

Herstellung und Einsatz von Ersatzbrennstoffen - Möglichkeiten zur Optimierung der gesamten Verfahrenskette

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

Dr. rer. nat. **K. Keldenich**, Dipl.-Ing. **M. Wilczek**, Oberhausen

Einleitung

Der Vortrag beschäftigt sich mit der Beurteilung und Bewertung der energetischen Nutzung von Ersatzbrennstoffen (EBS) in der Grundstoffindustrie und der Energiewirtschaft unter besonderer Berücksichtigung der Herstellungs- und Nebenprozesse. Wie bereits in der Bezeichnung impliziert, sollten durch den Einsatz von EBS Primärbrennstoffe wie Kohle, Öl und Erdgas in Kraftwerks- und Prozessfeuerungen substituiert werden. Eine Substitution ist aber nur dann sinnvoll, wenn unter Einbeziehung der gesamten Verfahrensketten zur Herstellung der Brennstoffe im Vergleich zu den konventionellen Prozesswegen eine aus energetischer Sicht positive Bilanz gezogen werden kann. Neben den energetischen sind aber auch ökonomische und ökologische Aspekte bei einer Beurteilung mit einzubeziehen.

Mit den gegenwärtig vorhandenen mathematischen Modellen und Berechnungsmethoden ist man bereits in der Lage, diese Beurteilung vorzunehmen. Die Untersuchung der Verfahrensketten ist jedoch aufgrund einer Vielzahl von diskret vorzugebenden Nebenbedingungen nur »manuell« möglich und mit großen Unsicherheiten behaftet, da Angaben bezüglich des Abbrandverhaltens von EBS in realen Feuerungen nur bedingt bekannt sind. Zusätzlich fehlen Angaben von der Herstellung und der Variabilität der Brennstoffprodukte, die eine Bewertung des oder der Gesamtprozesse zulassen.

In dem Vortrag sollen nun Strategien vorgestellt werden, mit deren Hilfe erstmals unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen, die aus verfahrenstechnischer Sicht gegeben sind, eine gezielte Optimierung der Herstellung von EBS durchgeführt werden kann. Dazu sollen alle technische Rahmenbedingungen für den späteren Einsatz durch experimentelle Untersuchungen abgesichert und in die Prozessmodelle implementiert werden.

Ausgangssituation

Erste Versuche zur Gewinnung von Brennstoff aus Restabfällen wurden bereits Anfang der 70er Jahre durchgeführt. Anfänglich erfolgte die Aufbereitung von Restabfällen mit dem primären Ziel der Energieausbeute, wobei die verfahrenstechnische Ausbildung der Aufbereitungsanlagen zunächst gering war. Aufgrund erhöhter Anforderungen an das Produkt Ersatzbrennstoff sind heutige Aufbereitungsanlagen zur Herstellung von EBS sehr komplex aufgebaut.

Auch heute werden Aufbereitungstechnologien im Hinblick auf die Gewinnung einer großen Heizwertspanne entwickelt. Daneben wird der Abtrennung von Schadstoffen ein hoher Stellenwert eingeräumt. Somit ist die auf den zu substituierenden Regelbrennstoff angepasste Schadstoffentfrachtung eine wesentliche Funktion jeder EBS-Aufbereitungsanlage. Diese Schadstoffentfrachtung ist jedoch noch nicht nachweisbar und wird somit immer noch als Ziel der mechanischen und mechanisch-biologischen Abfallaufbereitung betrachtet. Bei einer Beurteilung der jeweiligen Gesamtkonzepte müssen die Einzelverfahren wie Thermische Restmüllbehandlung, Stoffumwandlungsprozess, Kraftwerksprozesse usw. (I) mit den Verfahrensketten aus MBA, Ersatzbrennstoffherstellung und -nutzung, Thermische Restmüllbehandlung und Ablagerung usw. (II) insgesamt gegenübergestellt werden (vgl. Abb. 1).

