] wurden an Proben aus einer mechanisch-biologischen Aufbereitungsanlage nach den einschlägigen DIN-Vorschriften Untersuchungen zu Wassergehalt, Aschegehalt, flüchtigen Bestandteilen, Kohlenstoff- und Wasserstoffgehalt, sowie Brenn- und Heizwert durchgeführt. Dabei wurden die Proben einer mechanischen Aufbereitung zugeführt, um die für die Standardanalysen geforderte Analysefeinheit von $< 200 \mu\text{m}$ für eine ausreichende Homogenisierung zu erreichen². Nach Entfernung der harten und sperrigen Bestandteile – überwiegend Inertmaterial, z.B. Glas, Keramik, Steine, Schrauben, Kugelschreiber usw. – von Hand und einer anschließenden Vorzerkleinerung in einer Schneidmühle, wurden die Proben in einer Universalmühle auf eine Partikelgröße $< 1 \text{ mm}$ aufgemahlen. Trotz der nicht vollständig erreichten geforderten Mahlfeinheit wurden die Proben gemäß den DIN-Vorschriften untersucht. Dabei konnte in den meisten Fällen bei den nach der Norm geforderten und durchgeführten Doppelbestimmungen eine Einhaltung der festgelegten Toleranzen erreicht werden. Die Abweichung zwischen zwei Bestimmungen betrug maximal 6 %. Die Ergebnisse der Analyse der entsprechend der vorgenannten Probenvorbereitung hergestellten Einzelproben wurden unter Berücksichtigung des aussortierten Materials rechnerisch auf die Ausgangsmasse der jeweiligen Probe korrigiert. Eine direkte Zumischung der während der Probenvorbereitung aussortierten Störstoffe zu der jeweiligen Einzelprobe vor der Analyse wurde nicht durchgeführt, da einige Voruntersuchungen bezüglich des Entgasungsverhaltens an den luftgetrockneten Ausgangsproben zu einem Aufschmelzen der Glasbestandteile führten. Dadurch kam es einerseits zu Anbackungen von geschmolzenem Material an den Reaktorwänden. Andererseits wurde organisches Material von der Glasschmelze umschlossen und konnte somit nicht mehr an der Reaktion teilnehmen. Das Einschmelzen brennbarer Anteile führt bei der Brennwertbestimmung im Kalorimeter zu Ungenauigkeiten, da die Probe nicht vollständig ausbrennen kann. Um diesen Effekt zu vermeiden, müssen v.a. die Glasbestandteile staubförmig zermahlen werden. Der Fehler durch den Anteil der Wärmekapazität der aussortierten anorganischen Materialien ist dabei vernachlässigbar.

In einer zusätzlichen Untersuchung konnte gezeigt werden, dass die Freisetzung der flüchtigen Bestandteile auch durch die stoffliche Zusammensetzung einer zu analysierenden Mischfraktion – 50:50-Ma.-% PVC mit Papier, Holz und

² Ob diese Anforderungen an die Analysefeinheit auch bei der Untersuchung von Ersatzbrennstoffen beibehalten werden kann, ist auch eine Frage weiterer Untersuchungen [5].

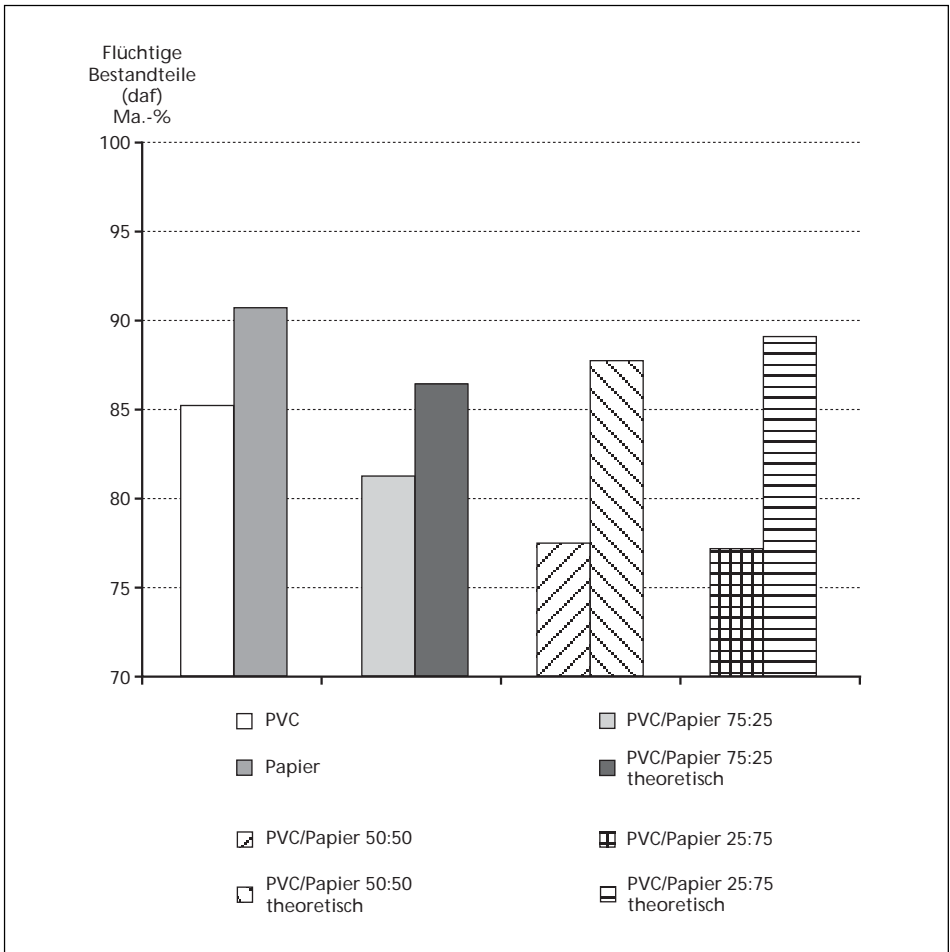


Bild 2: Gehalte an flüchtigen Bestandteilen – im trockenen und aschefreien Zustand – von verschiedenen PVC-Papier-Mischungen

