

Vergleich und Bewertung von Verfahren und Anlagen zur thermischen Abfallbehandlung (Teil 1)

Reinhard Scholz, Frank Schulenburg, Michael Beckmann

Die in Deutschland anfallenden Abfälle sind im Hinblick auf eine stoffliche und energetische Verwertung oder eine möglichst Ressourcen schonende Entsorgung zu behandeln. Die dazu eingesetzten und zu entwickelnden Verfahren lassen sich durch Aufteilung in die verfahrenstechnischen Grundoperationen Trocknung, Entgasung, Pyrolyse, Vergasung, Verbrennung usw. und entsprechende Apparate darstellen, wie sie

im Zusammenhang mit Herstellungsverfahren in der Grundstoffindustrie entwickelt wurden. In diesem Beitrag stehen die thermischen Verfahren im Vordergrund. Eine detaillierte Übersicht über alle Verfahren ist in dem hier gesteckten Rahmen nicht möglich. Das Anliegen ist es vielmehr, die Einordnung der thermischen Abfallbehandlung in die Verfahrenstechnik deutlich zu machen.

Grundsätzlich können thermische Verfahren in ein thermisches Hauptverfahren, die Zusatzverfahren zur Abgasreinigung, die Energieumwandlung sowie ggf. die Reststoffnachbehandlung unterteilt werden, wie beispielsweise anhand der klassischen Müllverbrennung in Abbildung 1 verdeutlicht wird. Dabei ist es zunächst wichtig, für Umwandlungsvorgänge allgemein und die Bildung sowie den Abbau von Schadstoffen im Besonderen die Abhängigkeit von den Haupteinflussgrößen im Zusammenhang mit Mög-

lichkeiten zur Prozesssteuerung für das thermische Hauptverfahren zu diskutieren. Daraus lässt sich dann u. a. die Wahl der Apparate ableiten.

Diese grundsätzlichen Überlegungen führen schließlich zu einer Systematik, die eine Bewertung der Gesamtverfahrens (vgl. Abb. 1) mit bekannten ingenieurtechnischen „Werkzeugen“ wie Bilanzen, Wirkungsgraden usw. und damit letztlich auch einen Vergleich zulassen.

Werden Teilströme eines Abfalls in anderen Verfahren behandelt, so ist die Betrachtung

Keywords

- Thermische Verfahren
- verfahrenstechnische Grundoperationen
- Verfahrensvergleich
- Abfallbehandlung

selbstverständlich auf die gesamte Verfahrenskette zu erweitern, wie beispielhaft die Erzeugung eines Ersatzbrennstoffes in einem mechanisch-biologischen Verfahren und die anschließende Nutzung in der Zementindustrie sowie des verbleibenden Restmülls in einer Verbrennungsanlage weiter unten zeigen soll.

Grundbausteine, Haupteinflussgrößen und Möglichkeiten zur Prozesssteuerung

Ausgangspunkt der Überlegung bei der Betrachtung eines Verfahrens sind die Haupteinflussgrößen (Abb. 2). Zunächst sind selbstverständlich die Einsatzstoffe, die durch physikalische und chemische Eigenschaften charakterisiert werden, vorgegeben.

Grundoperationen thermischer Abfallbehandlungsverfahren sind i.d.R. Thermolyse (Pyrolyse), Vergasung und Verbrennung, de-

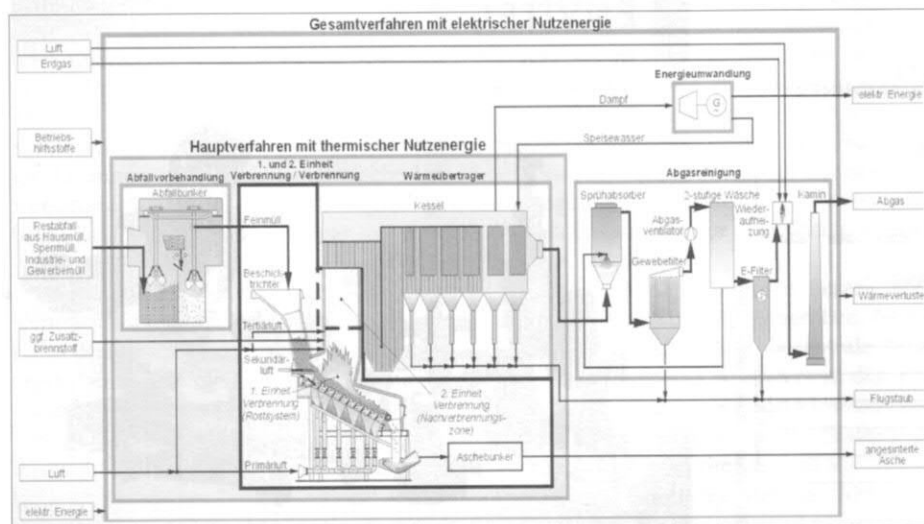


Abb. 1: Klassische Hausmüllverbrennung mit Aufteilung in thermisches Hauptverfahren, Abgasreinigung und elektrische Energieumwandlung.

Haupteinflussgrößen	Variationen		
Einsatzstoffe	physikalische Eigenschaften	gasförmig, flüssig, pastös, fest (staubförmig oder stückig)	
	chemische Eigenschaften	Zusammensetzung ("Problemstoffe")	
Sauerstoffangebot	Thermolyse $\lambda = 0$	Vergasung $\lambda < 1$	Verbrennung $\lambda \geq 1$
Reaktionsgase	Luft, Sauerstoff, (Stickstoff, Kohlendioxid, Wasserdampf, rückgeführtes Abgas, usw.)		
Reaktorverhalten	Rührkessel (RK) vollkommene Durchmischung ($Pe = 0$)	Realer Reaktor $0 < Pe < \infty$	Kolbenströmer (KS) keine Durchmischung ($Pe \rightarrow \infty$)
Art der Stoffzufuhr	Eintragsimpuls, Drall, Zerstaubung, Dispergierung, usw. (z. B. für Einsatzstoffe, Reaktionsgase, Zusatzstoffe)		
Verweilzeit	kurz einige s	lang einige min bis h	sehr lang einige h bis d
Temperatur	Nieder- $\vartheta < 800^\circ\text{C}$	bis $800^\circ\text{C} - 1000^\circ\text{C}$	Hochtemperatur $\vartheta > 1000^\circ\text{C}$ (ggf. bis 2000°C u. höher)
Druck	Nieder- $p = 0,1 \text{ MPa}$	Umgebungs- $p = 0,1 \text{ MPa}$	Hochdruck $p > 0,1 \text{ MPa}$
Zusatzstoffe	A additiv (z. B. zur Schadstoffeinbindung, zur Beeinflussung des Schmelzverhaltens usw.) Zusatzbrennstoff Betteinflussung (z. B. Wirbelbett, Festbett, Umlaufbett, Tragematrix, Ascherückführung usw.)		

Abb. 2: Haupteinflussgrößen bei thermischen Behandlungsverfahren.

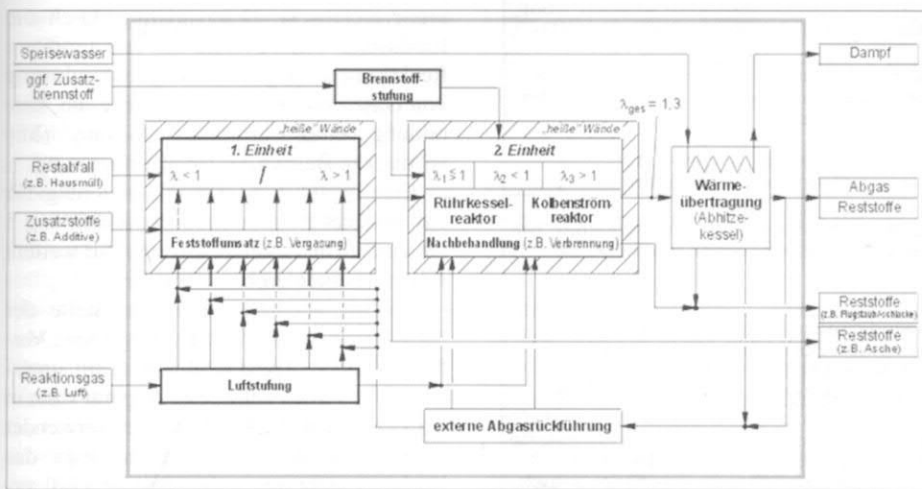


Abb. 3: Schematische Darstellung der Prozessführung für stückige Einsatzstoffe (Abfälle).

Prozessführung sind weiter die Aufteilung in unterschiedliche Reaktortypen (Rührkessel-, Kolbenstrom-Charakteristik). Maßnahmen zur direkten Wärmeein- und -auskopplung (z.B. Einmischung von Gasen, Wassereindüsung) oder indirekten Wärmeein- und -auskopplung (z.B. Strahlungsrohre, Wärmeüberträger).

An dieser Stelle sei besonders auf den Einfluss des Reaktortyps auf Abbaureaktionen³, die in Kolbenstrom-Reaktoren deutlich schneller als in Rührkessel-Reaktoren verlaufen, hingewiesen. Dennoch ist zu beachten, dass häufig zunächst eine homogene Vermischung vorliegen muss, wofür die Rührkessel-Charakteristik wiederum erforderlich ist, so dass häufig eine Reihenschaltung von Rührkessel- und Kolbenstrom-Elementen zu finden ist.

Somit wird deutlich, dass, je nach Zielstellung und Art des Einsatzstoffes (Abfall), eine Vielzahl von Maßnahmen miteinander kombiniert werden müssen. Dabei ist anzustreben, dass die unterschiedlichen Aufgaben der Reihe nach in hintereinandergeschalteten Reaktoren „abgearbeitet“ werden. Auf diese Weise gelangt man in Stufen, je nach Anforderungen, zu ganz bestimmten Anlagenschaltungen, wie dies für die Prozessführung für stückige Abfälle in Abbildung 3 weiter gezeigt wird.