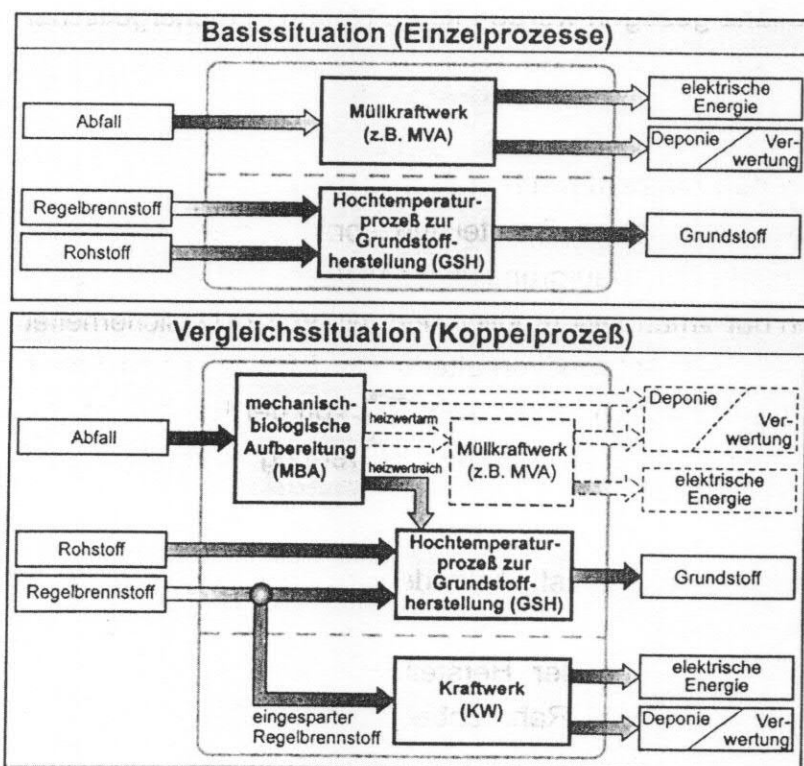


Abbildung 1: Einzelverfahren (I) und Verfahrenskette (II)

Die Analysen der verschiedenen Verfahrensketten (II) anhand der kumulierten Massen-, Energie- und Stoffbilanzen zeigen, dass es im Vergleich mit den Einzelverfahren (I) positive und negative Bilanzen gibt (vgl. z.B. [1]). Mit positiver Bilanz ist z.B. ein aus energetischer Sicht erreichter Nutzen, die Verminderung von Schadstoffen oder auch die Schonung von stofflichen Ressourcen bei Einsatz von Ersatzbrennstoff (vgl.

Abb. 1, dort (II)) gemeint. Entsprechend gilt das Gegenteil für die negativen Bilanzen, hier werden bei der jeweiligen Verfahrenskette im Vergleich zu den Einzelverfahren Primär-Ressourcen zusätzlich verbraucht, selbst wenn positive Effekte in einer Einzelstufe der Verfahrenskette, z.B. durch Substitution eines Regelbrennstoffes durch einen Ersatzbrennstoff im Zementwerk, erreicht werden.

Bislang erfolgt aber noch keine auf den Anwendungsfall orientierte bzw. optimierte Herstellung von Ersatzbrennstoffen. Vielmehr werden derzeit Ersatzbrennstoffe unter Aspekten wie Heizwert und Schadstoffgehalt erzeugt und danach erst Anwendungsfälle gesucht. So könnte auch der Anteil an Schlackebildnern oder der Anteil von Metalloxiden für spezielle Prozesse eine wichtige Bilanzgröße darstellen. Ein solcher Stoff könnte aufgrund seiner Zusammensetzung geeigneter sein eingesetzt zu werden, als eine heizwertreiche Kunststofffraktion. Also der endabnehmende Prozess für den Stoff bestimmt die Zusammensetzung und Konsistenz.

Die Suche nach dem Anwendungsfall für einen bestimmten Ersatzbrennstoff wird gegenwärtig dadurch erschwert, dass keine geeigneten Klassifizierungssysteme oder -merkmale zur Einordnung bzw. Beschreibung der Qualität des Ersatzbrennstoffes existieren. Zur Bewertung der fossilen Brennstoffe hinsichtlich ihrer Verwendung als Brenn- und Rohstoffe wurden verschiedene Klassifikationssysteme aufgestellt, die neben einer Kennzahl für die Inkohlung, die den Gehalt an flüchtigen Bestandteilen in der wasser- und aschefreien Substanz und damit auch teilweise die zu erwartende chemische Zusammensetzung definiert, noch eine oder zwei Ziffern zur Charakterisierung des phänomenologischen bzw. technologischen Verhaltens enthalten.