Stroh – im Vergleich zur Analyse der Einzelfractionen bestimmt wird. Eine eingehendere Untersuchung der PVC-Papier-Mischung, bei der die Abweichung zwischen theoretisch zu erwartendem Wert und dem Analysenergebnis besonders ausgeprägt war, ergab eine steigende Diskrepanz mit sinkendem PVC- und steigendem Papieranteil (Bild 2).

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen zwei wesentliche Problemfelder bei Analysen inhomogener Abfallstoffgemische auf – die bekannten Schwierigkeiten bei der Probenahme und die Probenaufbereitung. Bei der Probenaufbereitung eines Abfallgemisches

- ist in erster Linie eine Homogenisierung erforderlich,
- muss unter Umständen eine Trennung der Fraktionen mit anschließender Zerkleinerung in unterschiedlichen Mühlen in Betracht gezogen werden,

- ist bei thermischen Analysen eine Aufmahlung erforderlich – zur Verhinderung des Einschlusses brennbarer Bestandteile von größeren aufschmelzenden Partikeln und fester Anbackungen im Reaktorgefäß – und
- kann bei der Bestimmung bestimmter Eigenschaften von Mischfraktionen – hier flüchtige Bestandteile – an Reinformen (PVC, Papier, Holz und Stroh) nicht ohne weiteres von additivem Verhalten ausgegangen werden.

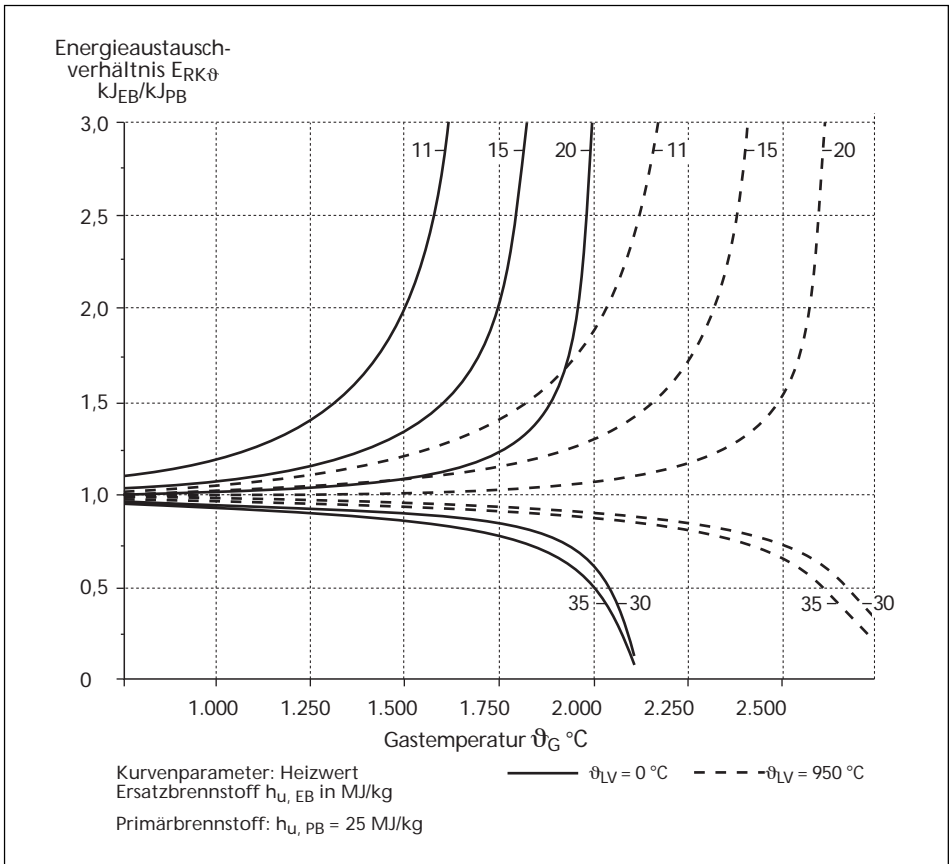
An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass zur Vermeidung von Erscheinungen wie ungleichmäßiger Ausbrand, Einschluss von Restkoks in aufschmelzenden Mineralstoffen usw., die sich bei der brennstofftechnischen Untersuchung zeigen, weitere Aufbereitungsschritte zur Zerkleinerung und Homogenisierung der Ersatzbrennstoffe je nach Einsatz in die jeweils vorgesehenen Feuerungssysteme erforderlich sind. Bei repräsentativer Probenahme und geeigneter Aufbereitung lassen sich weiterführende Untersuchungen an Rest- und Abfallstoffen vornehmen, um weiterreichende Rückschlüsse auf deren Betriebsverhalten zu erhalten und mögliche Probleme im Vorfeld eines Einsatzes (Brennstoffsubstitution) in einer großtechnischen Feuerung zu umgehen.

Kap. 4.