Aus Abbildung 3 erkennt man, dass die sog. 2. Einheit mit ihren Elementen für die Nachverbrennung der Gase und der Stäube auch als

ren Unterscheidung im Wesentlichen durch die Haupteinflussgröße Sauerstoffangebot erfolgt. Wird kein Sauerstoff von außen zugeführt, so liegt Thermolyse vor; eine Wärmezufuhr bewirkt dabei je nach Art des Einsatzstoffes eine Trocknung, Entgasung und Pyrolyse des Abfalls. Für die Vergasung von Abfällen kommen i.d.R. nur Verfahren mit Sauerstoffzufuhr in Frage, so dass sich unterstöchiometrische Bedingungen ergeben. Die Verbrennung ist durch stöchiometrische bzw. überstöchiometrische Sauerstoffzufuhr gekennzeichnet.

Die Wirkung der Haupteinflussgrößen muss vom Niveau her, wie im Abbildung 2 zusammengefasst dargestellt, und im Hinblick auf die Verteilung längs des Reaktionsweges betrachtet werden. Eine wesentliche Grundvoraussetzung zur Optimierung verfahrenstechnischer Prozesse, bei denen Teilprozesse mit ganz unterschiedlichen Kombinationen von Einflussgrößen erforderlich sind, ist die getrennte Durchführung der Teilprozesse (Entkopplung), so dass sie auch einzeln, ohne gegenseitige Beeinflussung optimiert werden können.

So ermöglicht die Trennung der Prozessschritte Feststoffumsatz, Nachverbrennung

(Nachbehandlung) und Wärmeübertragung bei dem Beispiel der Müllverbrennung (Abb. 3) zunächst den Feststoffausbrand und die Qualität der Asche unabhängig von der Nachverbrennung zu optimieren. Durch die Entkopplung der Wärmeübertragung werden Quencheffekte an kalten Wänden vermieden¹.

Bei der getrennten Optimierung können nun die Haupteinflussgrößen durch vielfältige Maßnahmen, wie z. B. die Sauerstoffkonzentration durch Luft- und Brennstoffzufuhr, Sauerstoff- und Inertgaszufuhr, Abgasrückführung und Lastzustand variiert werden (vgl. Abb. 3). Ähnliche Maßnahmen kommen auch zur Steuerung der Temperatur längs des Reaktionsweges infrage z.B. 2. Andere Möglichkeiten zur Beeinflussung der

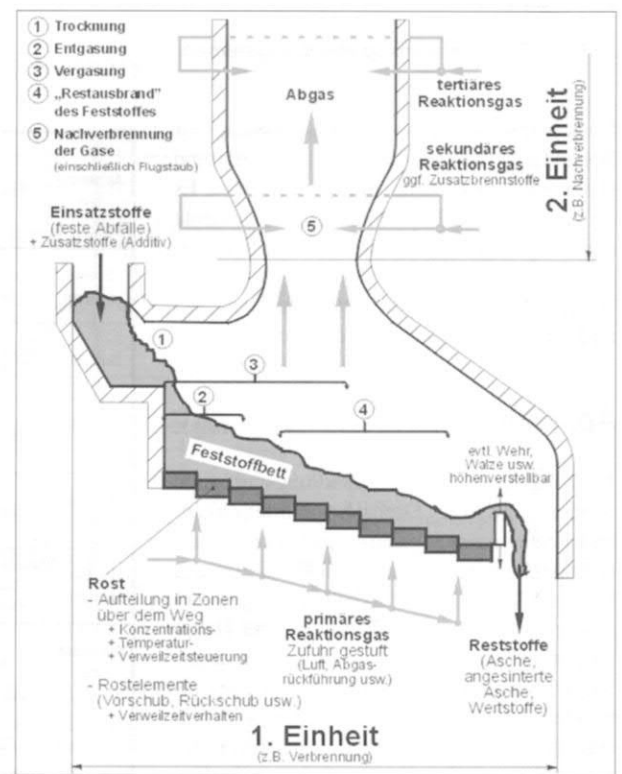


Abb. 4: Möglichkeiten der Prozessführung bei Rostsystemen.

Haupteinflußgrößen		Bemerkungen
Einsatzstoffe		stückig, in Verbindung mit einem Feststoffbett auch pastös
Sauerstoffangebot	Niveau	überstöchiometrisch (Verbrennung) üblich; unterstöchiometrisch (Vergasung) möglich; Sauerstoffabschluß (Thermolyse) nicht üblich, jedoch auch möglich
	Steuerung längs des Reaktionsweges	getrennt in einzelnen Zonen sehr gut einstellbar (z.B. Luft-/ Sauerstoffstufung, Abgasrückführung, usw.); in Verbindung mit Temperatursteuerung sind die Teilschritte Trocknen, Entgasen, Vergasen, Restausbrand des Feststoffes beeinflussbar
Temperatur	Niveau	Bettoberflächentemperatur bis ca. 1000 °C; mittlere Betttemperaturen niedriger
	Steuerung längs des Reaktionsweges	durch Einteilung in mehrere Zonen ebenfalls sehr gut möglich, wie bei der Steuerung der Sauerstoffkonzentration (Luftvorwärmung, Abgasrückführung, Sauerstoffanreicherung, Wasser-/ Dampfkühlung)
Druck		bei Umgebungsdruck in der Regel aus anlagentechnischen Gründen wenige Pa Unterdruck
Reaktorverhalten	Staub/Gas	je nach Bewegung der Rostelemente können die einzelnen Zonen einer RK-Charakteristik (z.B. Rückschubrost) oder einer KS-Charakteristik (z.B. Walzenrost) angenähert werden; über der gesamten Reaktorlänge ergibt sich angenähert eine KS-Charakteristik
	Gas	1 Oxidationsmittel usw. strömt zwangsweise durch das Bett und wird gleichmäßig über dem Rost verteilt; damit sehr guter Kontakt zwischen Gas und Feststoff 2 Strömungsführung über dem Bett im Gegen- und Gleichstrom möglich, Nachverbrennung erforderlich
Verweilzeit (Feststoff)	Niveau	im Bereich von Minuten bis Stunden; durch Rostelementgeschwindigkeit und Massenstrom einstellbar; bei Projektierung durch Gesamtlänge und -breite einflußbar
	Steuerung längs des Reaktionsweges	durch getrennte Geschwindigkeitseinstellungen der Rostelemente in den einzelnen Zonen sehr gute Anpassung möglich; falls erforderlich für zusätzliche Verbesserung des Ausbrandes am Rostende Steuerung durch Austragswalze
Zusatzstoffe		Additive z.B. zur Schadstoffeinbindung in den Feststoff und Beeinflussung der Eigenschaften der verbleibenden Reststoffe (Asche, angeschmolzene Asche, Schlacke); Asche- bzw. Schlackerückführung, Inertbett z.B. Trägermatrix für eventuell leicht schmelzende Stoffe (z.B. Kunststoff)
Einsatzbereiche (Beispiele)		Feststoffumsatz in der 1. Einheit bei Hausmüllverbrennungsanlagen; Separieren von Metallen aus Verbundstoffen durch Vergasung bei niedrigen Temperaturen

Abb. 5: Charakterisierung von Rostsystemen.

Einheit für eine eigenständige Feuerung zur Behandlung von gasförmigen, flüssigen und staubförmigen Abfällen gleichzusetzen ist. Es sei daher nochmals betont, dass die Elemente einer solchen Feuerung auch Bestandteil einer Anlage für stückige, pastöse Abfälle bzw. in Anlagen für Gemische aus stückigen, pastösen und flüssigen Abfällen (Sonderabfall) sind.

Apparate

In thermischen Abfallbehandlungsverfahren werden i.d.R. Rost-, Drehrohr-, Wirbelschicht- und Brennkammersysteme eingesetzt. Einerseits bestimmen die Einsatzstoffe die infrage kommenden Apparate, andererseits legen diese wiederum das mögliche Niveau der Haupteinflussgrößen ebenso wie deren Steuerungsmöglichkeiten längs des Reaktionsweges zumindest teilweise fest. So kommt z.B. für stückige Abfälle häufig ein Rost infrage; für Gemische aus flüssigen und festen Stoffen muss man in der Regel auf ein Drehrohr

zurückgreifen. Die Apparate lassen sich im Hinblick auf die gestellten Anforderungen und die Möglichkeiten der Steuerung der Haupteinflussgrößen (Abb. 2) (Niveau und Verteilung längs des Reaktionsweges) einordnen.

Rostsysteme weisen vielfältige Möglichkeiten zur Steuerung der Teilschritte Trocknung, Entgasung, Vergasung, Restausbrand des Feststoffes entlang des Reaktionsweges auf (Abb. 4). In Abbildung 4 ist mit Bezug auf das Vorangegangene weiter angedeutet, wie bei modernen Anlagen eine Entkopplung der Nachverbrennung von dem Feststoffumsatz auf dem Rost erfolgen kann. Zunächst sorgt die Einschnürung für eine geometrische Entkopplung, wobei eine strömungstechnische Unterstützung durch die Eindüsung von sekundärem und tertiärem Reaktionsgas gegeben ist. Die Eindüsung von Gasen ermöglicht gleichzeitig die Ausbildung einer „Rührkessel“-Zone (Mischung) zu Beginn der Nachverbrennung.

Eine ausführliche Charakterisierung für das Beispiel Rostsystem ist in Abbildung 5 enthalten. Die Abbildung 6 zeigt für weitere Apparate einen groben Überblick.