Im Gegensatz dazu sind die sogenannten Ersatzbrennstoffe, zu denen u.a. Biomassen, brennbare Abfälle bzw. Fraktionen und Schlämme zählen, bis jetzt noch nicht als Brennstoffe und bezüglich ihres Potentials 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.

Handlungsbedarf / Vorgehensweise

Aufgrund der beschriebenen Ausgangssituation ergeben sich drei Teilbereiche, die aufeinander abgestimmt werden müssen und in denen ein Handlungsbedarf erforderlich ist:

- Entwicklung einer einheitlichen brennstofftechnischen Charakterisierung von EBS, z.B. für den Einsatz in Kraftwerken
- mathematische Modellierung und Bilanzierung von Verfahrensketten sowie
- experimentelle Untersuchungen zur Herstellung und Einsatz von Ersatzbrennstoffen für den speziellen Kunden bzw. den Endprozess

Brennstofftechnische Charakterisierung

Wie zuvor bereits erwähnt, müssen für die Beurteilung von Ersatzbrennstoffen zunächst dessen brennstofftechnische Eigenschaften untersucht werden. Diese werden für ein Brennstoff im Allgemeinen durch

- chemische,
- mechanische,
- kalorische sowie
- reaktionstechnische Eigenschaften

charakterisiert [1].

Für fossile Brennstoffe sind bekanntermaßen bereits seit Jahren Klassifikationssysteme mit dem Ziel entwickelt worden, Qualität und damit die Einsatzmöglichkeiten dieser Brennstoffe ohne intensive Laboranalyse im voraus beurteilen zu können. Durch die verschiedenen, bereits entwickelten Tests für fossile Brennstoffe kann deren Abbrandverhalten in realen Feuerräumen hinreichend abgeschätzt werden.

Ein derartiges Klassifikationssystem besteht für EBS derzeit noch nicht. Zwar kann durch das System der Abfallschlüsselnummern die Herkunft der EBS aus verschiedenen Abfällen charakterisiert werden, aber eine Charakterisierung des EBS selbst ist durch dieses System bei weitem nicht ausreichend.

Die Schwierigkeiten bei der Erarbeitung eines Klassifikationssystems für EBS, das eine Verbreitung von EBS in großen Industriefeuerungen als Zusatzbrennstoff zu fossilen Brennstoffen oder auch als alleiniger Brennstoff deutlich erleichtern würde, liegen insbesondere in

- der unterschiedlichen Herkunft und damit der unterschiedlichen chemischen Zusammensetzung, wodurch nicht nur das Brennverhalten sondern auch die Umweltverträglichkeit stark beeinflusst werden kann.
- der Form, in der die EBS zur Verwendung vorliegen (z.B. stück-, staubförmig oder bereits zu Briketts verarbeitet)
- der Probennahme, die durch die im Vergleich zu fossilen Brennstoffen sehr heterogene Zusammensetzung der EBS bestimmt ist, wodurch modifizierte Versuchsmethoden mit größeren Probemengen erforderlich werden.

SEQARABISCH *Mathematische Modellierung und Bilanzierung*

Für den Einsatz von EBS sind bereits mit Hilfe eines vereinfachten mathematischen Modells umfangreiche Untersuchungen bezüglich der kalorischen Eigenschaften insbesondere für Hochtemperaturprozesse durchgeführt worden (vgl. z.B. [6]).

Ein besonderes Augenmerk ist bei solchen Berechnungen auf das Energieaustauschverhältnis E zu richten. Bei der Substitution eines Primärbrennstoffes (PB) durch einen EBS besteht u.a. die Anforderung, dass die Guttemperatur ϑ_s und der übertragene Wärmestrom \dot{Q} und damit auch die Ofenleistung unverändert bleiben sollen.

