

Vergleich verschiedener Konzepte aus mechanisch-biologischen und thermischen Verfahrensschritten zur Abfallbehandlung

Beckmann, M.; Schulenburg, F.; Scholz, R.

1 Einleitung

Im Bereich der Abfallwirtschaft stehen eine Reihe von Konzepten für die Abfallbehandlung zur Auswahl. Eingeschlossen in diese Konzepte sind in zunehmendem Maße auch die stoffliche und energetische Nutzung von Teilfraktionen in Prozessen zur Grundstoffherstellung (GSH) (Zement-, Kalk-, Stahlindustrie usw.) oder zur ausschließlichen Energieumwandlung.

Das Bild 1 verdeutlicht schematisch diese prinzipiellen Möglichkeiten für Haus- und Gewerbeabfälle, Kunststoffabfälle und Klärschlamm. Bei der hier gewählten Einteilung in die drei Verfahrensabschnitte

- mechanisch und/oder biologische Behandlung (Vorbehandlung)
- thermische Abfallbehandlung und
- Produktionsprozesse

sind in Bild 1 jeweils nur die zugehörigen Grundoperationen eingetragen. Für jeden Verfahrensabschnitt lassen sich natürlich weitere Einteilungen anhand der verschiedenen Verfahren bzw. bei den Produktionsprozessen anhand der Industriebereiche vornehmen. Hierzu wird auf ein umfangreiches Schrifttum sowohl für die mechanisch/biologischen Verfahren [z.B. 1 bis 6], als auch für die thermischen Abfallbehandlungsverfahren [z.B. 7 bis 14] und die Produktionsprozesse [z.B. 15 bis 22] verwiesen.

Im folgenden Beitrag werden insbesondere Konzepte zur Verwertung von Restabfall aus Hausmüll sowie Gewerbe-/Sperrmüll kurz erläutert, energetisch bewertet und verglichen.

Im Rahmen der Abfallbehandlung gibt es zur Zeit Überlegungen, das klassische thermische Verfahren der Hausmüllverbrennung auf einem Rost [z.B. 9] (Verfahrenslinie I (VL I) in Bild 2) durch eine Vorbehandlung (z.B. einer mechanisch-biologischen Aufbereitung; MBA) [z.B. 1 bis 6] zu erweitern, um dort eine Inertstoffabtrennung¹⁾, Wasserreduzierung, Heizwertanhebung usw. zu erreichen. Insgesamt erhält man damit eine thermisch verwertbare, heizwertreiche Restabfallfraktion sowie eine unmittelbar stofflich verwertbare und zu deponierende Fraktion. Für die sich anschließende thermische Behandlung des heizwertreichen Restabfalls werden derzeit unterschiedliche Möglichkeiten diskutiert.

- a) Einsatz in einem klassischen Müllkraftwerk, um dort zu einer Reduzierung der Luftzahl, gleichmäßigerem Betrieb, besserem Wirkungsgrad usw. beizutragen (Erweiterung des Einzelprozesses (Verfahrenslinie I (VL I)) um MBA zu einem sog. Koppel-

¹⁾ Inertstoffe sind hier feste Stoffe oder Stoffgemische, die keine „brennbaren Bestandteile“ besitzen.

Vergleich verschiedener Konzepte aus mechanisch-biologischen und thermischen Verfahrensschritten zur Abfallbehandlung

Beckmann, M.; Schulenburg, F.; Scholz, R.

1 Einleitung

Im Bereich der Abfallwirtschaft stehen eine Reihe von Konzepten für die Abfallbehandlung zur Auswahl. Eingeschlossen in diese Konzepte sind in zunehmendem Maße auch die stoffliche und energetische Nutzung von Teilfraktionen in Prozessen zur Grundstoffherstellung (GSH) (Zement-, Kalk-, Stahlindustrie usw.) oder zur ausschließlichen Energieumwandlung.

Das Bild 1 verdeutlicht schematisch diese prinzipiellen Möglichkeiten für Haus- und Gewerbeabfälle, Kunststoffabfälle und Klärschlamm. Bei der hier gewählten Einteilung in die drei Verfahrensabschnitte

- mechanisch und/oder biologische Behandlung (Vorbehandlung)
- thermische Abfallbehandlung und
- Produktionsprozesse

sind in Bild 1 jeweils nur die zugehörigen Grundoperationen eingetragen. Für jeden Verfahrensabschnitt lassen sich natürlich weitere Einteilungen anhand der verschiedenen Verfahren bzw. bei den Produktionsprozessen anhand der Industriebereiche vornehmen. Hierzu wird auf ein umfangreiches Schrifttum sowohl für die mechanisch/biologischen Verfahren [z.B. 1 bis 6], als auch für die thermischen Abfallbehandlungsverfahren [z.B. 7 bis 14] und die Produktionsprozesse [z.B. 15 bis 22] verwiesen.

Im folgenden Beitrag werden insbesondere Konzepte zur Verwertung von Restabfall aus Hausmüll sowie Gewerbe-/Sperrmüll kurz erläutert, energetisch bewertet und verglichen.

Im Rahmen der Abfallbehandlung gibt es zur Zeit Überlegungen, das klassische thermische Verfahren der Hausmüllverbrennung auf einem Rost [z.B. 9] (Verfahrenslinie I (VL I) in Bild 2) durch eine Vorbehandlung (z.B. einer mechanisch-biologischen Aufbereitung; MBA) [z.B. 1 bis 6] zu erweitern, um dort eine Inertstoffabtrennung¹⁾, Wasserreduzierung, Heizwertanhebung usw. zu erreichen. Insgesamt erhält man damit eine thermisch verwertbare, heizwertreiche Restabfallfraktion sowie eine unmittelbar stofflich verwertbare und zu deponierende Fraktion. Für die sich anschließende thermische Behandlung des heizwertreichen Restabfalls werden derzeit unterschiedliche Möglichkeiten diskutiert.

- a) Einsatz in einem klassischen Müllkraftwerk, um dort zu einer Reduzierung der Luftzahl, gleichmäßigerem Betrieb, besserem Wirkungsgrad usw. beizutragen (Erweiterung des Einzelprozesses (Verfahrenslinie I (VL I)) um MBA zu einem sog. Koppel-

¹⁾ Inertstoffe sind hier feste Stoffe oder Stoffgemische, die keine „brennbaren Bestandteile“ besitzen.

prozeß (VL II, III... in Bild 2). Der verbleibende heizwertarme Restabfall wird deponiert.

- b) Ersatz in einem Hochtemperaturprozeß zur Grundstoffherstellung, um Regelbrennstoff (Primärenergie) zu substituieren und damit einzusparen (Brennstoffsubstitution) [z.B. 17, 22]. Man erweitert hier einen Einzelprozeß zur Grundstoffherstellung (VL A in Bild 2) durch eine Vorbehandlung (MBA) zu einem Koppelprozeß (VL B in Bild 2), wobei der verbleibende heizwertarme Restabfall aus der Vorbehandlung zu deponieren oder in einem Müllkraftwerk thermisch zu behandeln ist.
- c) Einsatz in einem Kohlekraftwerk, um ebenfalls Primärenergie einzusparen [z.B. 21]. Man erweitert hier einen Einzelprozeß zur Energiebereitstellung (Kohlekraftwerk) (VL C in Bild 2) durch eine Vorbehandlung (MBA) zu einem Koppelprozeß (VL D in Bild 2), wobei der verbleibende heizwertarme Restabfall aus der Vorbehandlung zu deponieren oder ebenfalls in einem Müllkraftwerk thermisch zu behandeln ist.

Im Fall b) und c) kann sich an die "kalte" Ersatzbrennstoffherstellung eine thermische Vorbehandlung durch Vergasung [22] oder durch Pyrolyse [21] anschließen. Daneben gibt es zur Zeit im Bereich der Müllkraftwerke eine Reihe von Weiterentwicklungen und Prozeßoptimierungen der klassischen Müllverbrennung in Rostsystemen und die Entwicklung sowie die Umsetzung von neuen Verfahren [z.B. 7 bis 14].

Durch die Vielzahl der dargestellten Konzepte für die thermische Behandlung des Hausmülls und Gewerbe-/Sperrmülls, stellt sich nun insbesondere die Fragestellung der energetischen Bewertung und des Vergleichs der unterschiedlichen Verfahrenslinien.

2 Verfahrenslinien (Verfahrensketten)

Verfahren zur thermischen Behandlung von Abfällen setzen sich in der Regel aus mehreren Verfahrensbausteinen zusammen, auf die im folgenden kurz eingegangen wird.