Wichtig erscheint an dieser Stelle der Hinweis, dass zwischen den Begriffen „Verfahren“ und „Apparaten“ sorgfältig unterschieden werden sollte. Ein Apparat kann in ganz unterschiedlichen Verfahren verwendet werden. Beispielsweise benutzt man das Drehrohr nicht nur in der „Sonderabfallverbrennung“, sondern auch bei Pyrolyseprozessen. Ähnliches gilt für den Apparat „Rost“. Häufig benutzte Begriffe wie „Dreh-

Apparatetyp	Einsatzstoff	Temperatur	Verweilzeit	Vermischung des Abfalls (Bett)	Vermischung des Abfalls mit Reaktionsgas	Steuerung der Prozessbedingungen über den Reaktionsweg	Beispiele für den Einsatzbereich
Brennkammer	flüssig, gasförmig, staubförmig	bis 1500°C	im Sekundenbereich	sehr gut	sehr gut	sehr gut möglich	Nachverbrennung (Stäube, Abgase) Vergasungsreaktion, Verbrennung
Drehrohr	stückig, pastös, flüssig	bis 1200°C	im Stundenbereich	gut	bedingt	nicht möglich	Thermolyse (z.B. Hausmüll) Verbrennung (z.B. Sondermüll)
Rost	stückig, pastös	ca. 850°C	im Stundenbereich	gut	sehr gut	sehr gut möglich	Verbrennung (z.B. Hausmüll) Vergasung (z.B. Hausmüll)
Etagenofen	stückig, pastös	ca. 950°C	im Stundenbereich	gut	bedingt bis gut	möglich	Verbrennung (z.B. Schlämme)
Wirbelschicht	Feststoff mit enger Korngrößenverteilung, flüssig	ca. 850°C	im Minutenbereich	sehr gut	sehr gut	nicht möglich	Verbrennung (z.B. Klärschlamm) Druckvergasung
Durchlauf-ofen	stückig	bis 1400°C	mehrere Stunden bis Tage	in der Regel nicht vorhanden	bedingt bis gut	sehr gut möglich	Verbrennung (z.B. Militärrüstlasten, Abfälle mit hohem Inertanteil)
Schachtreaktor	Schüttgut (fest), flüssig	bis 1600°C	Stunden- bis Tagebereich	bedingt	sehr gut	bedingt möglich	Druckvergasung, Schlacke-einschmelzung

Abb. 6: Übersicht über Apparate, zugehörige Einsatzmöglichkeiten und Haupteinflussgrößen.

rohrverfahren“ oder „Rostverfahren“ sagen daher über das eigentliche Verfahren nur wenig aus und können sogar irreführend sein.

Beispiele von Prozessführungen und systematische Darstellung von Verfahren

Mit den bisher erläuterten Grundbausteinen und Haupteinflussgrößen, den grundsätzlichen Möglichkeiten zu deren Steuerung auch im Zusammenhang mit der apparatechnischen Umsetzung, können nun einzelne Prozesse und Verfahren untersucht werden, was am Beispiel von stückigen und pastösen Abfällen geschehen soll.

Für diese ist i.d.R. eine getrennte Prozessführung mit Pyrolyse, Vergasung oder Verbrennung in der ersten Einheit und anschließender Nachvergasung oder Nachverbrennung in der zweiten Einheit erforderlich.

In Abbildung 3 ist eine solche getrennte Prozessführung mit Vergasung und mehrstufiger Nachverbrennung (Möglichkeit der Weiterentwicklung des klassischen Verfahrens mit Rostsystemen) bereits dargestellt. Über dem Reaktionsweg der ersten Einheit (Rost) wird über eine gestufte Zuführung des Reaktionsgases (Luft o. ä.) der Feststoff getrocknet, entgast und schließlich wegen der dargestellten insgesamt unterstöchiometrischen Verhältnisse vergast. In dem letzten Rostabschnitt können lokal (bezogen auf den Restkohlenstoff) überstöchio-

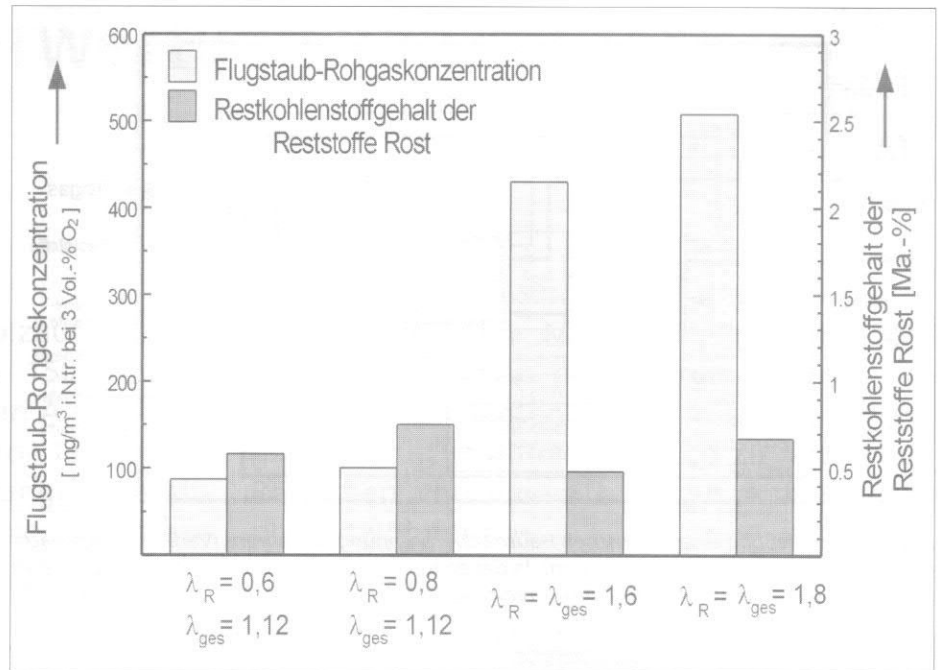


Abb. 7: Flugstaubrohrgaskonzentrationen und Restkohlenstoffgehalt für unterstöchiometrische und überstöchiometrische Betriebsweise des Rostsystems (Pilotanlage mit 0,5 MW_{th}).

metrische Bedingungen eingestellt werden, so dass sich ein hoher Ausbrand (Abb. 7), ebenso wie bei einem insgesamt überstöchiometrischen Betrieb (Verbrennung auf dem Rost), ergibt.

Die Absenkung der Luftzahl führt bei der Vergasung gegenüber der Verbrennung zunächst zu wesentlich geringeren Strömungsgeschwindigkeiten durch das Bett und damit zu deutlich reduziertem Flug-

staubgehalt (Abb. 7). In der zweiten Einheit lässt die Reihenschaltung aus Rührkessel und Kolbenströmer in Verbindung mit der Möglichkeit der Luft- und Brennstoffstufung sowohl eine NO_x-Minderung mit Primärmaßnahmen als auch gleichzeitig einen hohen Ausbrand des Abgases und Flugstaubes zu.

In Abbildung 8 ist zu sehen, wie durch unterschiedliche Prozessführungen (hier

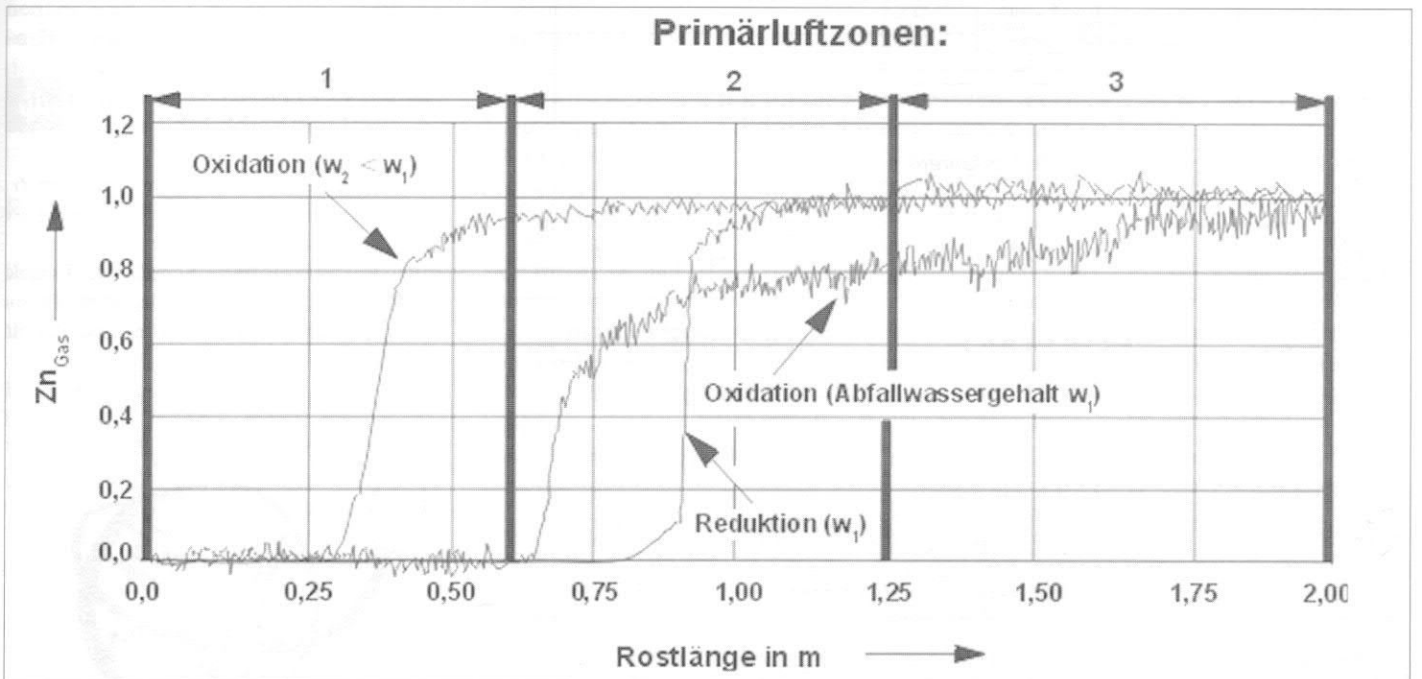


Abb. 8: Anteil Zn_{Gas} des Zinks im Abgas in Abhängigkeit von der Rostlänge als Beispiel für die Beeinflussung der Freisetzung eines flüchtigen Schwermetalls durch unterschiedliche Prozessführungen⁴ (Verbrennung oxidierend, Vergasung reduzierend, $w_1, w_2...$ unterschiedliche Abfallfeuchten) in einer Pilotanlage 0,5 MW_{th}.