Das Energieaustauschverhältnis E lässt sich auf dieser Grundlage herleiten [6]. Es drückt die Wertigkeit eines Ersatzbrennstoffes im Vergleich zu dem Regelbrennstoff aus und muss bei einer vergleichenden Bilanzierung unbedingt entsprechend berücksichtigt werden. In der Abbildung 3 ist das Energieaustauschverhältnis für EBS mit verschiedenen Heizwerten dargestellt. Für einen EBS mit einem geringen Heizwert als der Primärbrennstoff wird das Verhältnis bei gleichbleibenden Prozessbedingungen um so größer, je höher die zu erreichende Bilanztemperatur und je niedriger der EBS-Heizwert im Vergleich zu dem des Primärbrennstoffes ist.

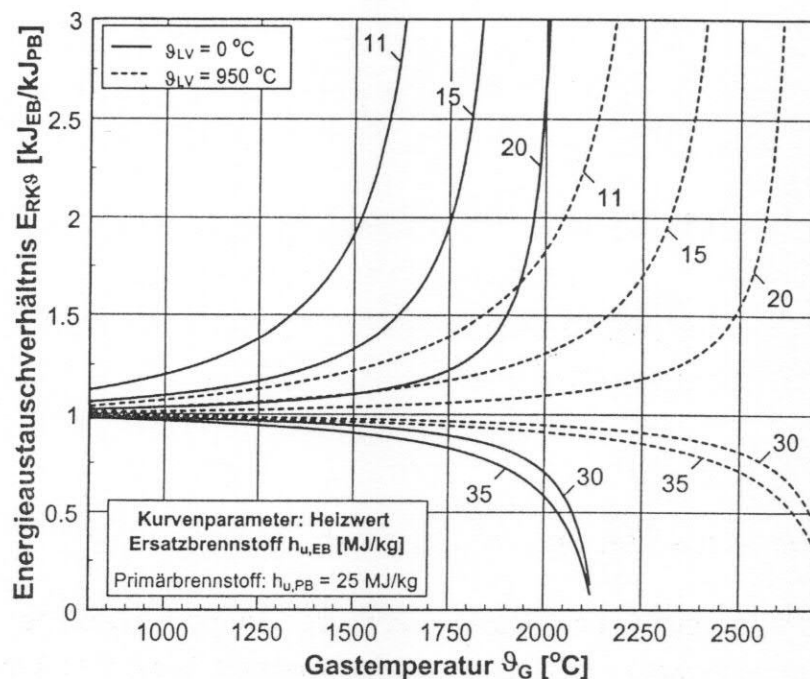


Abbildung 2: Energieaustauschverhältnis bei statischer Betrachtung $ER_{K,\theta}$.

Der Einfluss der Prozessführung, insbesondere der Wärmerückgewinnung, wird bei einem Vergleich der Energieaustauschverhältnisse für einen EBS mit einem bestimmten Heizwert deutlich. In der Abbildung 3 sind die Verhältnisse ohne und mit Luftvorwärmung durch Wärmerückgewinnung dargestellt. Anhand der Abbildung wird deutlich, dass für einen EBS mit einem Heizwert $h_u = 11 \text{ MJ/kg}$ Gastemperaturen von $\theta_G > 1.700^\circ\text{C}$ nur durch eine entsprechende Luftvorwärmung erreicht werden können.

Durch dieses Beispiel wird deutlich, dass das Verhältnis keineswegs nur von den kalorischen, bzw. brennstofftechnischen Eigenschaften abhängt, sondern auch maßgeblich durch die Prozessführung beeinflusst werden kann. Ein wesentliches Ziel sollte es nun sein, nicht nur den Primärbrennstoff durch einen EBS zu ersetzen, sondern auch das Energieaustauschverhältnis durch eine Optimierung der entsprechenden Anlagenschaltung zu minimieren.

Für den Fall, dass der EBS-Heizwert größer als der des Primärbrennstoffes ist, nimmt das Energieaustauschverhältnis auch Werte kleiner 1 an. Dies betrifft beispielsweise die Substitution von Steinkohle durch hochkalorische Kunststoffabfälle in der Primärfeuerung beim Kleinkerbrennprozess.