Optimierung der Prozessführung

Durch den Zusammenhang der Eigenschaften eines Brennstoffes mit seiner Anwendbarkeit in einem bestimmten Prozess einerseits und die Optimierungsfähigkeit des Prozesses im Hinblick auf den eingesetzten Brennstoff über die Prozessführung andererseits ergeben sich Anforderungen an die Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen. Dabei sind bei einem Brennstoffgemisch in Abhängigkeit von der jeweiligen Substitutionsrate zunächst die kalorischen Eigenschaften von grundlegender Bedeutung. Diese ermöglichen über den Heizwert bereits eine gewisse Vorauswahl bezüglich der einsetzbaren Primär- und Ersatzbrennstoffe. Weiter ist 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 in einem ersten Beispiel auf die für Fragen der Prozessoptimierungen hinsichtlich einer Luft- und Brennstoffvorwärmung wichtigen Abhängigkeiten zwischen Heizwert, Mindestluftbedarf und kalorischer Verbrennungstemperatur eingegangen werden. Bereits anhand theoretischer Überlegungen zum Einfluss der kalorischen Eigenschaften auf die energetische Wertigkeit eines Ersatzbrennstoffes im Vergleich zu einem Primärbrennstoff lässt sich der Einfluss einer Luftvorwärmung auf das Energieaustauschverhältnis, z.B. in der Haupt- bzw. Primärfeuerung im Zementbrennprozess, ableiten [11].


 Bild 3: Energieaustauschverhältnis E_{RK1} bei statischer Betrachtung

So ergibt sich bei einem gedanklichen Vergleich eines Prozesses, der mit einem Ersatzbrennstoff mit $h_{u, EB1} = 20$ MJ/kg ohne Luftvorwärmung betrieben wurde, mit einem zweiten Prozess, der nun mit einem Ersatzbrennstoff mit nur $h_{u, EBII} = 15$ MJ/kg jedoch mit gleichzeitiger Luftvorwärmung betrieben wird, bei Prozesstemperaturen oberhalb von $\vartheta_G > 1.600$ °C der Fall, dass der Ersatzbrennstoff EBII mit dem geringeren Heizwert energetisch höherwertiger ist, als der höherkalorige Ersatzbrennstoff EBI (Bild 3). D.h. das Energieaustauschverhältnis und damit die energetische Wertigkeit eines Brennstoffes ist nicht nur von den brennstofftechnischen, insbesondere den kalorischen Eigenschaften abhängig, sondern kann wesentlich durch die Prozessführung und die Optimierung, z.B. durch verbesserte Wärmerückgewinnung, beeinflusst werden.

Bei Luft- und Brennstoffvorwärmung muss jedoch berücksichtigt werden, dass der Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung wesentlich durch den Mindestluftbedarf l_{min} und das jeweilige Luftüberschussverhältnis λ bestimmt wird.

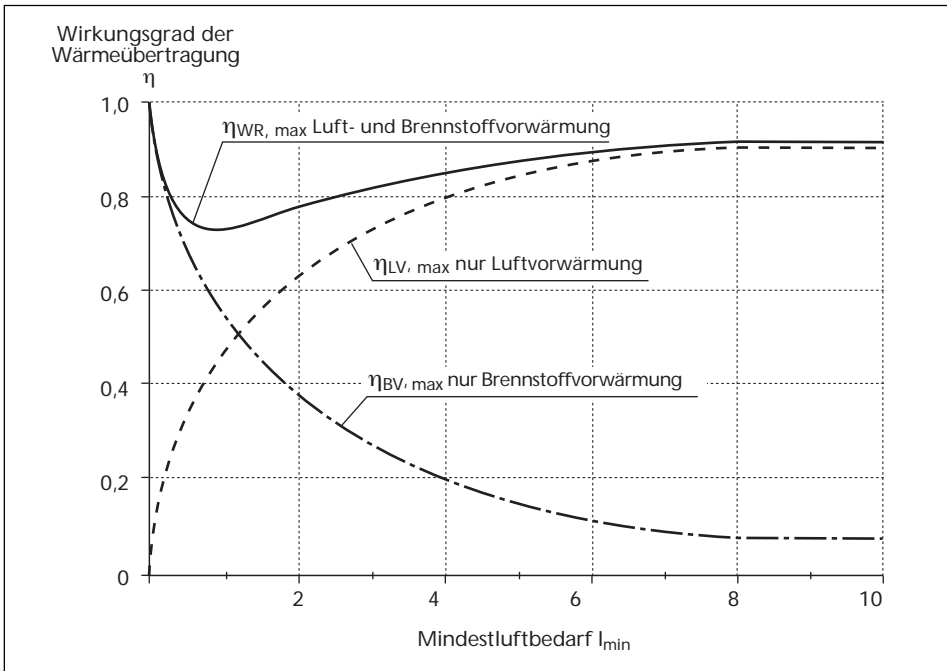


Bild 4: Maximale Wirkungsgrade für die Wärmerückgewinnung durch Luft- und/oder Brennstoffvorwärmung in Abhängigkeit vom Mindestluftbedarf des Brennstoffes

Quelle: Specht, E.; Jeschar, R.: Beurteilung von Industrieöfen bei Wärmerückgewinnung. Seminar zu Methoden der Energieeinsparung bei Industrieöfen, TU Clausthal, Institut für Energieverfahrenstechnik, 1990

Bild 4 zeigt die maximalen Wirkungsgrade $\eta_{LV, \max}$ und $\eta_{BV, \max}$ in Abhängigkeit vom Mindestluftbedarf I_{\min} . Eine Verbesserung der Wärmerückgewinnung $\eta_{WR, \max}$ durch eine Brennstoffvorwärmung ergibt sich bei Brennstoffen mit niedrigem Mindestluftbedarf und damit in der Regel nur bei heizwertschwachen Brennstoffen. Hinzu kommt, dass bei abnehmendem Heizwert das Mindestluftbedarfverhältnis $I_{\min, EB}/I_{\min, PB}$ und das Mindestabgasmengenverhältnis $v_{\min, EB}/v_{\min, PB}$ nicht im gleichen Maße wie das Heizwertverhältnis $h_{u, EB}/h_{u, PB}$ abnehmen. Auf diese Besonderheiten im Zusammenhang mit der Wärmerückgewinnung muss bei Substitution heizwertreicher Primärbrennstoffe durch schwachkalorige Ersatzbrennstoffe geachtet werden.