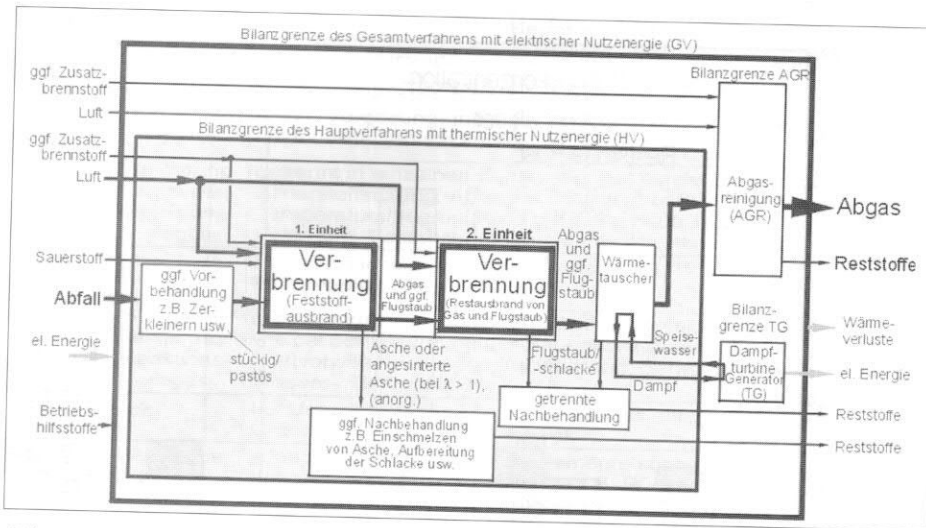


Abb. 9: Blockfließbild eines klassischen Hausmüllverbrennungsverfahrens (Verbrennungs-Nachverbrennungsverfahren mit Rostsystem). In der ersten Einheit ist auch eine Vergasung möglich und wird als weiterentwickelte Müllverbrennung bezeichnet.

Steuerung des Sauerstoffangebotes in Verbindung mit durch unterschiedliche Abfallwassergehalte W_1, W_2, \dots beeinflusste Temperaturen) längs des Rostweges flüchtige Schwermetalle in ihrer Freisetzung beeinflusst werden können⁴. Ein wichtiger Vorteil der getrennten Prozessführung mit der Vergasung in der ersten Einheit und der Verbrennung in der zweiten Einheit ist die Absenkung der Gesamtluftzahl bis auf $\lambda = 1,1$, was eine entsprechende Verminderung der Abgasströme und der Frachten bedeutet z. B. 1.

Auf Grund des bausteinartigen Analysierens der Verfahren bis zur schematischen Darstellung der Prozessführung (Abb. 3) gelangt man nun in einem weiteren Schritt zu einem Blockfließbild, wie dies in Abbildung 9 anhand der klassischen Hausmüllverbrennung gezeigt wird. Dieses Blockfließbild 7 trifft in seiner prinzipiellen Darstellung z. B. auch auf die klassische Sonderabfallverbrennung zu, wo in der ersten Einheit ebenfalls eine Verbrennung (jetzt in einem Drehrohr) und in der zweiten Einheit eine Nachverbrennung (ebenfalls Nachbrennkammer oder Nachverbrennungszone) erfolgt. Ähnlich ist eine Klärschlammverbrennung aufgebaut, wobei wieder andere Apparate in den einzelnen Einheiten eingesetzt (Wirbelschichtreaktor, Etagenöfen usw.) werden.

Stellt man weitere Verfahren, wie z. B. das Thermoselect (Abb. 10), NOELL-Konversions-, Schwel-Brenn-Verfahren usw. dar, gelangt man zu der in Abbildung 11 dargestellten Möglichkeit, die Verfahren systematisch mittels der Grundoperationen Thermolyse, Vergasung, Verbrennung (Unterteilung in 1. und 2. Einheit) zu unterscheiden und zu charakterisieren.

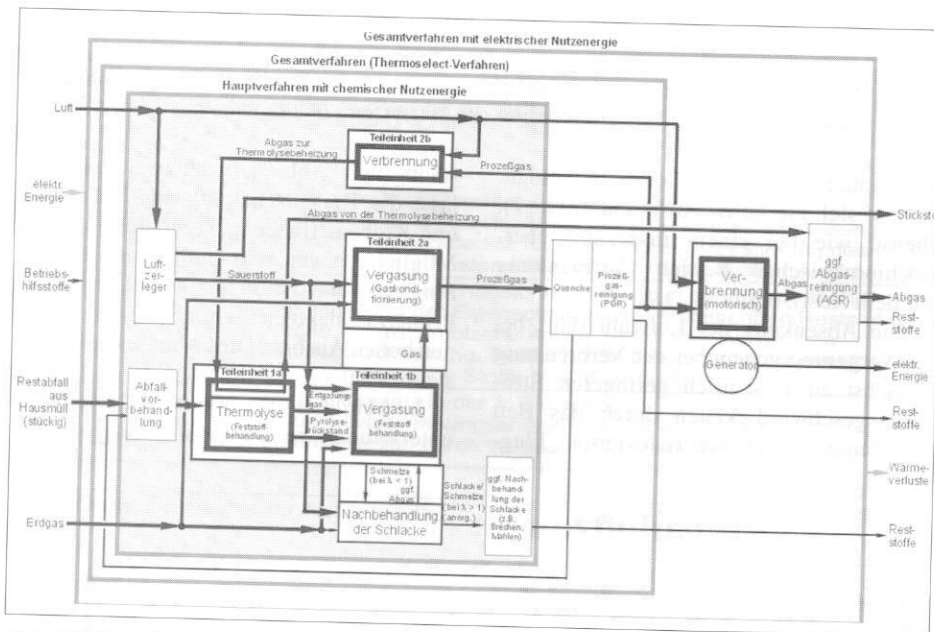
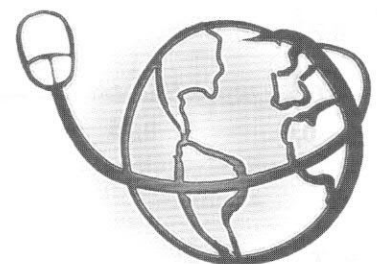


Abb. 10: Blockfließbild des Thermoselectverfahrens.

Teil 2 dieses Beitrages lesen Sie in up 6

Prof.-Dr. Ing Reinhard Scholz, Dr. Frank Schulenburg, Universität Clausthal, Prof.-Dr.-Ing. Michael Beckmann, Universität Weimar



www.vieweg.de

Verfahrens-Kurzbez.	1. Einheit	2. Einheit	Verfahren
V1	Verbrennung ***	Verbrennung	Verbrennungs-Verbrennungs-Verfahren
V2	Thermolyse *)	Verbrennung	Thermolyse-Verbrennungs-Verfahren
V3	Vergasung **)	Verbrennung	Vergasungs-Verbrennungs-Verfahren
V4	Thermolyse	Vergasung	Thermolyse-Vergasungs-Verfahren
V5	Vergasung	Vergasung	Vergasungs-Vergasungs-Verfahren

*) zusammenfassende Bezeichnung für Trocknungs-, Entgasungs- und Pyrolysevorgänge
 **) zusammenfassende Bezeichnung für Trocknungs-, Entgasungs- und Vergasungsvorgänge
 ***) zusammenfassende Bezeichnung für Trocknungs-, Entgasungs-, Vergasungs- und Verbrennungsvorgänge

Abb. 11: Systematische Einordnung von thermischen Hauptverfahren.

Vergleich und Bewertung von Verfahren und Anlagen zur thermischen Abfallbehandlung (Teil 2)

Die in Deutschland anfallenden Abfälle sind im Hinblick auf eine stoffliche und energetische Verwertung oder eine möglichst Ressourcen schonende Entsorgung zu behandeln. Die dazu eingesetzten und zu entwickelnden Verfahren lassen sich durch Aufteilung in die verfahrenstechnischen Grundoperationen Trocknung, Ent-

gasung, Pyrolyse, Vergasung, Verbrennung usw. und entsprechende Apparate darstellen, wie sie im Zusammenhang mit Herstellungsverfahren in der Grundstoffindustrie entwickelt wurden. In diesem zweiten Teil stehen die thermischen Verfahren wie in unserer vorigen Ausgabe im Vordergrund.

Keywords

- Thermische Verfahren
- verfahrenstechnische Grundoperationen
- Verfahrenvergleich
- Abfallbehandlung

Bei einem Vergleich von Verfahren sind zunächst einheitliche Bilanzgrenzen und Randbedingungen festzulegen. Ausgehend von Blockfließbildern werden in einem nächsten Schritt Massen-, Energiebilanzen (z.B. Abb. 12) sowie Stoffbilanzen erstellt. Für eine übersichtliche Darstellung und einfachere rechentechnische Behand-

lung werden die Ein- und Ausgangsströme nummeriert, wobei jeder Stoffstrom die gleiche Nummer wie der zugehörige Energie- und Massenstrom erhält, damit ein übersichtlicher Vergleich möglich ist. Die abschließende Gegenüberstellung der Summe der eintretenden sowie der austretenden Ströme erfolgt aus Kontrollgründen.