Der Einfluss der Prozessführung, insbesondere der Wär-

Bei der Bilanzierung von Verfahrensketten stellte sich heraus, dass sich je nach Randbedingungen, die sich auf die Verfahrens- und Standortbedingungen beziehen, die Ergebnisse deutlich unterscheiden. In der Abbildung 4 ist das Nutzenergieverhältnis, das die Nutzenergie eines Koppelprozesses (Vgl. Abb. 1 (II)) auf die des Einzelprozesses (in Abb. 1 (I)) bezieht, in Abhängigkeit vom Abfallheizwert vor der Aufbereitung und verschiedenen Kraftwerkswirkungsgraden dargestellt.

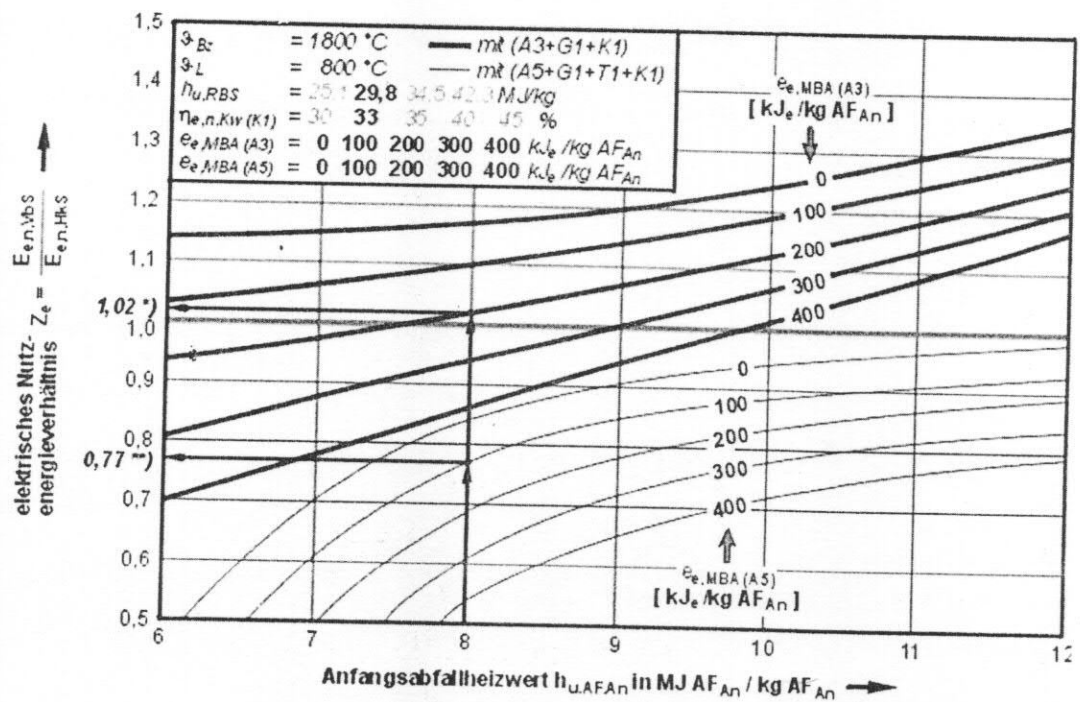


Abbildung 3: Elektrisches Nutzenergieverhältnis in Abhängigkeit vom Abfallheizwert für verschiedene Kraftwerkswirkungsgrade [7].

Mit den vorgestellten Modellen ist aber bisher nur in eine Richtung gerechnet worden. Aufgabe ist nun, die Randbedingungen so auszuwählen bzw. gezielt einzustellen, dass sich beim Einsatz von Ersatzbrennstoffen eine möglichst große Ressourcenschonung, bezogen auf Emissionen, Energie- und Rohstoffverbrauch, ergibt.

Aufbereitungstechnologie

Wie bereits erwähnt, wird das Nutzenergieverhältnis ebenso wie die Qualität des Ersatzbrennstoffes entscheidend von dem jeweiligen Aufbereitungsverfahren beeinflusst. Vor diesem Hintergrund muss bei einer Optimierung der Verfahrenskette auch das Aufbereitungsverfahren mit berücksichtigt werden.