Ein weiteres Beispiel zu den Zünd- und Ausbrandeigenschaften sei im Zusammenhang mit der Zweitfeuerung im Zementbrennprozess 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 $\vartheta_G \approx 1.200 \text{ °C}$ ergeben sich auch bei einer Reduzierung des Heizwertes z.B. 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

Reifenschnitzel fallen in den Drehrohreinlauf und führen dort zu einem Temperaturanstieg. Durch unvollkommene Verbrennung kann sich die Verbrennung bis in den Vorwärmerbereich hineinziehen. In Bild 5 sind hierzu Ergebnisse aus Praxisuntersuchungen [8] dargestellt.

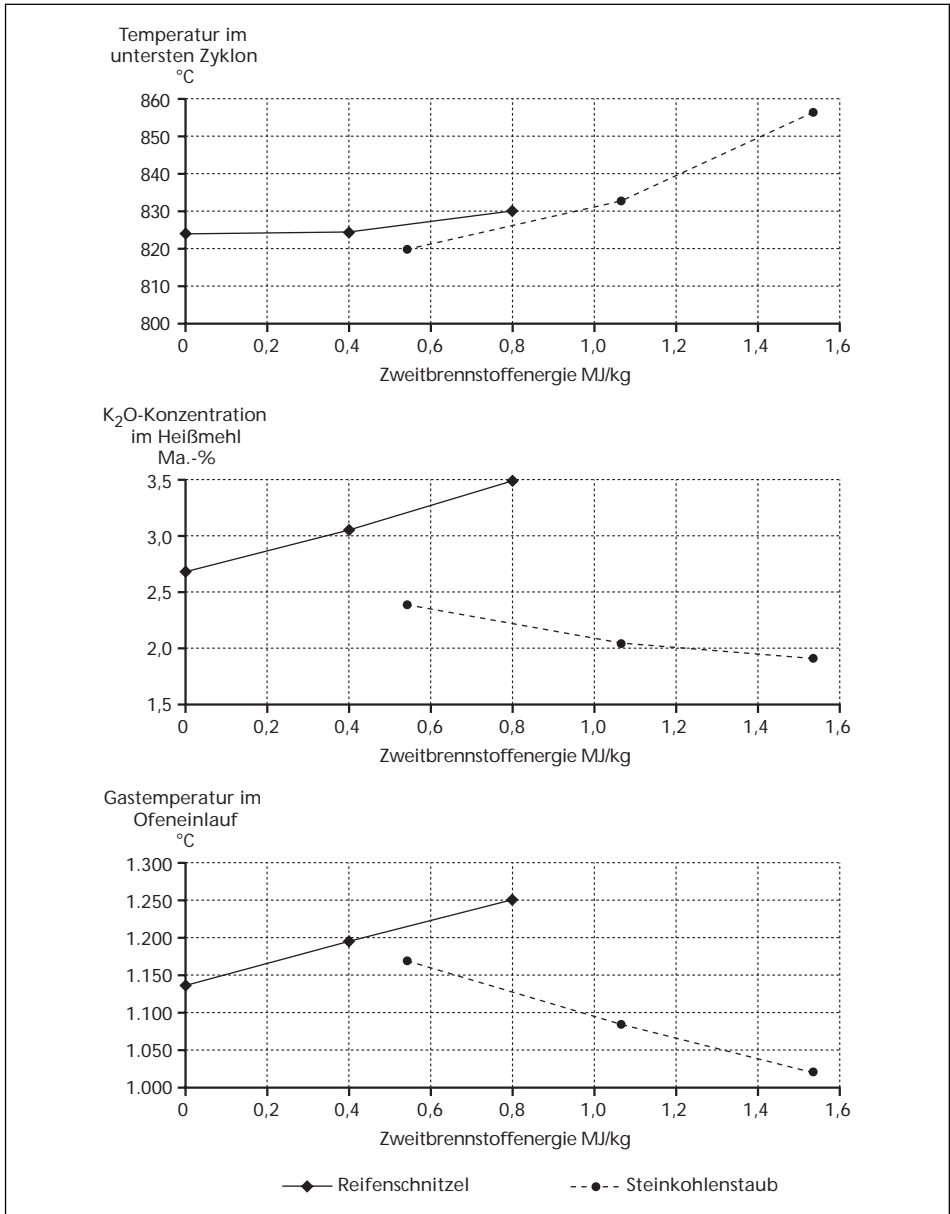


Bild 5: Beeinflussung der Prozessführung in Abhängigkeit von Ort und Zeit der Zweitbrennstoffzufuhr

Quelle: Huckauf, H.: Stand und Möglichkeiten der rationellen Energieanwendung beim Zementklinkerbrand. In: Zement-Kalk-Gips ZKG International 41 (1988), Nr. 4, S. 153-157

Aus dem Bild ist u.a. erkennbar, 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 Drehrohrofen verbunden. Umgekehrt findet bei der Zufuhr eines Brennstoffes mit vergleichsweise guten Ausbrandeigenschaften der Umsatz hauptsächlich in der Gassteigleitung des Calcinator statt, 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 Drehrohrofeneinlauf und damit zur Verminderung der K_2O -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.

Kap. 5.