Vergleich und Bewertung

Verfahren zur ausschließlichen Abfallbehandlung

Energiebilanzen bilden die Grundlage für die Berechnung von Wirkungsgraden. Je nach dem, was man als „Nutzen“ und als „Aufwand“ zugrunde legt, ergeben sich ganz

unterschiedliche Wirkungsgrade (Abb. 13). Der betrachteten Anlage (Bilanzgrenze Gesamtverfahren GV) werden die Abfallenergie H_{AF} und die benötigten Zusatzenergien ΣE_{ZUS} zugeführt. Abgeführt werden die Nutzenergie H_{NUTZ} und die Verluste ΣE_{VERGV} . Der sog. „Anlagenwirkungsgrad“ η_a ist dann entsprechend Gl. 1 in Abbildung 13 definiert.

Des Weiteren wird zunächst die Bilanzgrenze um das jeweils betrachtete Verfahren so lange erweitert, bis alle Hilfsbilanzen für den Aufwand zur Erzeugung von Hilfsstoffen und Hilfsenergie (Bilanzgrenze UP) erfasst bzw. mit eingeschlossen sind, d. h., dass man jeweils den Weg und den Aufwand zurück bis zu den Primärenergieressourcen verfolgen kann (Bilanzgrenze KU für kumulierte Darstellung in Abb. 13).

Bezieht man jetzt den Nutzen H_{NUTZ} auf die Summe aller zugeführten Energien einschließlich der erforderlichen Primärenergien (H_{AF} und ΣH_p) (Bilanzgrenze KU in Abb. 13), erhält man den sog. „Primärwirkungsgrad“ η_p (siehe Gl. 2 in Abb. 13). Zieht man von dem erzeugten Nutzen die benötigten Primärhilfsenergien ΣH_p ab, erhält man den sog. „Nettonutzen“, d. h. den Nutzen, den man allein durch den Abfall erhält. Dies führt zu dem sog. „Nettoprimärwirkungsgrad“ η_n (siehe Gl. 3 in Abb. 13)^{a)}. In Abbildung 13 wird weiterhin deutlich, dass die Anlagen- und Primärwirkungsgrade ($\eta_{t,a}$ und $\eta_{t,p}$ Index „t“ für thermisch) erwartungsgemäß durch die zusätzliche Primärenergie steigen.

Vor dem Hintergrund des Zweckes einer Abfallbehandlung ist dies jedoch nicht das Ziel. Hier wird der Sinn der Einführung eines Nettoprimärwirkungsgrades deutlich, der bei Einsatz von Primärenergie, im Gegensatz

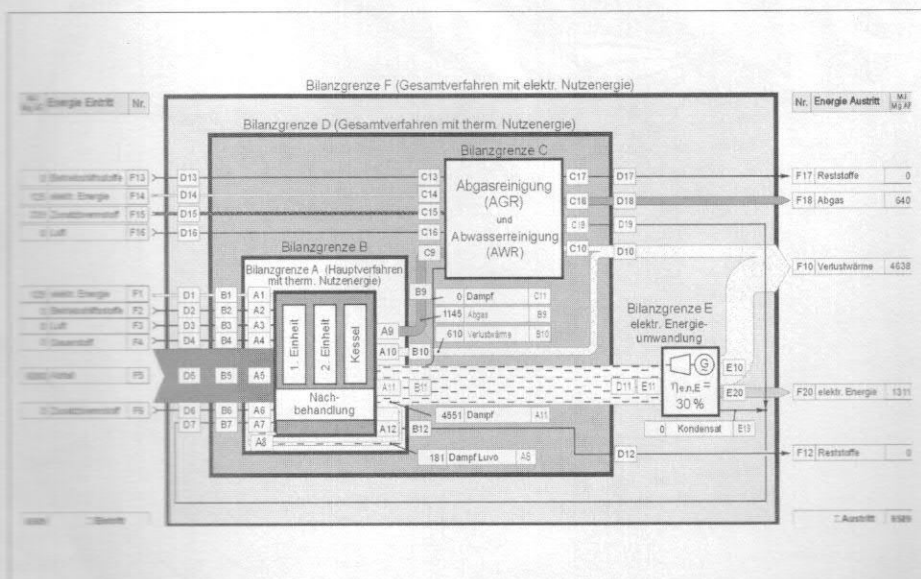


Abb. 12: Vereinfachtes Energieflussdiagramm einer klassischen Hausmüllverbrennung (hier mit Sauerstoffanreicherung der Verbrennungsluft).

zum Anlagen- und Primärwirkungsgrad, sinkt. Ein möglichst großer Nettoprimärwirkungsgrad zeigt damit auch eine entsprechende Schonung von Primärenergieressourcen an. Je nach Bilanzgrenze (BG) kann man somit ganz unterschiedliche Wirkungsgrade bilden, wie an dem folgenden Beispiel einer klassischen Müllverbrennung Fall A (Verbrennung auf dem Rost und Nachverbrennung) und Fall B mit einer weiterentwickelten Hausmüllverbrennung (Vergasung auf dem Rost und anschließender Nachverbrennung) jeweils für einen Abfallheizwert von 8 MJ/kg gezeigt:

Abbildung 14 zeigt insbesondere in Abhängigkeit vom Heizwert bei unterschiedlichen Prozessführungen eines klassischen Müllkraftwerkes (MKW, in Kurve 1 bis 3; Verbrennung auf dem Rost) und eines weiterentwickelten Müllkraftwerkes (Kurve 4 bis 6; Vergasung auf dem Rost) den elektrischen Nettoprimärwirkungsgrad. Kurve 6 stellt ein Vergasungsverfahren dar, bei dem das erzeugte Gas zunächst abgekühlt (Quenchen) und dann einer motorischen Verbrennung zugeführt wird. Die geringeren Wirkungsgrade sind auf das Quenchen zurückzuführen.

Ersatzbrennstoff aus Abfall in Hochtemperaturprozessen

Für die Abfallbehandlung von Restmüll, Gewerbemüll, Sperrmüll und Klärschlamm stehen eine Reihe von Grundoperationen zur Verfügung (Abb 15). Will man Abfall zur Substitution von Primärbrennstoff in Hochtemperaturproduktionsprozessen (z. B. Zementindustrie) verwenden, zeigt sich, dass ein unmittelbarer Einsatz in der Regel nicht möglich ist. Zunächst muss ein Ersatzbrennstoff (vgl. Abb. 15) bzw. sog. Sekundärbrennstoff hergestellt werden, um den Randbedingungen des jeweiligen Einsatzes (z. B. als heizwertreiche Fraktion in der Zementindustrie) zu genügen. Es ist zu beachten, dass bei der Ersatzbrennstoffherstellung in der Regel eine heizwertarme Fraktion (vgl. Abb. 15) verbleibt, die z. B. einer Müllverbrennung zugeführt werden muss.

Es reicht nun die Feststellung einer Einsparung, z. B. von Steinkohle durch Ersatzbrennstoffe in Produktionsprozessen, allein für eine Bewertung nicht aus. Vielmehr muss auch der Aufwand für die Herstellung des Ersatzbrennstoffes sowie die weitere thermische Behandlung der Restfraktion aus der Vorbehandlung z. B. in einer Müllverbrennung usw. einbezogen werden, d. h., es müssen die Verfahrensketten im Sinne einer Gesamtbetrachtung untersucht werden, wie im Folgenden an Beispielen gezeigt werden soll.

Die Herstellung von Ersatzbrennstoff kann auf ganz unterschiedliche Weise ge-

schehen, von der mechanischen Abtrennung von bestimmten Fraktionen über die mechanisch-biologische Aufbereitung (MBA) bis zur thermischen Vorbehandlung. In Abbildung 16 ist ausgehend von Variante I (Restmüll wird nur grob für die thermische Behandlung zerkleinert) eine Variante II mit Kurzzeitrotte und eine Variante III mit Langzeitrotte betrachtet. Dargestellt ist jeweils die Aufteilung der Abfallfraktionen in Wasser (W), Inertstoff (I), Kunststoff (K) und organische Komponenten (O) Basis bildet eine Restabfallmasse von $m_{RA} = 1000$ kg mit einem Restabfallheizwert von $h_{u,RA} = 8$ MJ/kg.

Vergleicht man Variante II und III mit Variante I, wird deutlich, dass mit Hilfe der Vorbehandlung der Heizwert des verbleibenden Restabfalls $h_{u,EBS}$ gesteigert werden kann, dass aber gleichzeitig die verfügbare Energie in der heizwertreichen Fraktion bei Variante II auf 98 % ($f_{HR} = 0,98$) und Variante III auf 42 % ($f_{HR} = 0,42$) reduziert wird. Dies kann zur Folge haben, dass die energetische Bewertung von Koppelprozessen ungünstig ausfällt (siehe unten). Es wird jedoch auch deutlich, dass die adiabate Verbrennungstemperatur (ϑ_{ad}) steigt, was für die nachfolgend erläuterte Beurteilung von Ersatzbrennstoffen wichtig ist.

Bei der Ersatzbrennstoffbewertung sind zunächst brennstomechanische Eigenschaften zu untersuchen:

- chemische,
- mechanische,
- kalorische und
- reaktionstechnische Eigenschaften.