Eine Reihe von experimentellen Untersuchungen im Pilotmaßstab ist bereits durchgeführt worden. In der Abbildung 5 ist die bei der Untersuchung verwendete Verschaltung zwischen den untersuchten Apparaten dargestellt. Bei den Untersuchungen wurden Apparate im technischen Maßstab verwendet, so dass die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Praxis gewährleistet ist.

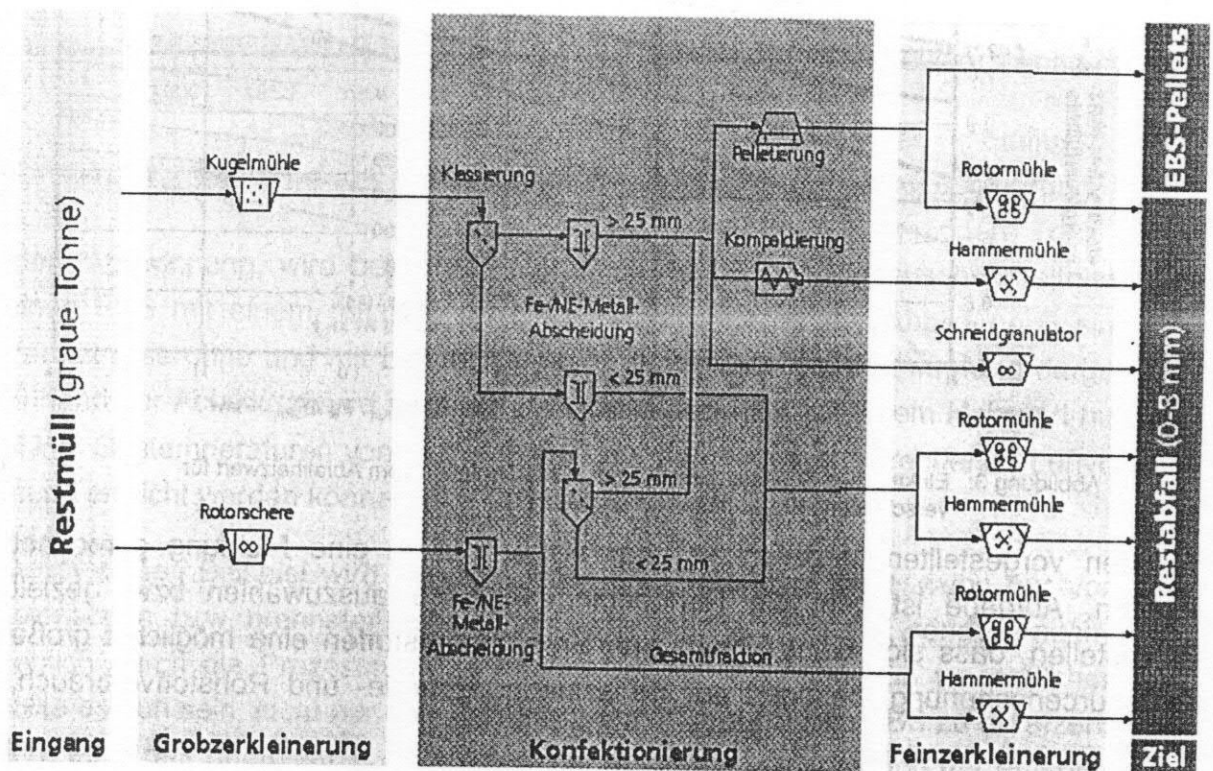


Abbildung 4: Verschaltungsfließbild für Untersuchungen zur Vorbehandlung von Restabfall [8]

Durch diese Untersuchungen konnte u.a. eine Basis für eine systematische Auswahl geeigneter Zerkleinerungs- und Trennverfahren für bestimmte Abfallfraktionen aufgestellt werden. Diese basiert in erster Linie auf den unterschiedlichen zerkleinerungsrelevanten Eigenschaften von Stoffen, aus denen sich die verschiedenen Abfallfraktionen hauptsächlich zusammensetzen. Die Tabelle 1 zeigt einen Zusammenhang zwischen der Beanspruchungsart und der Stoffeigenschaft.