2.1 Müllkraftwerk (MKW)

Ein heute übliches klassisches Müllkraftwerk (MKW) für Hausmüll besteht aus einer Reihe von verfahrenstechnischen Grundbausteinen und den zugehörigen Apparaten bzw. Apparategruppen wie z.B. Rost, Nachbrennkammer, Kessel, Turbine, Abgasreinigung und Kamin. Für eine Bewertung ist es zweckmäßig, zunächst in einem 1. Schritt den inneren Bilanzraum des thermischen Behandlungsverfahrens als sog. thermisches Hauptverfahren (Rost, Nachbrennkammer, Kessel) festzulegen und in einem 2. Schritt diesen auf den Bilanzraum des Gesamtverfahrens, also einschließlich der Verfahrensbausteine Abgasreinigung (AGR), Energieumwandlung (z.B. Dampf, elektrische Energie) usw., zu erweitern (Bild 3). Betrachtet man die derzeit in Diskussion befindlichen verschiedenen thermischen Verfahren (s.o.), so ist es zweckmäßig, den thermischen Behandlungsprozeß in mindestens zwei Einheiten aufzuteilen. Dabei liegt der Schwerpunkt in der 1. Einheit bei der thermischen Feststoffbehandlung (beim klassischen Verfahren Rostsystem, in Bild 3 Verbrennung) und in der sich anschließenden 2. Einheit bei der thermischen Gas- und Flugstaubbehandlung (beim klassischen Verfahren

Nachverbrennungszone, in Bild 3 Verbrennung). Die Einheiten können als thermische Grundbausteine in der Form **Thermolyse** (Sammelbegriff für Trocknungs-, Entgasungs- und Pyrolysevorgänge; thermischer Abfallumsatz ohne Sauerstoff), **Vergasung** (thermischer Abfallumsatz unter Sauerstoffmangel) oder **Verbrennung** ausgeführt werden. Daran schließt sich in der Regel der Verfahrensbaustein Wärmeauskopplung (z.B. Kessel) aus den Abgasen an. Je nach Kombination der Grundbausteine, der Aufgabenstellung der Behandlung (Entsorgung, energetische oder/und stoffliche Verwertung) und der verwendeten Prozeßführung benötigen die einzelnen Verfahren Ressourcen in Form von Zusatzstoffen und Zusatzenergien. Bei der thermischen Behandlung entstehen Abgas und unterschiedlich verwertbare Stoffe, wie Prozeßdampf, elektrische Energie, Synthesegas, Asche, Granulat usw. (siehe Bild 3).

Für die energetische Bewertung und den anschließenden Vergleich derartiger Prozeßführungen und Verfahrenskombinationen sind Bilanzmodelle und entsprechende Bewertungskriterien (s.u.) erforderlich.

2.2 Abfallvorbehandlungsverfahren

Wie bereits erwähnt, können für die Abfallvorbereitung mechanisch/biologische Verfahrensbausteine herangezogen werden (siehe Bild 1). Im folgenden soll kurz auf die wesentlichen Kombinationen und deren Kopplung mit einem Müllkraftwerk eingegangen werden (Bild 4).

Verfahrenslinie I: Diese stellt als klassisches Müllverbrennungsverfahren die thermische Behandlung des Hausmülls ohne externe Vorbehandlung dar [z.B. 7]. Die Grobzerkleinerung erfolgt, falls notwendig, unmittelbar vor der Müllbunkerung in der thermischen Anlage. Die Abscheidung von Schrott aus der Asche bzw. Schlacke als mechanisches Verfahren ist in die Anlage integriert.

Verfahrenslinie II: Hierbei handelt es sich um eine mechanische Vorbehandlungseinheit, mit dem Ziel der Erzeugung einer heizwertreichen Fraktion, um diese anschließend thermisch zu verwerten [z.B. 26]. Der verbleibende Restabfall wird deponiert.

Verfahrenslinie III: Neben der mechanischen Aufbereitung mit einer Feinzerkleinerung und Abscheidung kommt auch eine biologische Vorbehandlung in Form einer Kurzzeitrotte (Rottezeit mehrere Tage) [z.B. 27] zum Einsatz. Der verbleibende Restabfall wird thermisch behandelt.

Verfahrenslinie IV: In dieser Verfahrenslinie kommt eine Langzeitrotte (Rottezeit mehrere Monate) zum Einsatz [z.B. 28]. Nach einer Siebung des Restabfalls wird in dem vorliegenden Beispiel der erzeugte heizwertreiche Restabfall einer thermischen Behandlung in einem MKW zugeführt. Der verbleibende Restabfall wird deponiert.

Nach der Behandlung verbleibt jeweils eine Schrottfraktion (Verwertung hoch), eine Asche (Verwertung niedrig) sowie Reststoffe und ggf. heizwertarmer Restabfall (Deponie).

2.3 Ersatzbrennstoff aus Abfall für den Einsatz in Hochtemperaturprozessen

Für den Einsatz einer heizwertreichen Hausmüllfraktion aus einer mechanisch-biologischen Vorbehandlung (Ersatzbrennstoff) in Prozessen zur Energiebereitstellung (Kraftwerksanlagen) und insbesondere bei Prozessen zur Grundstoffherstellung müssen zunächst, ebenso wie für den Einsatz von Regelbrennstoffen, eine Reihe von brennstofftechnischen Kriterien jeweils in Verbindung mit charakteristischen prozeßtechnischen Merkmalen beachtet werden.

Aus brennstofftechnischer Sicht ist ein Brennstoff im wesentlichen durch die

- chemischen
- mechanischen
- kalorischen und
- reaktionstechnischen Eigenschaften

charakterisiert.

Die genannten Eigenschaften dürfen jedoch nicht unabhängig von der jeweiligen Aufgabe, d.h. vom verfahrenstechnischen Prozeß betrachtet werden. Bei der Substitution von Regelbrennstoffen durch Ersatzbrennstoffe aus Abfällen stellt sich in der Regel zuerst die Frage nach dem Einfluß der Ersatz auf die Prozeßbedingungen des jeweiligen Prozesses. Besonders werden dabei die Auswirkungen des Einsatzbrennstoffes auf Prozeßtemperaturen, Abgasmassen, Schadstoffe bzw. Schadstofffrachten und spezifische Energieaufwendungen bei Industrieöfen für die Grundstoffherstellung bzw. Wirkungsgrade bei Energieumwandlungsprozesse (Müll- und Kohlekraftwerk) betrachtet.

Erst danach lassen sich Möglichkeiten zur Optimierung der Prozeßführung, z.B. durch Wärmerückgewinnung oder Verbundbetrieb bei den durch Substitution entsprechend veränderten Randbedingungen diskutieren. Die Bewertung eines Ersatzbrennstoffes ist somit nicht nur von der Art des Brennstoffes selbst abhängig, sondern wird maßgeblich auch von der Betriebsweise der Anlage sowie der Wärmerückgewinnung beeinflusst.

Die sich durch die Substitution ergebenden Auswirkungen lassen sich im wesentlichen von den kalorischen Eigenschaften, wie Heizwert h_u , spezifischer Mindestluftbedarf l_{\min} , spezifische Abgasmasse $m_{AG,\min}$, adiabate Verbrennungstemperatur ϑ_{ad} usw. in Verbindung mit dem betrachteten Prozeß ableiten.

Insbesondere ist der Einfluß der adiabaten Verbrennungstemperatur auf die Prozeßbedingungen in Verbindung mit den anderen vorgenannten Größen, bei Hochtemperaturprozessen zu beachten. Die Darstellung dieses Zusammenhanges ist ausführlicher in [z.B. 25, 29, 30] dargestellt und wird hier deshalb nur zusammengefaßt wiedergegeben.

Es wird vereinfacht angenommen, daß sich ein kontinuierlicher Ofenprozeß mit adiabaten (wärmedichten) Außenwänden sowohl bei Regelbrennstoffbetrieb (z.B. Steinkohle) als auch bei Ersatzbrennstoffbetrieb (z.B. heizwertreiche Restabfallfraktion) als Rührkessellement (vollkommene Durchmischung der Abgase) darstellen läßt (Bild 5). Weiter wird angenommen, daß Guttemperatur ϑ_{Gut} , Gastemperatur ϑ_G (Bilanztemperatur ϑ_{Bz}), Wärmeübertragungsbedingungen und Ofenleistung bei beiden Betriebsweisen konstant bleiben. Aus einer

Bilanzierung (hier nicht näher dargestellt) ist dann unmittelbar ersichtlich, daß durch die unterschiedlichen Heizwerte und damit verbundenen unterschiedlichen adiabaten Verbrennungstemperaturen eine konstante Ofenleistung nur durch die Erhöhung der Abgasmasse des Brennstoffes mit dem geringsten Heizwert ausgeglichen werden kann. Das bedeutet für den hier betrachteten Fall, daß die zuzuführende Abfallmasse des Ersatzbrennstoffes (ESB) gegenüber dem Regelbrennstoff (RBS) erhöht werden muß. Zur Darstellung dieser sog. Wertigkeit eines Brennstoffes kann das sog. Energieaustauschverhältnis

$$EA = \frac{\dot{m}_{EBS} \cdot h_{u,EBS}}{\dot{m}_{RBS} \cdot h_{u,RBS}} \quad (1)$$

herangezogen werden, das im wesentlichen von der Bilanztemperatur im Ofen, der Vorwärmtemperatur der Verbrennungsluft ϑ_L , der Stöchiometriezahl λ , dem Heizwert des Regelbrennstoffes $h_{u,RBS}$ und des Ersatzbrennstoffes $h_{u,EBS}$ sowie der Prozeßschaltung abhängt. Ein Energieaustauschverhältnis von $EA = 1$ bedeutet, daß der Energieaufwand beim Substitutionsbrennstoff und beim Regelbrennstoff gleich ist (Brennstoffe sind energetisch gleichwertig). $EA > 1$ bedeutet, daß durch den Substitutionsbrennstoff mehr Energie im Vergleich zum Regelbrennstoff eingekoppelt werden muß. $EA < 1$ bedeutet hingegen, daß beim Einsatz des Substitutionsbrennstoff weniger Energie für den Prozeß eingesetzt werden muß.