Im Folgenden sollen zur Bewertung beispielhaft die kalorischen Eigenschaften

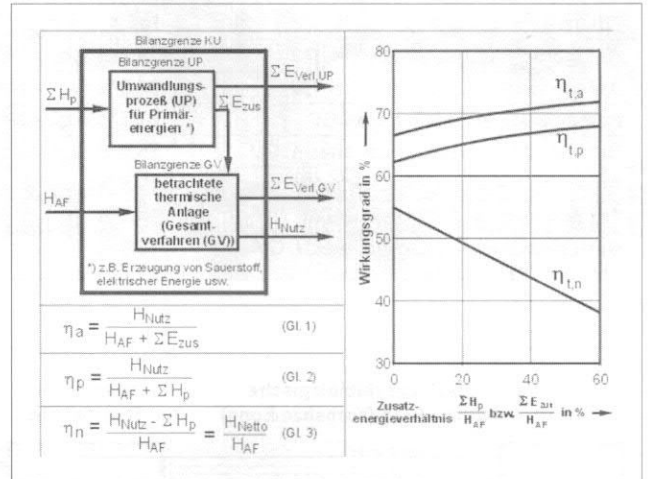


Abb. 13: Vereinfachte Energiebilanz zur Bildung des therm. Anlagen- (η_a), Primär- (η_p) und Nettoprimärwirkungsgrades (η_n) (Erklärung im Text) und Darstellung der Wirkungsgrade in Abhängigkeit eines Zusatzenergieverhältnisses.

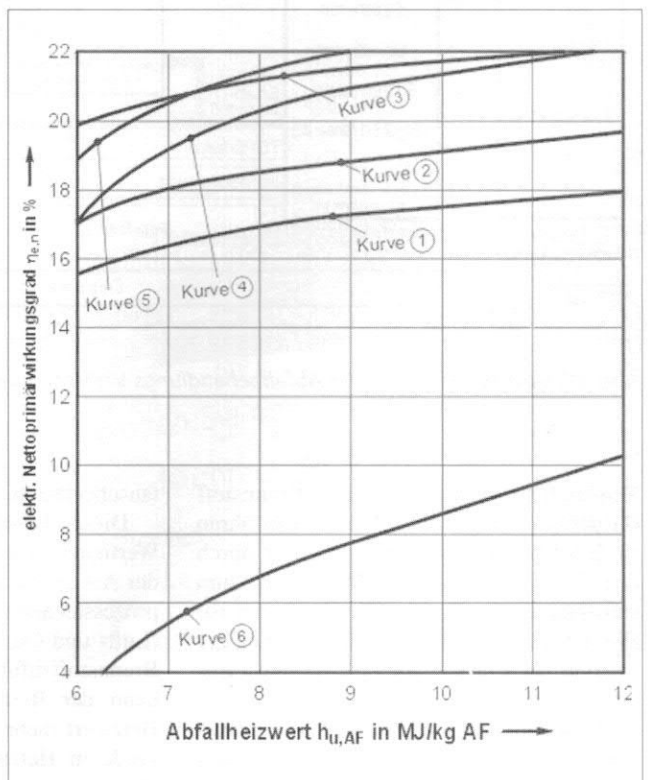


Abb. 14: Elektrischer Nettoprimärwirkungsgrad in Abhängigkeit vom Abfallheizwert für verschiedene therm. Abfallbehandlungsverfahren⁵. Kurve 1 bis 3 klassisches Müllkraftwerk, Kurve 1: $\lambda = 1,9; \vartheta = 850^\circ C$, Kurve 2: $\lambda = 1,6; \vartheta = 850^\circ C$, Kurve 3: $\lambda = 1,6; \vartheta = 850^\circ C$, und Abgasrestenergienutzung; Kurve 4: weiterentwickeltes klassisches MKW mit Vergasung auf dem Rost, Nachverbrennungstemperatur $\vartheta = 1000^\circ C$ und $\lambda_{ges} = 1,12$, Kurve 5: wie Kurve 4 zusätzlich Abgasrestenergienutzung, Kurve 6: wie Kurve 4 zusätzlich Prozessgaskühlung.

(energetische Bewertung) näher betrachtet werden. Dazu wird ein sog. Energieaustauschverhältnis E eingeführt, das ausdrückt, wieviel Energie durch Ersatzbrennstoff im

Bilanzraum	Fall A	Fall B
Anlagenwirkungsgrad, therm. HV	73,2 % (vgl. Abb. 12, BG A)	81,0 %
Anlagenwirkungsgrad, therm. GV	66,3 % (vgl. Abb. 12, BG D)	74,1 %
Primärwirkungsgrad, therm. GV	61,7 % (vgl. Abb. 13, BG KU)	70,7 %
Nettoprimärwirkungsgrad, therm. GV	55,0 % (vgl. Abb. 13, Gl. 3)	67,7 %
Anlagenwirkungsgrad, elektr. GV	19,9 %	22,2 %
Primärwirkungsgrad, elektr. GV	18,5 %	21,2 %
Nettoprimärwirkungsgrad, elektr. GV	16,5 %	20,3 %

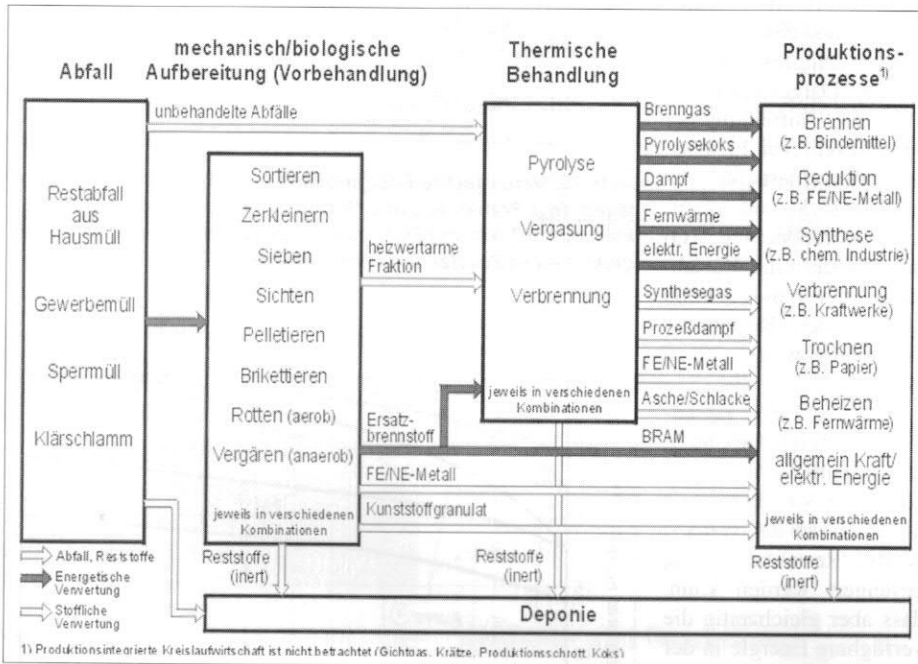


Abb. 15: Grundoperationen der Abfallbehandlungs-Verfahrensketten (Beispiele)⁶.

Vergleich zu dem zu ersetzenden Brennstoff für den jeweils gleichen Zweck zuzuführen ist. $E > 1$ bedeutet, dass mehr Energie durch den Ersatzbrennstoff im Vergleich zum substituierenden Brennstoff zuzuführen ist. $E < 1$ bedeutet entsprechend, dass weniger Energie bei Einsatz des Ersatzbrennstoffes erforderlich ist.

Abbildung 17 zeigt das Energieaustauschverhältnis E bei der Substitution des Regelbrennstoffes Kohle $h_{u,RBS} = 25 \text{ MJ/kg}$ durch Ersatzbrennstoffe unterschiedlichen Heizwertes (Parameter im Abb. 17). Beispielhaft ergibt sich für einen Ersatzbrennstoff mit dem Heizwert von $h_{u,ESB} = 15 \text{ MJ/kg}$ bei einer angenommenen Prozesstemperatur von $\vartheta = 1500^\circ\text{C}$ ohne Luftvorwärmung ($\vartheta_{Luft} = 0^\circ\text{C}$) ein Energieaustauschverhältnis von ca. $E = 1,33$. Würde man einen Ersatzbrennstoff mit einem geringeren Heizwert (z. B. $h_{u,ESB} = 11 \text{ kJ/kg}$) einsetzen, so ist in Abbildung 17 zu erkennen, dass sich bei der geforderten Prozesstemperatur ($\vartheta = 1500^\circ\text{C}$), z. B. mit einer Luftvorwärmung auf $\vartheta_L = 950^\circ\text{C}$, ein Energieaus-

tauschverhältnis von ca. $E = 1,23$ ergibt.

Dieses Beispiel zeigt deutlich, dass die Wertigkeit eines Brennstoffes nicht nur von der Art des Brennstoffes, sondern auch von prozesstechnischen Merkmalen abhängt (Luft- und Gutvorwärmung, Verteilung der Brennstoffzufuhr usw.)⁶. Je nach Einsatz kann der Reststoff mit dem niedrigeren Heizwert mehr Wert sein, als der mit dem größeren Heizwert. Daher kann auch ein Heizwert unter 11 MJ/kgAF höherwertiger sein als ein Reststoff mit einem Heizwert nach dem KrW-/AbfG für die Unterscheidung nach „Verwertung“ ($h_u \geq 211 \text{ MJ/kgAF}$) oder „Entsorgung“ ($h_u < 11 \text{ MJ/kgAF}$) zwar als Ordnungsrahmen verstanden, jedoch verfahrenstechnisch nicht begründet werden kann.