Tabelle 1: Zerkleinerungsrelevante Eigenschaften von Abfallfraktionen [8]

Stoffeigenschaft	Stoffbeispiele	Beanspruchungsart			
		Druck	Prall	Schnitt	Scherung
hart/schleißend	Glas, Keramik, Metalle, Sand, Steine	+	-	-	-
mittelhart	Salz, Duroplaste	+	+	-	-
weich	Vegetabilien, Thermoplaste, Textilien, Papier, Pappe, Holz	o	o	+	+
spröde	Glas, Keramik	+	+	-	-
elastisch	Thermoplaste, Elastomere, Metalle	-	o	-	o
viskos/plastisch	Kunststoffe, Vegetabilien	-	+	+	+
faserig	Papier, Pappe, Textilien, Kunststofffasern	-	-	+	o
verklebend	Kunststoffe, Vegetabilien	-	-	+	o

+ gut anwendbar o bedingt anwendbar - nicht anwendbar

Im Bereich der Grobzerkleinerung von Abfällen sind langsamlaufende Rotorscheren und -reißer, Kugelmühlen sowie schnelllaufende Shredder, Schneid- und Hammermühlen etabliert. Während die ersten vier Aggregate für eine Gesamtfraktion eingesetzt werden können, eignen sich Schneidmühlen als nachfolgender Schritt für die vorwiegend zäh-elastische Fraktion 25 bis 80mm. Für die mit Vegetabilien und Hartstoffen angereicherte Fraktion < 25mm können Hammermühlen eingesetzt werden. Gemäß den in Tabelle 1 wiedergegebenen Zuordnungen können ebenfalls für gewerbliche Abfälle oder Monofraktionen geeignete Aufbereitungstechniken identifiziert und mit der Restabfallaufbereitung kombiniert werden. Bis jetzt sind diese Synergien jedoch noch nicht systematisch phänomenologisch erfasst worden.

Für die Grobzerkleinerung von Siedlungsabfällen stellen die genannten Aggregaten den Stand der Technik dar. Für eine Optimierung der EBS zum Einsatz in Hochtemperaturfeuerungen ist auch die Herstellung eines feinteiligen und rieselfähigen EBS mit oberen Korngrößen < 3 mm interessant [9]. Prinzipiell geeignet für diese Aufgabe sind Prall- und Schneidmühlen. Gegebenenfalls ist der Feinzerkleinerung eine spezielle Abfallkonfektionierung, die einen besseren Energieeintrag durch die Mahlwerkzeuge in das Mahlgut erlaubt, vorzuschalten.

Nach einer Grobzerkleinerung von Restabfällen werden Fe- und Ne-Metalle durch geeignete Abscheider aus dem Restabfall entfernt und einer separaten Verwertung zugeführt. Es folgt eine Siebung oder Sichtung, die den Inputstrom entsprechend den Angaben in Tabelle 2 aufteilt. Stand der Technik ist die Abtrennung einer hochkalorischen Grobfraktion, die als Ersatzbrennstoff verwertet wird, sowie die einer Feinfraktion, die biologisch (aerob oder anaerob) behandelt wird, um anschließend deponiert werden zu können.

Tabelle 2: Charakterisierung von Restabfallfraktionen

		Grobfraktion	Feinfraktion
Korngröße	[mm]	> 100 (25)	< 100 (25)
Heizwert	[kJ/kg]	15-25.000	5-8.000
Feuchtegehalt	[Ma.-%]	15-25	25-45
überwiegende Inhaltsstoffe		Papier, Textilien, Kunststoffe	Mineralien, Vegetabilien, andere Organika

Ein wesentlicher Vorteil der Untersuchungen besteht darin, dass reale Abfallgemische (Restabfall, hausmüllähnlicher Gewerbeabfall etc.) im Technikum untersucht werden können [9]. Die erzeugten Fraktionen sind sowohl hinsichtlich des jeweiligen Anteils als auch der zugehörigen Zusammensetzung mit den unter industriellen Verhältnissen erzeugten Fraktionen vergleichbar. Weiterhin ergeben sich für die jeweiligen Energieaufwendungen realistische Basiswerte.