Das [Bild 6](#) zeigt beispielhaft die Energieaustauschverhältnisse EA in Abhängigkeit von der geforderten Gastemperatur, z.B. in einem Hochtemperaturprozeß zur Stoffumwandlung oder in einem Kraftwerksprozeß, für den Ersatz eines Regelbrennstoffes mit $h_{u,RBS} = 25 \text{ MJ/kg}$ durch unterschiedliche Ersatzbrennstoffe ($h_{u,EBS} = 11 \text{ MJ/kg}$, 15 MJ/kg , 20 MJ/kg , 30 MJ/kg und 35 MJ/kg) jeweils ohne und mit Luftvorwärmung. Das Energieaustauschverhältnis ist um so größer, je höher die zu erreichende Gastemperatur (Bilanztemperatur) und je niedriger der Heizwert des Ersatzbrennstoffes im Vergleich zum Primärbrennstoff sind. Für den Fall, daß der Heizwert des Ersatzbrennstoffes größer als der des Primärbrennstoffes ist, nimmt das Energieaustauschverhältnis Werte an, die kleiner als eins sind. Das betrifft beispielsweise die Substitution von Steinkohle durch hochkalorige Kunststoffabfälle. Vergleicht man die Energieaustauschverhältnisse in [Bild 6](#) bei einer Gastemperatur von 1700°C für einen Ersatzbrennstoff ($h_{u,EBS} = 11 \text{ MJ/kg}$) mit und ohne Luftvorwärmung, so wird weiter die bereits erwähnte Bedeutung der Wärmerückgewinnung und damit der Einfluß der Anlagenschaltung deutlich. So läßt sich mit dem Ersatzbrennstoff $h_{u,EBS} = 11 \text{ MJ/kg}$ eine Gastemperatur von 1700°C nicht erreichen. Mit Luftvorwärmung ergibt sich ein Energieaustauschverhältnis von $EA = 1,35$ und damit nach Gleichung (1) für die Randbedingungen der Ersatz von 1 kg Regelbrennstoff durch $3,1 \text{ kg}$ Ersatzbrennstoff. In diesem Zusammenhang sei angemerkt, daß bei Kohlekraftwerken, also Prozessen zur Energiebereitstellung, in der Regel die Gastemperaturen zwischen 850°C und 1300°C vorliegen und sich damit deutlich niedrigere Energieaustauschverhältnisse (siehe [Bild 6](#)) ergeben.

3 Bewertungsmöglichkeiten

Die Grundlagen für eine Bewertung von unterschiedlichen Verfahren der Abfallbehandlung stellen zunächst die systematischen Darstellungen der Verfahrensketten durch entsprechende

Grundbausteine der mechanischen-biologischen, thermischen Abfallbehandlung sowie der Stoffbehandlungs- und Energiebereitstellungsprozesse dar. Für diese Grundbausteine sind entsprechende Sachbilanzen in Form von Massen-, Stoff- und Energiebilanzen unter Berücksichtigung entsprechender Bilanzgrenzen zu erstellen. Die Bilanzierung kann mit vereinfachten, jedoch in der Praxis tragfähigen, mathematischen Modelle erfolgen. Im Hinblick auf die Bewertung lassen sich dann aus den Sachbilanzen entsprechende Bewertungskriterien (wie z.B. Wirkungsgrade, Abgasmassenverhältnisse, Frachten usw.) bilden. Im folgenden wird hierauf kurz im Zusammenhang mit der thermischen Abfallbehandlung und mit Prozessen der Hochtemperaturstoffbehandlung eingegangen. Zur Bilanzierung der MBA sei an dieser Stelle auf [z.B. 31] verwiesen.

3.1 Thermische Abfallbehandlungsverfahren

Die prinzipielle Vorgehensweise bei der Bilanzierung sei kurz am Beispiel der Wirkungsgradbildung der thermischen Abfallbehandlung erläutert. Die hier nur zusammenfassend wiedergegebenen Aspekte sind ausführlicher in [z.B. 23, 32 bis 34] dargestellt. Soll zusätzlich zur thermischen Abfallbehandlung eine Vorbehandlung, z.B. in Form einer MBA, mit berücksichtigt werden, ist die Bewertung entsprechend zu ergänzen (hier nicht näher dargestellt [z.B. 24, 25, 31]). In gleicher Weise erfolgt die Bewertung von Prozessen zur Energiebereitstellung (Kohlekraftwerk).

Allgemein versteht man unter einem Wirkungsgrad das Verhältnis zwischen Nutzen zu Aufwand. Je nachdem, was als „Erfolg“ bzw. „Nutzen“ und als „Aufwand“ angesehen wird, ergeben sich ganz unterschiedliche Wirkungsgrade. Dies sei prinzipiell an einem einfachen Beispiel erläutert (Bild 7a). Der betrachteten Anlage im Bilanzraum GV (Gesamtverfahren GV) wird die Abfallenergie H_{AF} und die benötigten Zusatzenergien ΣE_{Zus} zugeführt. Die Anlage gibt die Nutzenergie H_{Nutz} und die Summe der Energieverluste $\Sigma E_{Verl, GV}$ ab. Dadurch ergibt sich der dargestellte sog. „Anlagenwirkungsgrad“ η_a .

Zählt man neben den zusätzlich zum Betrieb der Anlage zuzuführenden Energien ΣE_{Zus} noch die Verlustenergien $\Sigma E_{Verl, UP}$ bei den zugehörigen Umwandlungsprozessen für Primärenergien (z.B. Verluste bei der elektrischen Energieerzeugung im externen Kraftwerk) als Aufwand hinzu (Bilanzraum UP), d.h. besser ausgedrückt, wertet man die für den Betrieb der Anlage erforderlichen Primärenergien ΣH_p insgesamt jeweils als Aufwand, d.h. z.B.

- Primärenergie für die Bereitstellung der elektrischen Energie,
- Primärenergie für eine eventuelle Sauerstoffherzeugung,
- Primärenergie zur Erzeugung von anderen Betriebs- und Hilfsstoffen usw.,

dann erhält man den kumulierten Bilanzraum KU und entsprechend aus dem Verhältnis von Erfolg zu Aufwand den sog. Primärwirkungsgrad η_p , der erheblich kleiner sein kann als der Anlagenwirkungsgrad η_a . Bei dieser Betrachtungsweise handelt es sich um eine sogenannte „kumulierte“ Darstellung der wichtigsten vor- und eventuell nachgeschalteten Prozessketten-glieder. Ausgangspunkt der kumulierten Betrachtung sind die benötigten Primärenergien und Rohstoffe für die thermische Behandlung des Abfalls. Endpunkt der Darstellung ist schließ-

lich die umweltverträgliche Ablagerung der verbleibenden Reststoffe und/oder die Eingliederung von verbleibenden Wertstoffen in einem Wiederverarbeitungsprozeß.

Der zur Behandlung erforderliche Primärenergieaufwand könnte als Ressource geschont werden, wenn es den zu behandelnden Abfall nicht gäbe. Man kann folglich einen „Abfallnutzen“ H_{Netto} bilden, in dem man von der Nutzenergie H_{Nutz} die benötigten Primärenergien ΣH_p abzieht. Es würde also die Primärressource dann durch „eigene erzeugte“ Nutzenergie ersetzt bzw. substituiert bzw. gedanklich rückgeführt, wie in **Bild 7b** gestrichelt dargestellt. Es verbleibt damit als Aufwand nur noch die zugeführte Abfallenergie H_{AF} und als Nutzen die Nettoenergie H_{Netto} , so daß sich auf diese Weise der sog. Nettoprimärwirkungsgrad für den Fall $(H_{\text{Nutz}} - \Sigma H_p) \geq 0$ ²⁾ ergibt [23, 32 bis 34].

3.2 Hochtemperaturprozesse zur Grundstoffherstellung

Energetische Wirkungsgrade sind auch bei Hochtemperaturprozessen zur Grundstoffherstellung (Produktionsverfahren) selbstverständlich zur Beurteilung der technischen Funktion von Anlagenteilen, -abschnitten usw. sinnvoll, nicht jedoch zur Bewertung im Sinne einer energetischen Effektivität der Gesamtanlage. Dies liegt daran, daß der Nutzen letztlich das Produkt ist, das nach Herstellung bei Umgebungstemperatur vorliegt. Unterstellt man der Einfachheit und Übersichtlichkeit wegen hier zunächst, daß Reaktionsenthalpien während der Behandlung im Stoff von vernachlässigbarer Größe sind, so hat der behandelte Massenstrom vor und nach dem Produktionsverfahren das gleiche Energieniveau. Damit liegt ein energetischer Nutzen von „Null“ vor. Der Energieeinsatz bei solchen Produktionsverfahren dient also nur zur Dekkung der Verluste. Zur Beurteilung von Stoffbehandlungsverfahren wird daher der *spezifische Energiebedarf*

$$\frac{\text{Aufwand an Energie}}{\text{Masse des behandelten (erzeugten) Gutes (Produktes)}} = \frac{\Sigma \dot{E}_{\text{GV}}}{\dot{m}_{\text{Gut(Prod.)}}} \quad (2)$$

herangezogen. Als Einheit ergibt sich die für die Gutbehandlung (Produktionserzeugung) erforderliche Leistung in Form von Brennstoffenergie, elektrischer Energie usw. bezogen auf den Massenstrom des behandelten Gutes bzw. auf den Massenstrom des erzeugten Produktes. Kann der elektrische Energiebedarf nicht vernachlässigt werden, müssen zur Bestimmung des *spezifischen Primärenergiebedarfs* die Verlustenergieströme bei der Primärenergieumwandlung, z.B. in einem externen Kraftwerk bei der elektrischen Energieumwandlung, mit berücksichtigt werden. Durch die Ausnutzung der Abgas- und Gutenergie (Produktenergie) durch Wärmerückgewinnung kann der spezifische Energiebedarf erheblich gesenkt werden. Es ist damit erheblich von der jeweiligen Prozeßführung abhängig.