Bilanzierung der gesamten Verfahrenskette

An die Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen muss sich neben der Bewertung der brennstofftechnischen Eignung auch die Beurteilung des Nutzens des Einsatzes von Ersatzbrennstoffen anschließen, da Ersatzbrennstoffe, wie die Bezeichnung selbst schon ausdrückt, Primärbrennstoffe – v.a. energetisch – ersetzen sollen. Hierfür sind Stoff- und Energiebilanzen zu erstellen, mit deren Hilfe sich Wirkungsgrade und andere Kennzahlen ableiten lassen.

Für die nachvollziehbare Bilanzierung und Bildung von Wirkungsgraden ist eine Bilanzierungsmethode mit definierten Bilanzräumen und der genauen Festlegung aller für die Bilanzierung erforderlichen zu- und abgeführten Stoff- und Energieströme eine wichtige Voraussetzung. Es sei darauf hingewiesen, dass diese Vorgehensweise in der Verfahrenstechnik allgemein üblich ist und in der Praxis auch in anderen Bereichen der Energieverfahrenstechnik, z.B. bei Industrieöfen, angewendet wird. Diese Methode hat u.a. den Vorteil, dass durch Angabe aller ein- und austretenden Stoff- und Energieströme für einen Bilanzkreis eine einfache Überprüfung der Bilanz möglich ist.

Grundlage der Bilanzierung eines Verfahrens sind Bilanzschemata, die in Anlehnung an das verfahrenstechnische Fließbild der Gesamtanlage die wesentlichen Stoff- und Energieströme und deren Verlauf innerhalb des Verfahrens wiedergeben. Eintretende Energieströme sind neben dem Brennstoffenergiestrom die so genannten Zusatzenergieströme (elektrisch, thermisch, fossil usw.). Austretende Energieströme sind Nutzenergie (elektrisch, thermisch usw.) und Verlustenergieströme (z.B. Abgasverlust-, Wärmeverluststrom usw.). Das Bilanzschema enthält Bilanzgrenzen, die je nach Erfordernis Bilanzkreise (A, B, ...) bilden (Bild 6). Die einzelnen Ströme sind ganz formal bei Überschreiten der Bilanzgrenze zu nummerieren und entsprechend dem zugehörigen Bilanzkreis zu bezeichnen.

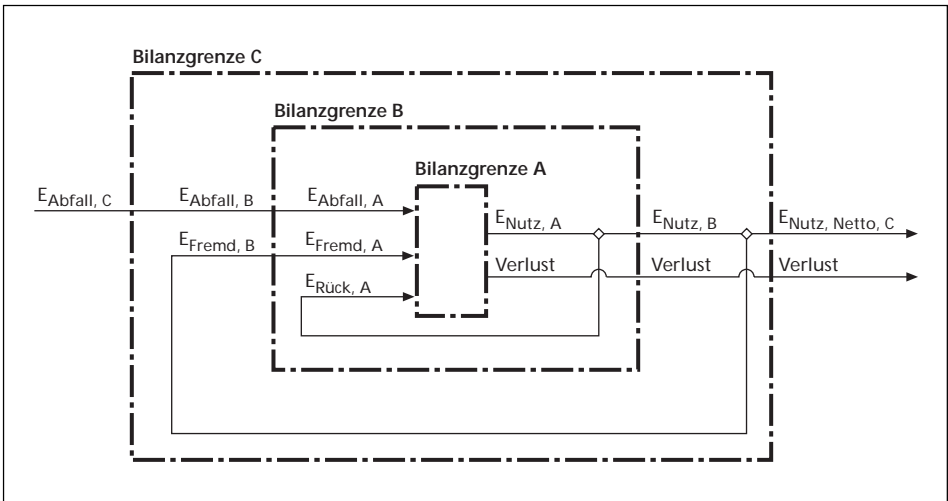


Bild 6: Schema für die energetische Bilanzierung eines Verfahrens

Grundsätzlich ist für die Bilanzierung ein einheitlicher Bezugszustand festzulegen – z.B. Normzustand 273 K, 101.325 Pa. Dieser Bezugszustand muss bei allen ein- und austretenden Strömen berücksichtigt werden.

Für die Bewertung eines Verfahrens oder einer Anlage werden Kennziffern gebildet, die in der Regel Wirkungsgrade – Verhältnis Nutzen zu Aufwand – darstellen. Je nachdem was als Nutzen und Aufwand betrachtet wird, können sich ganz unterschiedliche Wirkungsgrade ergeben. Bei der Energiebilanz sind selbstverständlich die Verluste bei der Primärenergieumwandlung zu berücksichtigen. Dies kann mit Hilfe eines weiteren Bilanzkreises bei der detaillierten Methode oder vereinfacht durch so genannte Äquivalentwerte geschehen. Die detaillierte Methode bietet u.a. den Vorteil einer guten Anschaulichkeit bei der Bewertung der CO_2 -Bilanz.

Bei dieser Bilanzierungsmethode können die Kennziffern unter genauer Angabe der jeweils zur Bewertung herangezogenen Energieströme leicht nachvollziehbar gebildet werden. In gleicher Weise besteht weiter die Möglichkeit, in Gesetzen, Vorschriften oder dergleichen textlich abgefasste Definitionen und Anforderungen einfach in Gleichungen zu fassen – z.B. Urteil des Europäischen Gerichtshofs C-458/00. Für die Bewertung der unterschiedlichen Energiearten werden vereinfacht so genannte Äquivalenzwerte verwendet, die sich einfach durch Erweitern der Bilanzkreise z.B. bis zur Bereitstellung der Primärenergie ergeben. Die Qualität des Brennstoffes – insbesondere Energieinhalt – muss dabei in die Bewertung mit einfließen. Insbesondere geeignet für die Bewertung und den Vergleich von verschiedenen Anlagen/Verfahren ist der so genannte Nettoenergiewirkungsgrad η_n [10],

$$\eta_n = \frac{\text{(Netto-)Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{\text{Nutzenenergie}_{\text{Netto}}}{\text{Brennstoffenergie}} = \frac{E_{\text{Nutz, Netto, C}}}{E_{\text{Abfall, C}}}$$