Bei Untersuchungen mit dem in Abbildung 4 dargestellten Verfahrensaufbau konnten beispielsweise ein sogenannter feinteiliger niederkalorischer Brennstoff erzeugt werden. „Nebenprodukt“ war dabei die heizwertreiche Grobfraktion ($d_p > 25$ mm), die nach einer Störstoffentfrachtung der Konfektionierung zu EBS-Pellets zugeführt wurde. Es wurde nachgewiesen, dass auch Teilfraktionen der Restabfälle als EBS gewonnen werden können, die den chemisch-physikalischen Eigenschaften von aus Monofraktionen hergestellten entsprechen (vgl. Tabelle 3). Es fehlt aber noch die Analyse der inputseitigen Qualitätsschwankungen bzw. die Sensibilitäten des Herstellungsprozesses. Eine Möglichkeit, die hiermit verbundenen Risiken zu minimieren, besteht darin, qualitativ „sichere“ Fraktionen (z. B. Holz-, Papier- und Plastikabfälle) mit geeigneten Restabfallfraktionen zu kombinieren.

Tabelle 3: Charakteristika von Ersatzbrennstoffen, bezogen auf den Energiegehalt.

Parameter	Einheit	EBS aus Restabfall	EBS, DSD	Trockenstabilat	Max.-wert 17. BImSchV	Max. Regelbrennstoff
unterer Heizwert	kJ/kg	26400,00	22500,00	10540,00	-	>11.000
Wassergehalt	Gew.-%	2,20	6,50	8,80	-	k. A.
Kohlenstoff	mg/MJ	19356,06	22222,22	39781,78	-	k. A.
Chlor	mg/MJ	352,27	466,67	986,72	2.500	60
Schwefel	mg/MJ	151,52	111,11	456,36	1.500	740
Arsen	mg/MJ	0,08	0,22	0,02	25	1,9
Blei	mg/MJ	2,01	4,00	13,19	80	10
Cadmium	mg/MJ	0,07	0,12	0,15	6	0,3
Chrom	mg/MJ	1,78	4,89	4,82	60	3,7
Kupfer	mg/MJ	6,82	10,67	18,69	80	3,7
Nickel	mg/MJ	0,45	1,33	2,50	40	3,5
Quecksilber	mg/MJ	0,02	0,02	0,09	0,6	0,06
Thallium	mg/MJ	0,04	0,04	0,01	5	0,15
Zink	mg/MJ	11,74	13,33	36,81	800	8

Ausblick

Aufgrund der hier vorgestellten Fragen und der daraus abgeleiteten Vorgehensweise ergibt sich eine neue Betrachtung des Themas Ersatzbrennstoffe. Eine Einteilung und Reduzierung des Themas Abfällen auf einen Brennstoff ist zu einfach. Andere Inhaltsstoffe deren Verhalten in den Grundprozessen und der Einbau bzw. das Verhalten dieser Inhaltsstoffe bei der Produktion eines Zementes oder eines Roheisen oder Gußeisen sind wichtige Größen, die sich nicht auf den Heizwert eines auch Brennstoffes allein reduzieren.

Gerade die hier vorgestellte Vorgehensweise ermöglicht es, auch die Produkte und den Einfluss des Brennstoffes bzw. des Additivs auf den Gesamtprozess zu bilanzieren. Dabei ist zu berücksichtigen, dass auch der Herstellungsprozess berücksichtigt wird, der nicht unerheblich an der Bilanz beteiligt ist. Nur durch diese Vorgehensweise lassen sich andere ganzheitliche Entsorgungsketten darstellen und begutachten.

Durch die hier vorgestellten Untersuchungen werden neue Wege aufgezeigt, die es ermöglichen differenziert Aussagen zur Verwertung von Abfällen in der Grundstoffindustrie und den Kraftwerken machen zu können, ohne sich auf den wenig aussagekräftigen Heizwert eines Abfallstoffes reduzieren zu lassen.