²⁾ Wie bereits angedeutet, kann die Substitution von einer Energieart (z.B. Erdgasenthalpie) durch eine andere (z.B. erzeugte Dampfenthalpie) in der Regel nicht im gleichen Verhältnis (1:1) erfolgen kann, d.h. daß in der Regel die zu substituierende Energiemenge (z.B. an Erdgas gebunden) nicht durch eine gleich hohe, sondern durch eine höhere Energiemenge (Ersatzbrennstoff) (z.B. an Dampf gebunden) zu ersetzen ist (s.o. Energieaustauschverhältnis). Der Übersichtlichkeit wegen wird hier $EA = 1$ gesetzt, um das Prinzip der Substitution bzw. der Energierückführung so einfach, wie in **Bild 10.7b** dargestellt, zu veranschaulichen.

3.3 Thermische Abfallbehandlungsanlagen im Verbund mit anderen Verfahren

Die Betrachtungen in Kapitel 3.1 haben lediglich Bewertungen von Abfallbehandlungsanlagen ggf. in Verbindung mit Vorbehandlungsverfahren zum Ziel. Man kann jedoch eine Abfallbehandlungsanlage als Teil eines größeren Energieverbundsystems ansehen. Beispielsweise stellt sich die Frage, wie **Abfall** als Sekundärbrennstoff (Ersatzbrennstoff) zu bewerten ist,

- wenn er bei Verfahren zur Energiebereitstellung (z.B. elektr. Energieumwandlung im Kraftwerk) sog. Regelbrennstoffe bzw. Primärenergieressourcen substituiert, oder
- wenn er bei Hochtemperaturprozessen der Grundstoffherstellung, wie z.B. der Stahl-, Zement- und Kalkindustrie usw., Regelbrennstoffe substituiert und auf diese Weise Primärenergieressourcen einspart.

Um diese Fragestellungen beantworten zu können, sind komplexe Vergleiche durchzuführen. Eine Möglichkeit des Vergleichs zeigt Bild 8 durch die Gegenüberstellung der sog. Basis- mit der Vergleichssituation. Ausgehend von der energetischen Bilanzierung der jeweiligen Verfahrenslinie erfolgt der Vergleich der

- Basissituation, die gekennzeichnet ist durch ein Nebeneinander von Einzelprozessen (in der Regel derzeitige Situation), d.h.
 - ♦ Abfallbehandlung im Müllkraftwerk bzw. Müllheizkraftwerk und
 - ♦ Prozesse mit Regelbrennstoff (seien es Hochtemperaturprozesse zur Grundstoffherstellung wie im Bild 5 dargestellt oder Prozesse zur Energiebereitstellung (z.B. Kohlekraftwerk))und der
- Vergleichssituation (Verbundsystem oder auch Koppelprozeß), die gekennzeichnet ist
 - ♦ durch den Einsatz eines durch Vorbehandlung (z.B. MBA) erzeugten heizwertreichen Restabfalls in einem Hochtemperaturprozeß zur Grundstoffherstellung oder Prozeß zur Energiebereitstellung und
 - ♦ der energetischen Nutzung der dort eingesparten Primärenergie in einem Kraftwerk (z.B. Kohlekraftwerk).

Die Durchführung des Vergleichs erfolgt auf Basis gleicher produzierter Grundstoffmengen bei Grundstoffherstellungsprozessen oder gleicher Energiemengen bei Energiebereitstellungsprozessen. Als Bewertungsgrundlage kann die verbleibende elektrische Energie unter der Voraussetzung gleicher Energieaufwendungen für die Basis- und Vergleichssituation (Inputgleichheit) herangezogen werden. Deshalb ist es erforderlich (vgl. Bild 8) die substituierte Primärenergie in einem Kraftwerk in elektrische Energie umzuwandeln.

Setzt man zur energetischen Bewertung die erhaltene elektrische Nutzenergie aus der Vergleichssituation $E_{e,Vgl}$ ins Verhältnis zur elektrischen Nutzenergie aus der Basissituation $E_{e,Bas}$, ergibt sich mit Hilfe einer Bilanzierung das sog. elektrische Nutzenergieverhältnis Z_e [32]. Dies ist abhängig vom jeweiligen Wirkungsgrad des Müllkraftwerkes $\eta_{n,MKW}$ und des Kohlekraftwerkes $\eta_{n,KW}$, dem Energieaustauschverhältnis EA, dem elektr. Eigenenergiebedarf der

MBA $e_{e,MBA}$, dem Anfangsabfallheizwert $h_{u,AF}$ und sog. Energieverteilungsfaktoren f_{HR} und f_{HA} , die die Aufteilung der unterschiedlichen Fraktionen in der MBA beschreiben. Ergibt sich für die in Bild 8 dargestellte Gegenüberstellung ein Nutzenergieverhältnis von $Z_e > 1$, wäre der Abfalleinsatz im Hochtemperaturprozeß zur GSH energetisch günstiger und bei $Z_e < 1$ der Abfalleinsatz im MKW.

4 Beispiele

Im folgenden sollen die thermische Behandlung von Hausmüll beispielhaft in Müllkraftwerken (hier nur Verfahrenslinie MBA und MKW), Prozessen zur Energiebereitstellung und Grundstoffherstellung systematisch dargestellt, bewertet und verglichen werden.

4.1 Kopplung von mechanisch-biologischer Abfallaufbereitung und Müllkraftwerk

Die in dem hier gesteckten Rahmen zusammenfassend wiedergegebene Bewertung [25, 32] vergleicht ein klassisches Müllkraftwerk (VL I in Bild 4) ohne externe Vorbehandlung mit Verfahrenslinien, die aus unterschiedlichen Vorbehandlungsverfahren und anschließendem Einsatz der erzeugten heizwertreichen Restabfallfraktion in einem klassischen Müllkraftwerk (VL II bis IV) bestehen.

Ausgangspunkt für die Betrachtungen seien jeweils 1000 kg Hausmüll mit einem üblichen Anfangsabfallheizwert von $h_{u,AF,An} = 8 \text{ MJ/kg}$. Das Bild 9 zeigt beispielhaft einen Verfahrensvergleich mit den wesentlichen Parametern elektrische Nutzenergie, bezogene Abgasmasse und Reststoff, die jeweils nach der Behandlung verbleiben. Insgesamt ergeben sich aus dem Vergleich folgende Ergebnisse:

- Die MBA ermöglicht die Reduzierung der thermisch zu behandelnden Restabfallmasse bis auf 222 kg bei gleichzeitiger Erhöhung des Anfangsabfallheizwertes vom Ausgangspunkt 8 MJ/kg auf 15,1 MJ/kg.
- Die Vorschaltung einer MBA senkt den energetischen Gesamtnutzen (elektr. Nutzenergie) der Verfahrenslinie.
- Die Bilanzierung der MBA ist noch unvollständig. So lassen sich in der Vorbehandlung z.B. die Abluftmassen (in Bild 9 mit Fragezeichen versehen) und die damit verbundenen Frachten zur Zeit noch nicht bestimmen.
- Die Ergebnisse der Modellrechnung liefern die Grundlage zur Bestimmung des Gesamterlöses der Verfahrenslinie.
- Eine abschließende Bewertung, ob das Verfahren mit der höchsten energetischen Verwertung (hier elektrische Energie) oder mit der höchsten stofflichen Verwertung (hier verbleibende feste Reststoff) die günstigste Verfahrensvariante darstellt, kann noch nicht erfolgen, da nach dem KrW-/AbfG energetische und stoffliche Verwertung gleichrangig sind.

4.2 Kopplung von mechanisch-biologischer Aufbereitung und Kohlekraftwerk

Betrachtet man einen Prozeß zur Energiebereitstellung oder weiter unten einen Grundstoffherstellungsprozeß, bei denen ein Regelbrennstoff durch einen Ersatzbrennstoff aus Abfall ersetzt (in der Regel nur teilweise) wird, so ist zur Beurteilung der Umweltauswirkungen unbedingt die gesamte Verfahrenskette der Herstellung des Ersatzbrennstoffes und der Behandlung der verbleibenden Restfraktionen zu bilanzieren. Die sich dabei ergebenden kumulierten Sachbilanzen (Stoff-, Massen- und Energiebilanzen) können dann den Sachbilanzen von Vergleichsprozessen, wie z.B. der thermischen Abfallbehandlung in Müllverbrennungsanlagen, gegenübergestellt werden. Erst danach läßt sich beurteilen, welche Einsparungen von Ressourcen z.B. von fossilen Brennstoffen oder welche Vermeidung an Schadstoffemissionen oder Verringerung des CO_2 -Ausstoßes usw. gegeben sind. Für diese Bewertung ist die genaue Bilanzierung der Einzelprozesse der Verfahrenskette eine wesentliche Grundlage. Die Bewertung kann deshalb nicht pauschal vorgenommen werden, sondern muß unter Beachtung der speziellen Randbedingungen z.B. eines Standortes erfolgen. Wichtig ist dabei u.a. auch das Energieaustauschverhältnis EA, wie das folgende Beispiel des Einsatzes eines Ersatzbrennstoffes in einem Kohlekraftwerk deutlich machen soll.

Das **Bild 10** zeigt schematisch für drei verschiedene Fälle, auf die noch näher eingegangen wird, den Koppelprozeß aus den Bausteinen

- mechanisch-biologische Aufbereitung (MBA) von Restabfall aus Hausmüll mit Hilfe einer Kurzzeitrotte,
- thermische Behandlung der heizwertreichen Restabfallfraktion in einer Pyrolyse [z.B. 21] und damit Erzeugung der Ersatzbrennstoffe Pyrolysegas und Pyrolysekoks,
- Kohlekraftwerk (KW I) (hier Primärbrennstoff Steinkohle) mit der Zuführung der Ersatzbrennstoffe Pyrolysegas und Pyrolysekoks (in Bild 8 vereinfacht als ein Ersatzbrennstoff mit dem Heizwert $h_{u,EBS}$ dargestellt),
- Kohlekraftwerk (KW II) zum Umwandlung der eingesparten Primärenergie in elektrische Energie,
- thermische Behandlung der heizwertarmen Restabfallfraktion aus der MBA und des Gewerbe-/Sperrmülls in einem klassischen Müllkraftwerk.