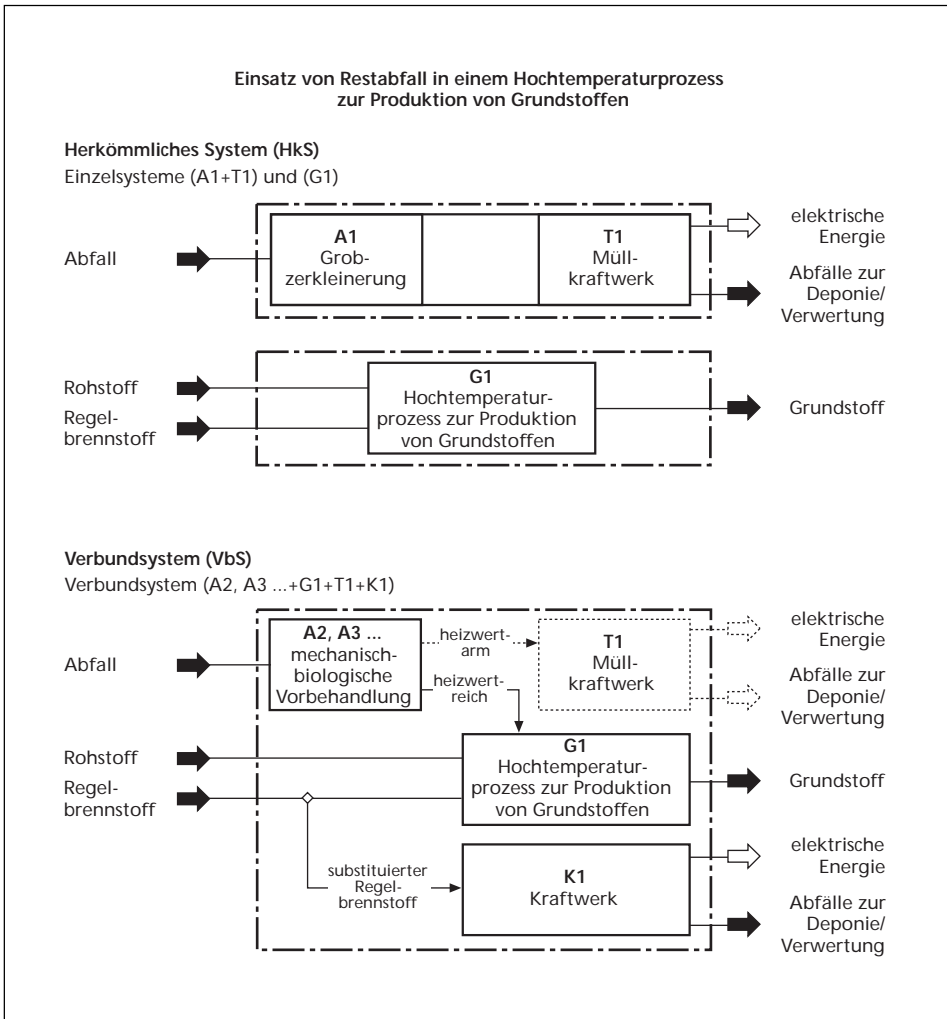


Bild 7: Herkömmliches System bestehend aus Abfallbehandlung in einem Müllkraftwerk und Primärbrennstoffeinsatz in einem Grundstoffherstellungsprozess im Vergleich zu einem Verbundsystem bestehend aus Vorbehandlung und anschließendem Einsatz einer heizwertreichen Restabfallfraktion in einem Grundstoffherstellungsprozess und einer eventuell verbleibenden heizwertarmen Restabfallfraktion in einem Müllkraftwerk

Quelle: Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren – Verbrennung, Vergasung, Pyrolyse, Verfahrens- und Anlagenkonzepte. B.G. Teubner – Reihe Umwelt, 1. Auflage, 2001

der sich bei der gedanklichen Rückführung des Anteils Nutzenergie ergibt, der für die vollständige Substitution der für das Verfahren erforderlichen Zusatzenergieströme erforderlich ist.

Die sich entsprechend der Bilanzierungsmethode ergebenden Bilanzschemata für einen Verfahrensvergleich, für die Bewertung des Nutzens des Einsatz von Ersatzbrennstoffen in einem Hochtemperaturverfahren zur Produktion von Grundstoffen – Verbundsystem – im Vergleich zur alleinigen Behandlung des für die Herstellung des Ersatzbrennstoffes erforderlichen Abfalls in einer Müllverbrennungsanlage – herkömmliches System –, sind in Bild 7 dargestellt. Der energetische Nutzen lässt sich dabei – unter der wichtigen Voraussetzung, dass der Aufwand beider Verfahren gleich ist – über das so genannte Nutzenergieverhältnis z

$$z = \frac{\eta_{n, \text{Verbundsystem}}}{\eta_{n, \text{herkömmliches System}}} = \frac{\text{Nutzenergie}_{n, \text{Verbundsystem}}}{\text{Nutzenergie}_{n, \text{herkömmliches System}}}$$

ausdrücken, das das Verhältnis der in beiden Verfahren erzeugten Nettoenergie beschreibt. So ist z.B. bei einem Nutzenergieverhältnis $z < 1$ der energetische Nutzen des Verfahrens mit Einsatz von Ersatzbrennstoffen geringer als bei alleiniger thermischer Abfallbehandlung – die Substitution von Primärbrennstoffen durch Ersatzbrennstoffe im Hochtemperaturverfahren ist dann aus energetischer Sicht nicht mit einem Nutzen, sondern mit zusätzlichem Aufwand an Primärenergieträgern verbunden.