Aus dem Energieaustauschverhältnis E lassen sich weitere Größen, wie z. B. das Brennstoffmassenstromverhältnis^{b)} und das Abgasmassenstromverhältnis^{b)} ableiten. Die Verhältnisse der Brennstoff- und der Abgasmassenströme sind für die Betrachtung von

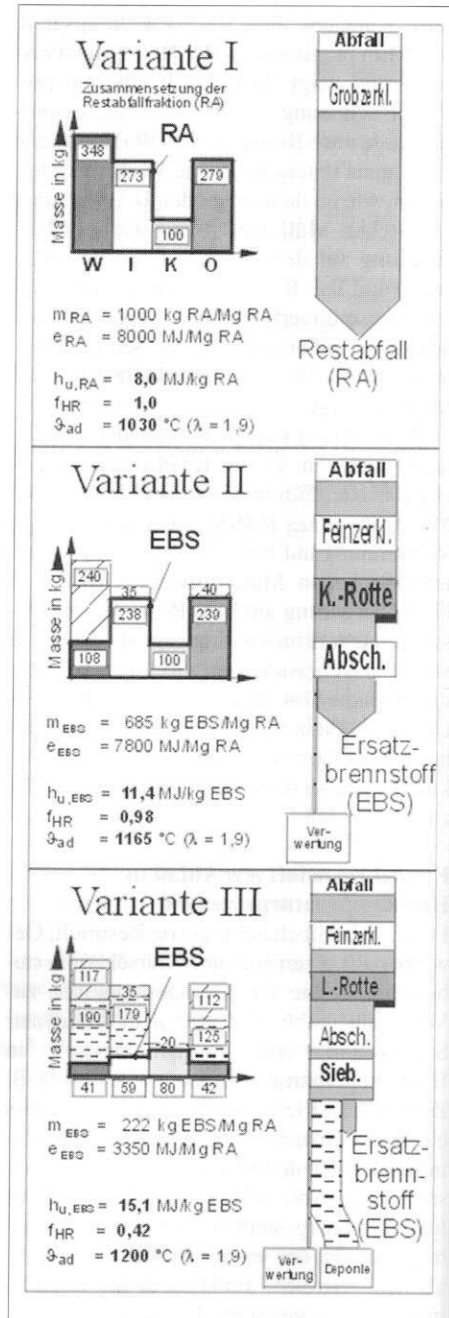


Abb. 16: Veränderung der Abfallzusammensetzung durch unterschiedliche Abfallvorbehandlungsverfahren^{5,7}.

anlagentechnischen Randbedingungen wie Brennstoffzufuhr, Strömungsverhältnisse im Ofenraum, Guttransport usw. wichtig. Damit ergibt sich oftmals auch die Begrenzung auf eine maximale Substitutionsrate (Austausch nur eines Teils des Primärbrennstoffes durch Ersatzbrennstoff).

Wenn das Energieaustauschverhältnis für den jeweiligen Anwendungsfall ermittelt worden ist, darf man die unmittelbar in dem betrachteten Prozess ersetzte Primärenergie nicht direkt als Primärenergieeinsparung betrachten. Es muss vielmehr, nachdem die

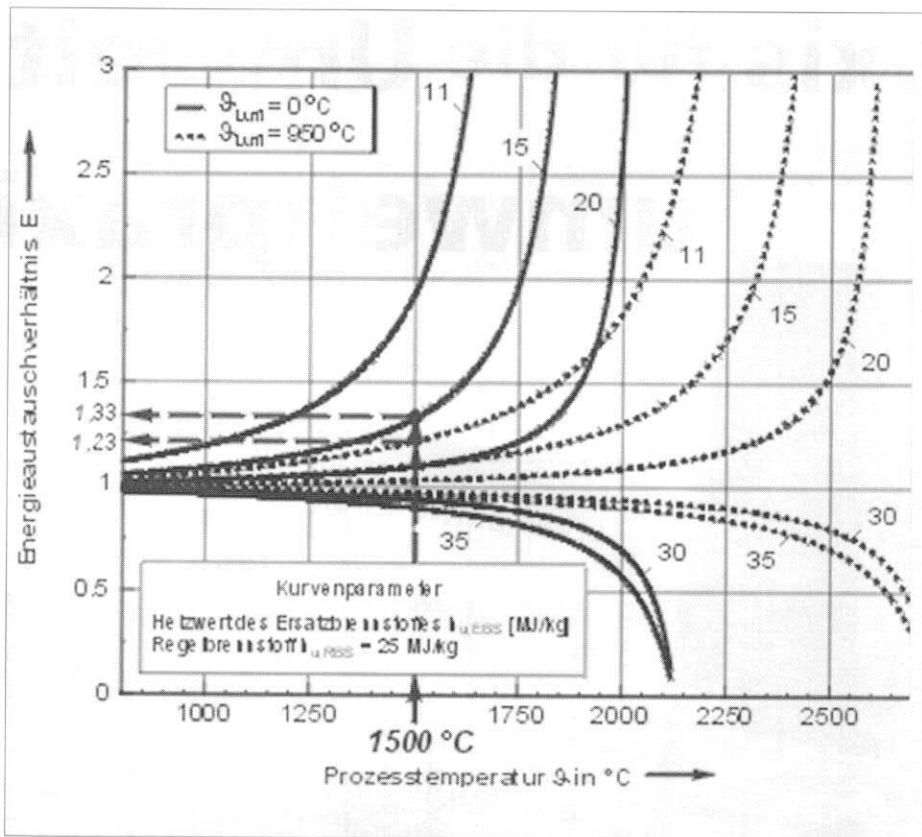


Abb. 17: Energieaustauschverhältnis E in Abhängigkeit von der Prozesstemperatur θ für verschiedene Substitutionsfälle⁶.

Substitution durch den Ersatzbrennstoff in der betrachteten Anlage (z. B. Substitution von Steinkohle in der Calcinatorfeuerung der Klinkerherstellung eines Zementwerkes durch Vergasungsgas aus Abfall in einer Wirbelschicht⁶) durchgeführt worden ist, noch ein Vergleich mit dem Fall durchgeführt werden, der Müllverbrennung und Hochtemperaturproduktionsprozess getrennt betrachtet. Dies soll an einem Beispiel verdeutlicht werden.

Zunächst werden Müllverbrennung und Hochtemperaturproduktionsprozess getrennt (Abb. 18 oben) betrieben (Einzelprozesse) und, wie im vorangegangenen Abschnitt erläutert, detailliert bilanziert. Mit den Eingangsmengen (Abfall für die Müllverbrennung, Steinkohle und Rohstoffe für den Klinkerprozess) werden bei getrennten Prozessen ein bestimmter Betrag an elektrischer Energie aus der Müllverbrennung und eine bestimmte Menge an erzeugtem Klinker (Vergleichsbasis 1 000 kg) erzeugt. Die beiden Prozesse werden nun gekoppelt (Koppelprozess) (Abb. 18 unten), indem ein Teil der Steinkohle für den Klinkerprozess durch Abfall substituiert wird, wobei die Eingangsmengen an Abfall und Steinkohle gegenüber den Einzelprozessen zunächst gleich bleiben.

Aus Abbildung 18 erkennt man, dass ein Teil des Abfalls unter Aufwand von elektrischer Energie mechanisch-biologisch vorbehandelt wird, so dass ein Ersatzbrennstoff entsteht, der, mit dem oben genannten Energieaustauschverhältnis bewertet, zur Substitution herangezogen wird (in dem Beispiel in Abb. 18 erkennt man, dass 16,5 kg Steinkohle durch 29,8 kg Ersatzbrennstoff substituiert werden; der Übersichtlichkeit wegen ist hier das Energieaustauschverhältnis mit dem Wert „eins“ angesetzt). Die substituierte Kohle wird in einem Kraftwerk verstromt, während der Rest aus der mechanisch-biologischen Vorbehandlung, die niederkalorische Fraktion, zusammen mit dem Sperrmüllanteil ausreicht, um eine Müllverbrennung noch befriedigend betreiben zu können.

Man erkennt, dass in Summe in dem vorliegenden Beispiel nach Abzug der für die mechanisch-biologische Vorbehandlung benötigten elektrischen Energie insgesamt ca. 14 % mehr elektrische Energie bereitgestellt wird, im Vergleich zu dem Betrieb der Einzelprozesse. Dabei wird die produzierte Klinkermenge als Basis beibehalten. Im vorliegenden Fall bedeutet dies eine Verringerung der Primärenergieressource „Kohle“ um 3 % und ein entsprechendes CO₂-Minderungspotenzial.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass bei solchen hier nur exemplarisch darstellbaren Koppelprozessen, je nach Randbedingungen und Verhältnissen, sich auch ein negatives Ergebnis ergeben kann, d. h., dass dann Koppelprozesse weniger Energie bereitstellen als Einzelprozesse. Solche Verhältnisse können auftreten, wenn bei der Ersatzbrennstoffherstellung so weit gegangen wird, dass für den verbleibenden niederkalorischen Reststoff, der in einer Müllverbrennungsanlage „entsorgt“ werden muss, dort Zusatzprimärenergie (z. B. Erdgas, oder für Sauerstoffbereitstellung usw.) erforderlich wird. Dieses wäre nicht im Sinne der Abfallwirtschaft und wird auch nicht bei der Herstellung von Ersatzbrennstoff beabsichtigt.

In der umgekehrten Argumentation stellt sich die Ersatzbrennstoffherstellung wiederum gerade dort günstig dar, wo die niederkalorische Restfraktion einen Heizwert in Höhe des Auslegungswertes für ein Müllkraftwerk hat. Allgemein hängt beim Vergleich von Einzel- mit Koppelprozessen die Entscheidung, in welchem Umfang Primärenergie eingespart wird und entsprechend CO₂-Emissionen gemindert werden, von vielen Einflussgrößen ab, insbesondere von dem Energieaustauschverhältnis, dem Nettoprimärwirkungsgrad der Müllverbrennungsanlage (MVA) im Einzelprozess, dem Nettoprimärwirkungsgrad der MVA im Koppelprozess, dem Nettoprimärwirkungsgrad des Kraftwerks für Primärenergie, dem Energieaustauschverhältnis für die Vorbehandlung, dem Heizwert des Primärbrennstoffs, dem Heizwert des Ersatzbrennstoffs, dem Heizwert des Abfalls, von dem ausgegangen wird, der Verteilung der Fraktionen auf Ersatzbrennstoff, MVA und Deponie, usw.