Weiter ist in dem gewählten Beispiel zur Verdeutlichung der prinzipiellen Zusammenhänge nur die energetische Nutzung auf der Basis elektrischer Energie zugrunde gelegt. Dabei sind für die Verstromung des Regelbrennstoffes in den Kraftwerken (KW, KWI, KWII) $\eta_{n,KW} = 33\%$ gewählt. Für die Verstromung des Abfalls in der MVA ergeben sich aufgrund der Heizwerte des Restmülls entsprechende Nettoprimarywirkungsgrade (siehe Bild 10) [23, 32 bis 34]. Als Basis für die Bewertung ist hier die Bereitstellung von 1000 MJ elektrische Energie angenommen. Das Bild 10 zeigt außerdem die Substitution von 10 % Regelbrennstoff.

Für die gewählte Gegenüberstellung in dem Beispiel (Bild 10) werden drei unterschiedliche Fälle betrachtet. Die zugehörigen Werte sind in der Tabelle in Bild 10 eingetragen. Zum bes-

seren Vergleich enthält das Schema die Werte für den Fall 1. Die drei Fälle können grob wie folgt charakterisieren werden:

- Fall 1: Energieaustauschverhältnis $EA = 1,08$ (gewählt ist hier eine Schmelzkammerfeuerung bei $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ Gastemperatur (Bilanztemperatur)), Vernachlässigung der elektrischen Zusatzenergie der Pyrolyse.
- Fall 2: Wie Fall 2, jedoch mit zusätzlicher elektrischer Zusatzenergie der Pyrolyse.
- Fall 3: Wie Fall 3, jedoch ohne Gewerbe-/Sperrmüll.

Das gebildete elektrische Nutzenergieverhältnis Z_e bezieht in dieser Gegenüberstellung die Nettostromerzeugung des Koppelprozesses, $e_{ko} = e_{KW,II} + e_{MVA,ko} - e_{MBA}$, auf die Nettostromerzeugung der Einzelprozesse $e_{ez} = e_{MVA,ez}$. Im Fall 1 einer Brennstoffsubstitution im Kraftwerksprozeß ohne zusätzlichen elektrischen Energieaufwand in der Pyrolyse erhält man eine ca. 13 % bessere Energienutzung ($Z_e = 1,13$) durch den Koppelprozeß gegenüber dem Einzelprozeß. Bei Einbeziehung eines zusätzlichen elektrischen Energiebedarfs für die Pyrolyse, sind der Koppel- und Einzelprozeß als energetisch gleichwertig anzusehen (Fall 2, $Z_e = 1,00$). Beim Wegfall der vergleichsweise heizwertreichen Gewerbe-/Sperrmüllabfälle (Fall 4) verbessert sich die Energienutzung des Koppelprozesse auf 18 %. Es sei im Zusammenhang mit dem Einsatz von Ersatzbrennstoffen aus Hausmüll in Kraftwerksprozessen jedoch deutlich unter anderen auf folgende Gesichtspunkte hingewiesen:

- Es liegen noch keine Langzeiterfahrungen zum Kossosionsverhalten vor [z.B. 35],
- ebenso liegen noch keine gesicherten Erkenntnisse zur Qualitätssicherung der Ersatzbrennstoffherstellung (gleichmäßig niedriges Schadstoffniveau, gleichmäßiger Heizwert usw.) vor,
- weiter müssen die Bedingungen zur Zerstörung der Schadstoffe und der Verbleib von Schadstoffen im Zusammenhang mit Stoffflußstudien (Schadstofffrachten allgemein und Schwermetallfrachten im besonderen) für die Ersatzbrennstoffherstellung und für den Einsatz der Ersatzbrennstoffe im Kraftwerk untersucht und den Bedingungen in der MVA gegenübergestellt werden.

Vor diesem Hintergrund sind weitere Ergebnisse aus Modellrechnungen (Parametervariation), experimentellen Untersuchungen an Pilotanlagen und Umsetzungen im industriellen Maßstab [z.B. 21] erforderlich, um die Machbarkeit dieses Koppelprozesses nachzuweisen.

4.3 Kopplung von mechanisch-biologischer Aufbereitung und Hochtemperaturprozessen zur Grundstoffherstellung

Das Bild 11 zeigt schematisch die Gegenüberstellung des Ersatzbrennstoffeinsatzes in einem Zementprozeß (Koppelprozeß) zur herkömmlichen Verfahrensweise, daß Zementklinkerbrennprozeß und Müllverbrennung unabhängig voneinander in getrennten Prozessen ablaufen (hier als Einzelprozesse bezeichnet). Eine ausführliche Darstellung befindet sich in [31]. Im folgenden werden beispielhaft vier verschiedene Fälle dargestellt, auf die einzeln weiter unten noch eingegangen wird. Der Koppelprozeß setzt sich dabei aus den Verfahrensbausteinen

- mechanisch-biologische Aufbereitung (MBA) von Restabfall aus Hausmüll mit Hilfe einer Kurzzeitrotte,

- Zementklinkerbrennprozeß (hier Primärbrennstoff Steinkohle),
- Kohlekraftwerk zum Umwandlung der eingesparten Primärenergie in elektrische Energie,
- thermische Behandlung der heizwertarmen Restabfallfraktion und des Gewerbe-/Sperrmülls in einem klassischen Müllkraftwerk.

Der Ersatzbrennstoff m_{EBS} ersetzt in diesem Beispiel einen Teil des Primärbrennstoffs Steinkohle $m_{SK,KW}$ in dem Klinkerbrennprozeß. Der durch die Brennstoffsubstitution in dem Klinkerbrennprozeß eingesparte Regelbrennstoff kann in einem Kraftwerk ($\eta_{n,KW} = 33\%$) zur elektrischen Energiebereitstellung eingesetzt werden. Diese gedankliche Verfahrenskette ist, wie erwähnt, zum Vergleich dem Klinkerbrennprozeß ohne Brennstoffsubstitution und der thermischen Behandlung des gesamten Abfalls ohne mechanisch-biologische Behandlung als Einzelprozesse für die herkömmliche Verfahrensweise gegenübergestellt. Als Basis für die Bewertung der stofflichen Seite wird die Herstellung von $m_{Kl} = 1000$ kg Klinker zugrunde gelegt. Die Basis der energetischen Seite stellt die elektrische Energie dar. Die Verstromung des Abfalls in den Müllverbrennungsanlagen erfolgt mit den Nettoprimärwirkungsgraden $\eta_{n,MVA,ez} = \eta_{n,MVA,ko} = 20\%$ [23, 32 bis 34].

Die vier Fälle unterscheiden sich in der Bilanzierung der Brennstoffsubstitution. Die zugehörigen Werte sind in der Tabelle in Bild 11 eingetragen. Zum besseren Vergleich enthält das Schema die Werte für den Fall 1. Die vier Fälle können grob wie folgt charakterisieren werden:

- Fall 1: keine Berücksichtigung des Energieaustauschverhältnisses und der Asche aus den Brennstoffen, ohne zusätzliche Verluste,
- Fall 2: wie Fall 1, jedoch mit Berücksichtigung des Energieaustauschverhältnisses,
- Fall 3: wie Fall 2, jedoch mit zusätzlichen Verlusten,
- Fall 4: zusätzlich zu Fall 3 mit Berücksichtigung der Asche.

Das gebildete elektrische Nutzenergieverhältnis Z_e bezieht in dieser Gegenüberstellung die Nettostromerzeugung des Koppelprozesses, $e_{ko} = e_{KW} + e_{MVA,ko} - e_{MBA}$, auf die Nettostromerzeugung der Einzelprozesse (hier nur MVA) $e_{MVA,ez}$. Im Fall 1 einer Brennstoffsubstitution im Klinkerbrennprozeß ohne Verluste erhält man eine ca. 15% bessere Energienutzung ($Z_e = 1,15$) durch den Koppelprozeß gegenüber dem Einzelprozeß (herkömmliche Müllverbrennung). Bezieht man ein Energieaustauschverhältnis von $EA = 1,012$ ein, so ergibt sich nur noch eine 8% bessere Nutzung (Fall 2) durch den Koppelprozeß. Bei Einbeziehung zusätzlicher Energieverluste von 2% sind der Koppel- und der Einzelprozeß als energetisch gleichwertig anzusehen (Fall 3, $Z_e = 1,0$). In dem Fall 4 sei die Eignung der Brennstoffasche für den Prozeß vorausgesetzt. Durch die nun berücksichtigte stoffliche Nutzung der Asche des Ersatzbrennstoffes wird entsprechend weniger Energie benötigt, was wiederum zu einer Zunahme des Nutzenergieverhältnisses um 8% führt.

5 Zusammenfassung

Die hier betrachteten Beispiele einer Brennstoffsubstitution im Kraftwerksprozeß (Bild 10) und im Klinkerbrennprozeß (Bild 11) geben eine punktuelle Bewertung für die jeweils ge-

wählten Randbedingungen wieder. Mit Hilfe der oben bereits erwähnten Bilanzierung der Vergleichs- und Basissituation und den mathematischen Modellen für die Grundbausteine, lassen sich jedoch entsprechende Parametervariationen durchführen. In Bild 12 ist das elektrische Nutzenergieverhältnis Z_e für einen Stoffbehandlungsprozeß mit ausgewählten Randbedingungen in Abhängigkeit des Abfallheizwertes vor der Behandlung [25] dargestellt. Das Bild zeigt beispielhaft, daß das Verhältnis aus der Energie des Koppelprozesses und der Einzelprozesse Werte größer und kleiner eins annehmen kann, d.h., daß durch die Brennstoffsubstitution sowohl Ressourcen geschont ($Z_e > 1$) als auch zusätzlich verbraucht ($Z_e < 1$) werden können.