Von Scholz et al. [11] wurde in diesem Zusammenhang ein Einzelprozess bestehend aus:

- thermischer Behandlung des Abfalls in einer Müllverbrennungsanlage und
- Einsatz von Steinkohle im Zementklinkerbrennprozess

mit einem Koppelprozess bestehend aus:

- Erzeugung eines Ersatzbrennstoffes aus der heizwertreichen Fraktion des Abfalls – Kunststoffe und Textilien – durch mechanische Aufbereitung,
- Substitution von Steinkohle durch den Ersatzbrennstoff im Zementklinkerbrennprozess,
- Einsatz der eingesparten Steinkohle in einem Kraftwerk zur Stromerzeugung und
- Behandlung der heizwertarmen Restfraktion in einer Müllverbrennungsanlage

unter Berücksichtigung des Energieaustauschverhältnisses in der Primärfeuerung des Zementklinkerbrennprozesses (Bild 3) verglichen. Bei der Herstellung von $m_{\text{Kl}} = 1.000 \text{ kg}$ Zementklinker, Energieaufwand für die Zementklinkerherstellung $E_{\text{Kl, spez}} = 3,15 \text{ MJ/kg}_{\text{Kl}}$ und für die mechanische Aufbereitung $E_{\text{MA}} = 0,15 \text{ MJ/kg}$ und einer Masse des zu behandelnden Abfalls $m_{\text{AF}} = 1.000 \text{ kg}$ ergeben sich bei Substitutionsraten von $\xi_{\text{EBS/BS}} = 0,1/0,25/0,5$ die in Bild 8 dargestellten Ergebnisse.

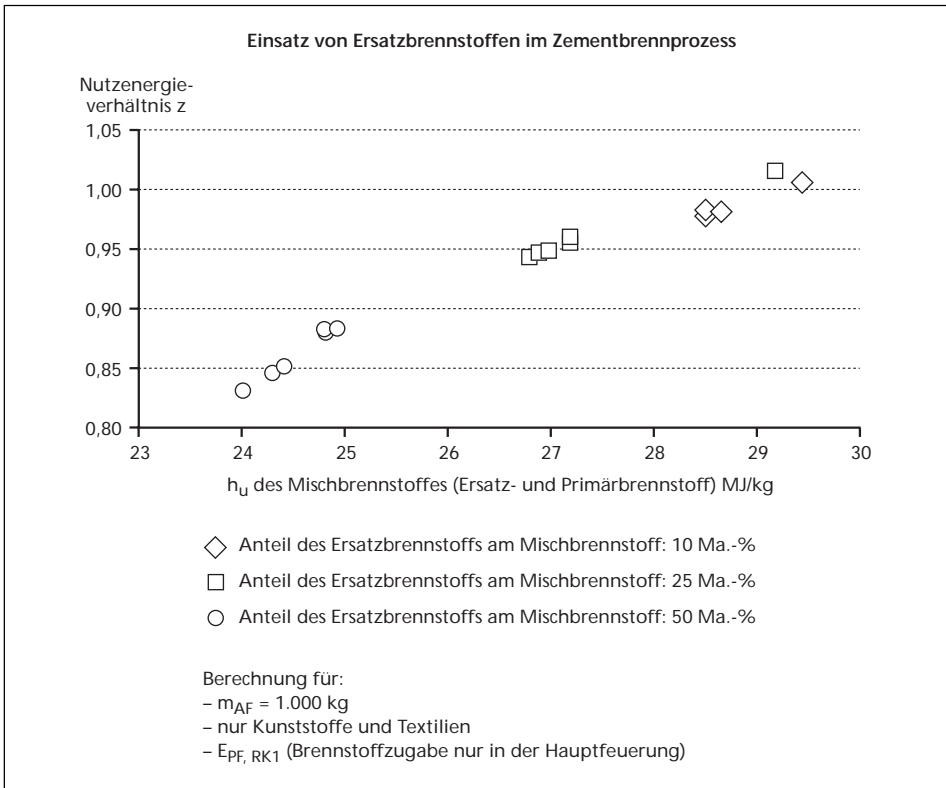


Bild 8: Abhängigkeit des Nutzenenergieverhältnisses vom Heizwert des Mischbrennstoffes bei alleiniger Brennstoffzufuhr über die Hauptfeuerung – Berücksichtigung der Fraktionen Kunststoffe und Textilien für die Herstellung des Ersatzbrennstoffes –

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass sich durch den Einsatz von Ersatzbrennstoffen in der Hauptfeuerung des Zementdrehrohrofens bei einer vereinfachten, mechanischen Aufbereitung von Hausmüll mit der gewählten Zusammensetzung nur in Einzelfällen Nutzenenergieverhältnisse $z > 1$ erreichen lassen. Dies hat folgende wesentliche Ursachen (Bild 8):

- Da das Energieaustauschverhältnis in der Prozessführung E_{PF} und $E_{RK1, \theta}$ nie kleiner als 1 ist – keine der Hausmüllfraktionen weist einen höheren Heizwert auf als der Primärenergieträger Steinkohle, $E_{min} = 1,03$ –, wird immer mehr Energie für den betrachteten Prozess – Klinkerbrennprozess – benötigt als im Einzelprozess.
- Umso höher der Anteil Ersatzbrennstoff am Mischbrennstoff – Substitutionsrate $\xi_{EBS/BS}$ – gewählt wird,
 - * umso geringer wird der Heizwert des Mischbrennstoffes und
 - * umso größer ist das Energieaustauschverhältnis,
 - * d.h. umso geringer ist das Nutzenenergieverhältnis.