Ein Beispiel für ausgewählte Randbedingungen zeigt Abbildung 19. Hier bedeutet Z_e das elektrische Nutzenergieverhältnis, gebildet aus elektrischer Nutzenergie bei Koppelprozessbetrieb zur elektrischen Nutzenergie bei Einzelprozessbetrieb. $Z_e > 1$ bedeutet Ressourceneinsparung durch Koppelprozessbetrieb, $Z_e < 1$ bedeutet Ressourceneinsparung bei Einzelprozessbetrieb.

Ersatzbrennstoffherstellung und Müllverbrennung widersprechen sich somit nicht, sondern ergänzen sich. Aus Sicht der Abfallwirtschaft wäre es nicht richtig, nur auf die Müllverbrennung zu schauen, wie es auch ebenso verkehrt wäre, nur auf Ersatzbrennstoffherstellung abzustellen. Selbstverständlich muss auch auf den Eintrag von Spurenelementen wie Schwermetallen aus dem Brennstoff in das Gut geachtet werden. Wenn von dem Brennstoff ein Bruchteil dessen stammt, was durch das Gut eingetragen wird und sich dabei Phasen bilden, die ohnehin im Gut beim Herstellungsprozess

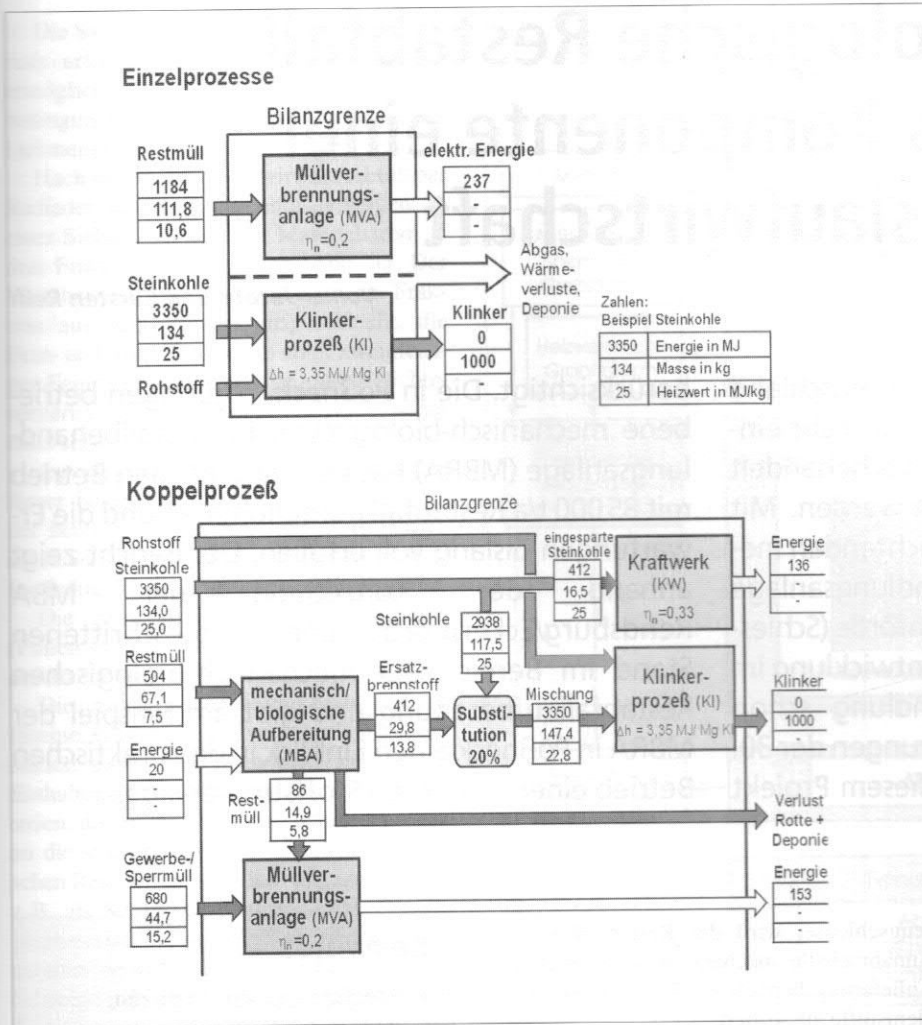


Abb. 18: Vereinfachte Darstellung der Einzelprozesse Müllverbrennungs- und Klinkerherstellungsprozess (Bild oben) und zugehörige vereinfachte Darstellung des Koppelprozesses (Bild unten), in dem der Primärbrennstoff Steinkohle durch Ersatzbrennstoff aus mechanisch-biologischer Vorbehandlung substituiert wird^{1,6}.

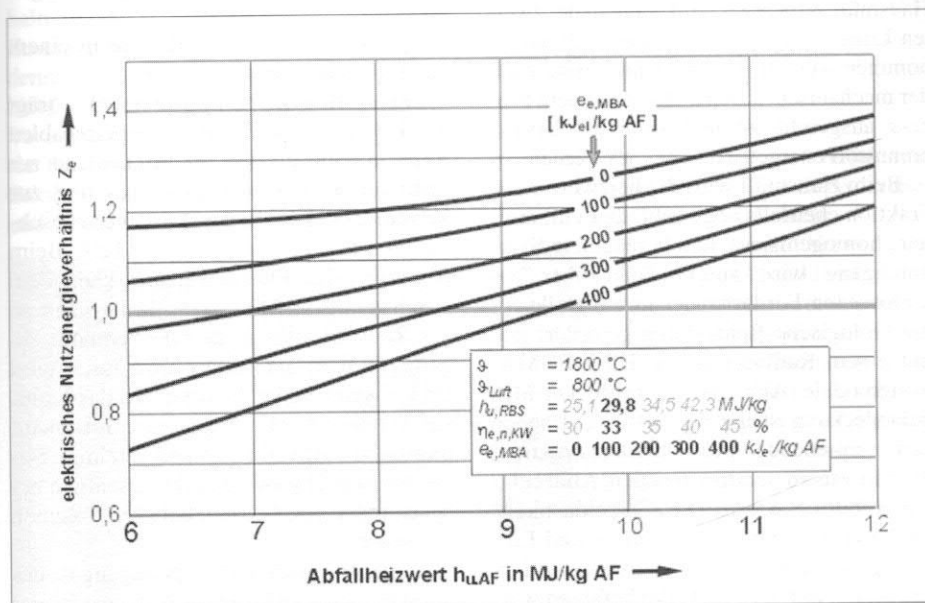


Abb. 19: Elektrisches Nutzenenergieverhältnis Z_e in Abhängigkeit vom Abfallheizwert $h_{u,AF}$ für verschiedene elektrische Energieaufwendungen $e_{e,MBA}$ in der mechanisch-biologischen Aufbereitung⁵.

(Brennprozess) ohne Brennstoffsubstitution „natürlich“ entstehen, sollte die Prüfung für eine Umweltverträglichkeit nicht an einem Primärenergiebrennstoff, sondern an dem im Koppelprozess erzeugten Gut und der verbleibenden Müllverbrennungsschlacke geschehen.

Es sei weiter daran erinnert, dass nach dem derzeitigen Stand wegen der in Kürze zu erwartenden Änderungen der Ablagebestimmungen die Müllmengen, die nicht mehr auf die Deponie gelangen dürfen, erheblich anwachsen werden. Dann sind alle Maßnahmen für kontrollierte abfallwirtschaftliche und umweltgerechte Wege erforderlich.

Literatur

- 1 Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren, Teubner-Reihe Umwelt, B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Stuttgart, Leipzig, 2001.
- 2 Kolb, T.; Leuckel, W.: Untersuchung zur Minderung der NO_x -Emission durch dreistufige Verbrennung; Chem.-Ing.-Tech. 63 (1991) Nr. 7, S. 758-759.
- 3 Dryer, F.L.; Glassman, I.: High-Temperature Oxidation of CO and CH_4 ; 14th Symp. (International) Combustion, Comb. Inst. Pittsburgh, 1973.
- 4 Biollaz, S.; Beckmann, M.; Davidovic, M.; Jentsch, T.: Volatility of Zn and Cu in Waste Incineration: Radio-Tracer Experiments on a Pilot Incinerator; 5rd European Conference on Industrial Furnaces and Boilers (INFUB 2000), Porto, Portugal, 11.-14. April 2000, PreProceedings.
- 5 Schulenburg, F.; Scholz, R.: Optimierung der Energieauskopplung bei thermischen Abfallbehandlungsverfahren; In: Stand und Perspektiven der thermischen Restabfallbehandlung, K. Wiemer, M. Kern (Hrsg.), Witzenhäuser, 2000, ISBN 3-928673-32-7, S. 163-199.
- 6 Beckmann, M.; Scholz, R.: Energetische Bewertung der Substitution von Brennstoffen durch Ersatzbrennstoffe aus Abfällen bei Hochtemperaturprozessen zur Stoffbehandlung, Teil 1 und Teil 2, ZKG International, 52 (1999) Nr. 6, S. 287-303 und Nr. 8, S. 411-419.
- 7 Collins, H.-J.; Münnich, K.: Stoffstromtrennung von Siedlungsabfall vor einer thermischen Behandlung zur Optimierung des Entsorgungskonzeptes; In: Stoffstromspezifische Abfallbehandlung im Hinblick auf thermische Verfahren, 13. ZAF-Seminar, Braunschweig, 1998, S. 53-62.

Prof.-Dr. Ing Reinhard Scholz, Dr. Frank Schulenburg, Universität Clausthal, Prof.-Dr.-Ing. Michael Beckmann, Universität Weimar