Für die Bewertung der Verfahrensketten sind neben der energetischen Bilanzierung entsprechende kumulierte Schadstoffbetrachtungen usw. durchzuführen. Dabei müssen insbesondere die Bedingungen für den Abbau von Schadstoffen (z.B. organische Spurenschadstoffe) und der Verbleib von Schadstoffe (z.B. Schwermetalle) beachtet werden. Es ist deshalb sehr sorgfältig anhand der jeweiligen Randbedingungen zu prüfen, in welchem Umfang durch eine Substitution von Regelbrennstoffen durch Restabfall Umweltentlastungen eintreten.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Mechanisch-biologische Behandlung von Abfällen- Erfahrungen, Erfolge, Perspektiven. Zentrum für Abfallwirtschaft, Heft 10, Braunschweig, 1995. ISSN 0934-9243.
- [2] Turk, M.; Collins, H.-J.: Stoffspezifische Abfallbehandlung. Der Städtetag 10(1996), S. 710-714.
- [3] Doedens, H.; Cuhls, C.: MBA vor Deponie- neue Erkenntnisse aus laufenden Forschungsvorhaben. In: „Planung von mechanisch-biologischen Behandlungsanlagen“. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1997.
- [4] Wiemer, K.; Kern, M. (Hrsg.): Biologische Abfallbehandlung III - Kompostierung-Anaerobtechnik-Mechanisch-Biologische-Abfallbehandlung-Klärschlammverwertung. M.I.C. Baeza-Verlag, Witzenhhausen, 1996. ISBN 3-928673-18-1.
- [5] Lahl, U.: Status quo und Mindeststandards für Verfahren zur mechanisch-biologischen Restabfallbehandlung. Fachtagung Umweltinstitut Offenbach GmbH: Biologische Restabfallbehandlung, 19./20. Juni 1997, Offenbach.
- [6] Spillmann, P.: Stoffgerechte Behandlung undefinierter Restabfälle durch Kombination biochemischer und thermischer Behandlungsverfahren („Bio-Select-Verfahren“). Müll und Abfall 7(1995), S. 416 bis 431.
- [7] Christmann, A.; Quitteck, G.: Die DBA-Gleichstromfeuerung mit Walzenrost. VDI-Berichte 1192, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1995.
- [8] Horn, J.; Martin, J.; Busch, M.; Schaffer, R.: Umweltentlastung durch synthetische Verbrennung in Hausmüllverbrennungsanlagen mit dem Rückschubrost. In: Thomé-Kozmiensky, K.J. (Hrsg.): Reaktoren zur thermischen Abfallbehandlung, EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH, Berlin, 1993.
- [9] Lautenschlager, G.: Moderne Rostfeuerung für die thermische Abfallbehandlung. GVC-Symposium Abfallwirtschaft- Herausforderung und Chance, Würzburg, 17.-19. Oktober 1994.
- [10] Lorson, H.; Schingnitz, M.: Konversionsverfahren zur thermischen Verwertung von Rest- und Abfallstoffen. Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK) 46 (1994) Nr. 5.
- [11] Anton, F.: Das Siemens-KWU-Schwelbrennverfahren- Stoffliche und energetische Verwendung von Restmüll; VDI-Bericht Nr. 1192, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1995, S. 349-379.
- [12] Redepenning, K.-H.: Thermische Abfallbehandlung mit Kombinationsverfahren- Aufbereitung, Verbrennung, Entgasung, Vergasung. GVC-Symposium Abfallwirtschaft- Herausforderung und Chance, 17.-19. Oktober 1994, Würzburg.
- [13] Stahlberg, R.; Feuerrigel, U.: Thermoselect - Energie und Rohstoffgewinnung. In: Abfallwirtschaft Stoffkreisläufe, Terra Tec '95, B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1995.

- [14] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Waste incineration systems; current technology and future developments in Germany. 3rd European Conference on Industrial Furnaces and Boilers (INFUB), Lisbon, Portugal, 18.-21. 04. 1995.
- [15] Weiss, W.; Janz, J.: Kunststoffverwertung im Hochofen-Ein Beitrag zum ökologischen und ökonomischen Recycling von Altkunststoffen. VDI-Berichte 1288, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 1996, S. 123-138. ISBN 3-18-091288-X.
- [16] Lütge, C.; Radtke, K.; Schneider, A.; Wischniewski, R.; Schiffer, H.-P.; Mark, P.: Neue Vergasungsverfahren zur stofflichen und energetischen Verwertung von Abfällen. In: Born, M.; Berghoff, R. (Hrsg.): Vergasungsverfahren für die Entsorgung von Abfällen. Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998, S. 191-212. ISBN3-18-990035-3.
- [17] Albrecht, J.; Gafron, B.; Scur, P.; Wirthwein, R.: Vergasung von Sekundärbrennstoffen in der zirkulierenden Wirbelschicht zur energetischen Nutzung für die Zementherstellung. DGMK Tagungsbericht 9802, Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V., Hamburg, 1998, S.115-130. ISBN 3-931850-40-4.
- [18] Sprung, S.: Umweltentlastung durch Verwertung von Sekundärrohstoffen. Zement-Kalk-Gips ZKG International 45(1992)5, S. 213-221.
- [19] Junge, K.: Möglichkeiten und Grenzen der Verwertung in der Ziegelindustrie- Produktverbesserung- Anforderungen an Ersatzbrennstoffe. 2. Seminar UTECH Berlin '98, Umwelttechnologieforum, Berlin, 1998, S. 149-158.
- [20] Schmidt, R.: Stand der Mitverbrennung von Abfallstoffen in Feuerungsanlagen. VDI-Berichte 1387, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 1998, S. 249-260. ISBN 3-18-091387-8.
- [21] Schulz, W.; Hauk, R.: Kombination einer Pyrolyseanlage mit einer Steinkohlekraftwerksfeuerung; In: Stoffliche und thermische Verwertung von Abfällen in industriellen Hochtemperaturprozessen, 11. DVV-Kolloquium, Braunschweig, 1998, S.237-246, ISBN 3-00-003384-X.
- [22] Scur, P.: Roh- und Brennstoffsubstitution mit einer zirkulierenden Wirbelschicht im Zementwerk Rüdersdorf; In: Stoffliche und thermische Verwertung von Abfällen in industriellen Hochtemperaturprozessen, 11. DVV-Kolloquium, Braunschweig, 1998, S.237-246, ISBN 3-00-003384-X.
- [23] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.; Brinker, W.: Thermische Rückstandsbehandlungsverfahren – Aufteilung in Bausteine und Möglichkeiten der Bilanzierung-Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK) 46 (1994) Nr. 11/12, S. 469-482.
- [24] Schulenburg, F.; Scholz, R.: Bilanzierung und Bewertung thermischer Abfallbehandlungsverfahren; Einfluß unterschiedlicher Abfallvorbehandlungsverfahren. VDI-Berichte 1387, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf 1998, S. 17-47. ISBN 3-18-091387-8.
- [25] Schulenburg, F.; Scholz, R.: Energetische Bilanzierung von Verfahrenslinien aus mechanisch-biologischer und nachgeschalteter thermischer Abfallbehandlung; In: Stoffstromspezifische Abfallbehandlung im Hinblick auf thermische Verfahren, 13. ZAF-Seminar, Braunschweig, 1998, S. 15-52.
- [26] Bilitewski, B.; Kümmlee, G.; Lorber, K. E.: Bilanz eines Aufbereitungsprozesses; Müll und Abfall (1985) Nr. 11, S. 369-376.
- [27] Wiemer, K.; Kern, M.: Vorbehandlung zur Stabilisierung von Restabfällen zur direkten oder zeitversetzten thermischen Verwertung; UTECH Berlin 96: Zukunft der thermischen Behandlung von Rest-Abfällen, Berlin, 26. Februar 1996, Tagungsband S. 113-136.
- [28] Spillmann, P.; Collins, H.-J.: Das Kaminzug-Verfahren; Forum Städte-Hygiene 32 (1981) Jan./Feb., S. 15-24.
- [29] Beckmann, M.; Scholz, R.: Energetische Bewertung der Substitution von Brennstoffen durch Ersatzbrennstoffe aus Abfälle bei Hochtemperaturprozessen zur Stoffbehandlung (Veröffentlichung ZKG Zement-Kalk-Gips, Manuskript im Druck, vorr. (1999) Heft 6.
- [30] Scholz, R.; Beckmann, M.: Substitution von Brennstoffen und Rohstoffen durch Abfälle in Hochtemperaturprozessen; In: Stoffliche und thermische Verwertung von Abfällen in industriellen Hochtemperaturprozessen, 11. DVV-Kolloquium, Braunschweig, 1998, S.21-46, ISBN 3-00-003384-X.
- [31] BMBF-Abschlußbericht Förderzeichen 1471114: Möglichkeiten der Kombination von mechanisch-biologischer und thermischer Behandlung von Restabfällen, im Druck.
- [32] Schulenburg, F.: Energetische Bewertung thermischer Abfallbehandlungsanlagen unter Berücksichtigung verschiedener Prozeßführungen; Dissertation, TU Clausthal, (im Druck) 1999.