- Umso höher der Heizwert des Ersatzbrennstoffes ist – was eine Verringerung von $E_{\text{RK1}, \vartheta}$ zur Folge hat –, umso größer wird die Menge Restabfall aus der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung mit einem geringeren Heizwert als der betrachtete Hausmüll. Dieser Restabfall muss dann mit einem geringeren Wirkungsgrad in einer Müllverbrennungsanlage thermisch behandelt werden.

An dieser Stelle sei daher deutlich darauf hingewiesen, dass Betrachtungen, bei denen von vornherein ein linearer Zusammenhang zwischen dem Nutzenergieverhältnis und dem Substitutionsverhältnis angenommen wird, die energieverfahrenstechnischen Erfordernisse der Brennstoffsubstitution, wie sie u.a. von Scholz et al. [11] zusammengefasst wurden, nicht in ausreichendem Maße berücksichtigen.

Kap. 6.

Quellen

- [1] Bachhiesl, M.; Tauschitz, J.; Zefferer, H.; Zellinger, G.: Untersuchungen zur thermischen Verwertung von Biomasse und heizwertreichen Abfallfraktionen als Sekundärbrennstoffe in Wärmekraftwerken. Forschung im Verbund Schriftenreihe Band 73, Verbund-Umwelttechnik GmbH, 2001
- [2] Beckmann, M.; Scholz, R.: Energetische Bewertung der Substitution von Regelbrennstoffen durch Ersatzbrennstoffe aus Abfällen bei Hochtemperaturprozessen zur Stoffbehandlung. In: Zement-Kalk-Gips ZKG International, Teil 1: 52 (1999), Nr. 6, S. 287-303; Teil 2: 52 (1999), Nr. 8, S. 411-419
- [3] Born, M.: Korrosions- und Verschlackungspotenziale bei der Verbrennung und Mitverbrennung von Abfällen (Thermodynamische Bewertung). In: Grundmann, J.: (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe – Aufbereitung, Mitverbrennung und Monoverbrennung von festen Siedlungsabfällen. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag GmbH, 2002, S. 117-131
- [4] Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung Berlin (DIW) AG: Energiebilanzen: Auswertungstabellen zur Energiebilanz 1/2003
- [5] Flamme, S.: Energetische Verwertung von Sekundärbrennstoffen in industriellen Anlagen – Ableitung von Maßnahmen zur umweltverträglichen Verwertung. Dissertation an der BUGH Wuppertal, Münsteraner Schriften zur Abfallwirtschaft, Band 5, Münster, 2002
- [6] Flamme, S.; Gallenkemper, B.: Inhaltsstoffe von Sekundärbrennstoffen. Ableitung der Qualitätssicherung der Bundesgütgemeinschaft Sekundärbrennstoffe e.V. In: Müll und Abfall (2001), Nr. 12, S. 699-704
- [7] Glorius, Th.: Stand der Gütesicherung von Sekundärbrennstoffen und Bedeutung für die klassische MVA. VDI-Seminar 430407, Neuss, 09./10.12.2002
- [8] Huckauf, H.: Stand und Möglichkeiten der rationellen Energieanwendung beim Zementklinkerbrand. In: Zement-Kalk-Gips ZKG International 41 (1988), Nr. 4, S. 153-157
- [9] Kehl, P.; Scharf, K.-F.; Scur, P.; Wirthwein, R.: Die Betriebsergebnisse aus den ersten 30 Monaten mit der neuen Ofenlinie 5 im Zementwerk Rüdersdorf. In: ZKG INTERNATIONAL 51 (1998), Nr. 8, S. 410-426
- [10] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren – Verbrennung, Vergasung, Pyrolyse, Verfahrens- und Anlagenkonzepte. B.G. Teubner – Reihe Umwelt, 1. Auflage, 2001

- [11] Scholz, R.; Beckmann, M.; Jäger, J.; Ruppel, F.; Horeni, M.; Szpadt, E.: Substitution von Primärbrennstoffen durch Sekundärbrennstoffe. Entsorgungsgemeinschaft der Deutschen Entsorgungswirtschaft e.V. – EdDE Dokumentation 5, 2003
- [12] Specht, E.; Jeschar, R.: Beurteilung von Industrieöfen bei Wärmerückgewinnung. Seminar zu Methoden der Energieeinsparung bei Industrieöfen, TU Clausthal, Institut für Energieverfahrenstechnik, 1990
- [13] Spiegel, W.: Korrosion und Verschlackung in MVA/Wirbelschicht beim Einsatz hochkaloriger Stoffe und Gasentwicklung bei Rückständen. In: Grundmann, J. (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe – Aufbereitung, Mitverbrennung und Monoverbrennung von festen Siedlungsabfällen. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag GmbH, 2002, S. 132-146
- [14] Stadtmüller, J.; Christen von, F.-E.; Schmidt, R.: Kraftwerksintegrierte Pyrolyse von heizwertreichen Ersatzbrennstoffen. VDI-Berichte 1540. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2000
- [15] Thomé-Kozmiensky, K. J.: Alternativen der Ersatzbrennstoffherstellung aus Hausmüll. 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
- [16] Verein Deutscher Zementwerke e. V. (Hrsg.): Umweltdaten der deutschen Zementindustrie. <http://www.vdz-online.de/downloads/umwelt/umwelt.pdf>
- [17] Verein Deutscher Zementwerke e. V. (Hrsg.): Umweltdaten der deutschen Zementindustrie – Environmental Data of the German Cement Industry – Aktualisierung 2001. <http://www.vdz-online.de/downloads/umwelt/umw01d.pdf>