- [33] Scholz, R.; Schulenburg, F.; Beckmann, M.: Kriterien zur Beurteilung thermischer Behandlungsverfahren für Rückstände, VDI-Bericht Nr. 1033, Technik der Restmüllbehandlung - Kalte und/oder thermische Verfahren, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1993, S. 111-161.
- [34] Scholz, R., Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Entwicklungsmöglichkeiten der Prozeßführung bei Rostsystemen zur thermischen Abfallbehandlung; FDBR-Symposium, 3. Februar 1996, Rostock. In Vortragsband: „Fakten! Die thermische Abfallverwertung der Zukunft“, S. 111-198.
- [35] Schirmer, U.: Stoffliche und thermische Verwertung von Abfällen durch Mitverbrennung in Kraftwerken; In: Stoffliche und thermische Verwertung von Abfällen in industriellen Hochtemperaturprozessen, 11. DVV-Kolloquium, Braunschweig, 1998, S.201-236, ISBN 3-00-003384-X.

7 Symbolverzeichnis

Lateinische Großbuchstaben:

| | |
|----|----------------------------|
| AF | Abfall |
| E | Energie |
| EA | Energieaustauschverhältnis |
| H | Enthalpie |
| Z | Nutzenergieverhältnis |

griechische Buchstaben:

| | |
|-----------|-------------------|
| η | Wirkungsgrad |
| λ | Stöchiometriezahl |

Lateinische Kleinbuchstaben:

| | |
|---|----------------------------|
| f | Energieverteilungsfaktoren |
| h | spezifische Enthalpie |
| l | Luftbedarf |
| m | Masse |

| | |
|----------|--------------|
| θ | Temperatur |
| ξ | Massenanteil |

Indizes:

Lateinische Buchstaben:

| | |
|------|------------------|
| A | Asche |
| a | Anlagen |
| ad | adiabat |
| AF | Abfall |
| AG | Abgas |
| An | Anfang |
| B | Brennstoff |
| Bas | Basissituation |
| Bz | Bilanz |
| D | Deponie |
| e | elektrisch |
| ez | Einzelprozeß |
| EBS | Ersatzbrennstoff |
| G | Gas |
| ges | gesamt |
| Gut | Gut |
| GV | Gesamtverfahren |
| H | hoch |
| HA | heizwertarm |
| Heiz | Heiz |
| HR | heizwertreich |
| Kl | Klinker |

| | |
|-------|-------------------------------------|
| ko | Koppelprozeß |
| KW | Kraftwerk |
| L | Luft |
| Mi | Mischung |
| min | mindest |
| MBA | mechanisch-biologische Aufbereitung |
| MKW | Müllkraftwerk |
| N | niedrig |
| n | nettoprimär |
| Netto | Netto |
| Nutz | Nutz |
| p | primär |
| Py | Pyrolyse |
| RBS | Regelbrennstoff |
| Rest | Rest |
| RM | Restmüll |
| SK | Steinkohle |
| u | unterer |
| UP | Umwandlungsprozeß |
| UP | Umwandlungsprozeß |
| Verl | Verlust |
| Vgl | Vergleichssituation |
| zus | zusätzlich |

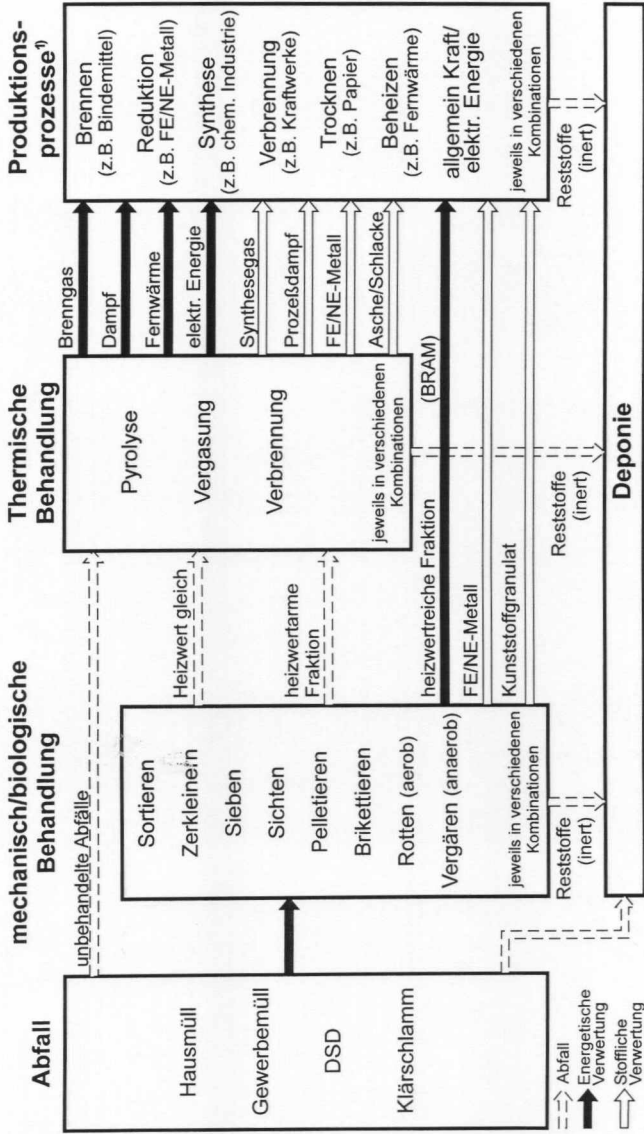
hochgestellte Indizes:

- Strom

Zahlen (Indizes):

- I,II Laufvariable

8 Bilder



1) Produktionsintegrierte Kreislaufwirtschaft ist nicht betrachtet (Gichtgas, Krätze, Produktionsschrott, PMMA, Koks)

Bild 1. Grundoperationen der Abfallbehandlung (Beispiele).

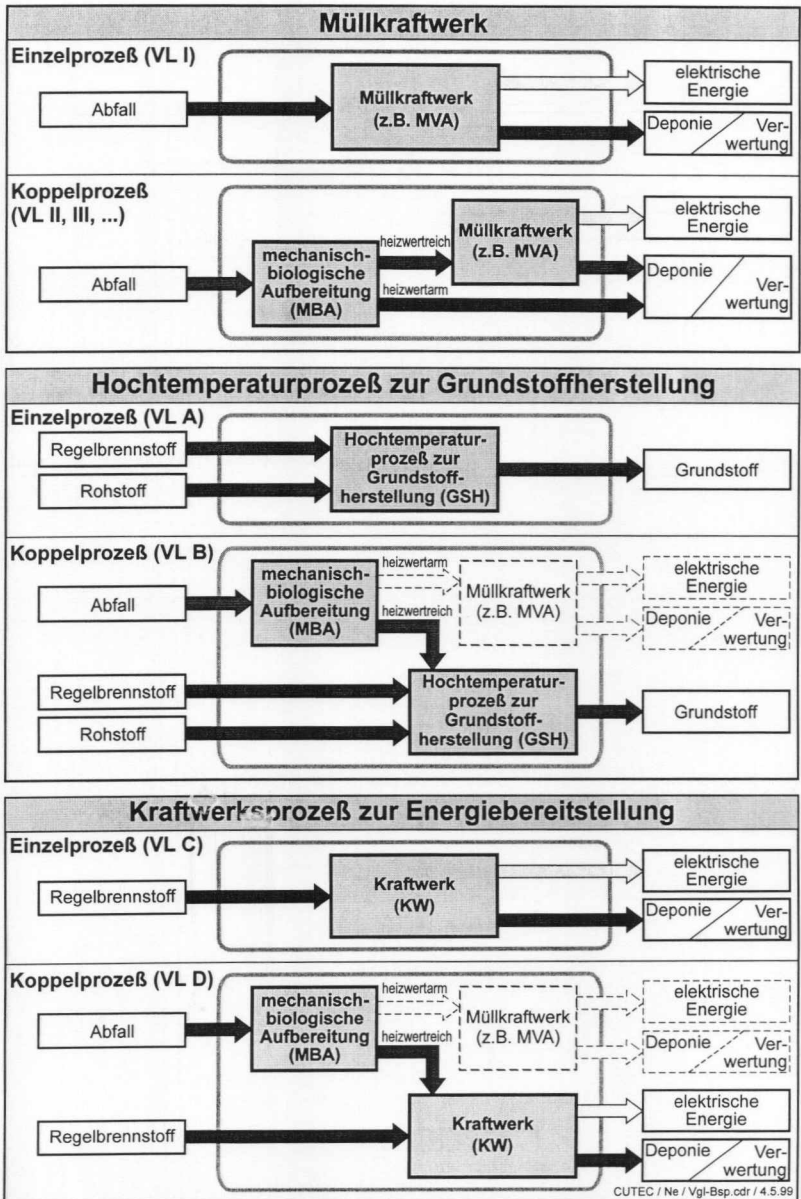


Bild 2. Möglichkeiten der thermischen Abfallbehandlung.

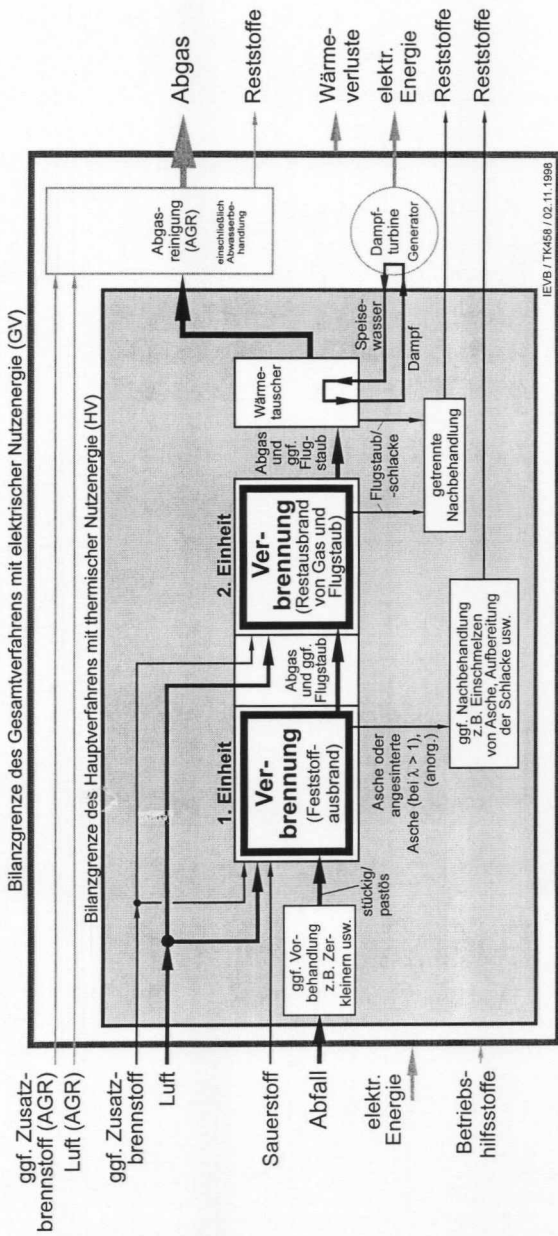


Bild 3. Blocktießbild für ein Verbrennungs-Verbrennungs-Verfahren [23];
 Beispiel: Weiterentwickelte klassische Hausmüllverbrennung mit Sauerstoffanreicherung der Verbrennungsluft.

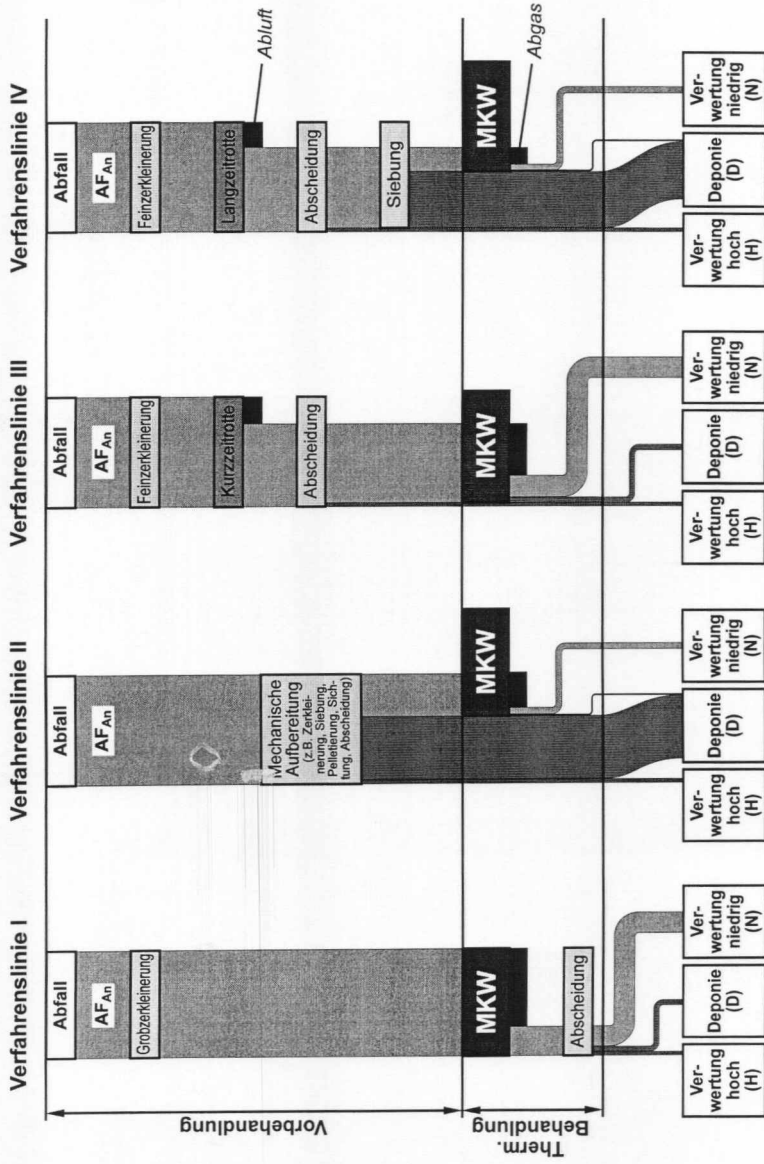
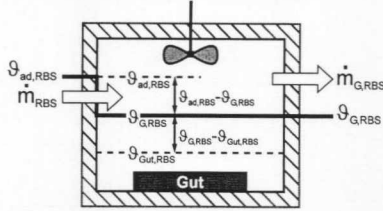


Bild 4. Feststoffmasse längs des Behandlungsweges unterschiedlicher Verfahrenslinien [24,25].

Fall I: Regelbrennstoff \dot{m}_{RBS}



Fall II: Ersatzbrennstoff \dot{m}_{EBS}

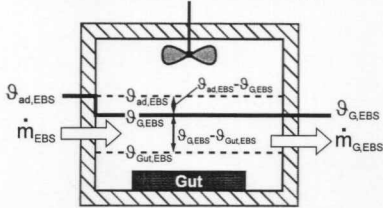


Bild 5. Wärmeübertragung in Industrieöfen; Modellvorstellung ideal durchmischter Rührkessel Elemente, einstufig [29,30].

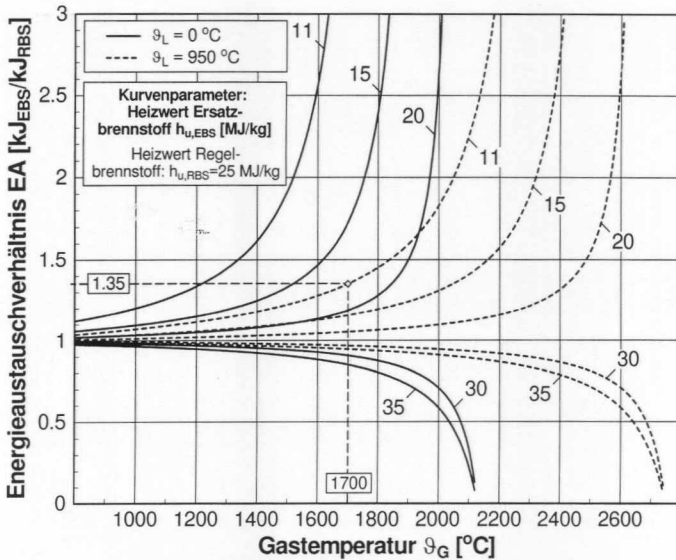


Bild 6. Energieaustauschverhältnis EA in Abhängigkeit von der Gastemperatur im Prozeß ϑ_G (Bilanztemperatur ϑ_{BZ}) für verschiedene Substitutionsfälle [29].

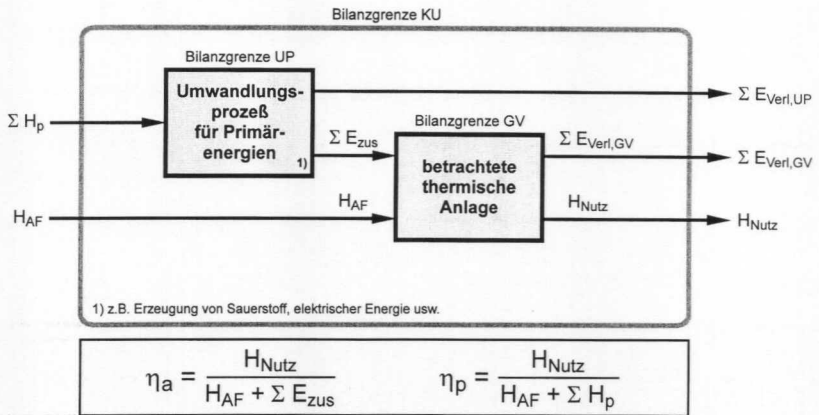


Bild 7a. Vereinfachte Energiebilanz zur Bildung des Anlagenwirkungsgrades η_a und des Primärwirkungsgrades η_p (Erklärung im Text).

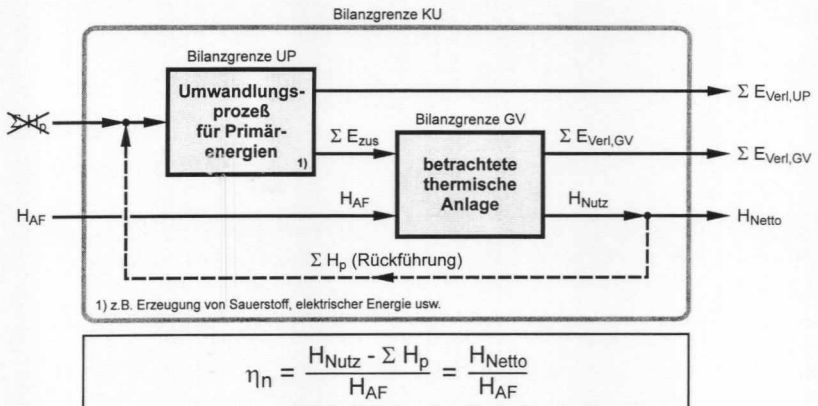


Bild 7b. Vereinfachte Energiebilanz zur Bildung des Nettoprimärwirkungsgrades η_n (Erklärung im Text).

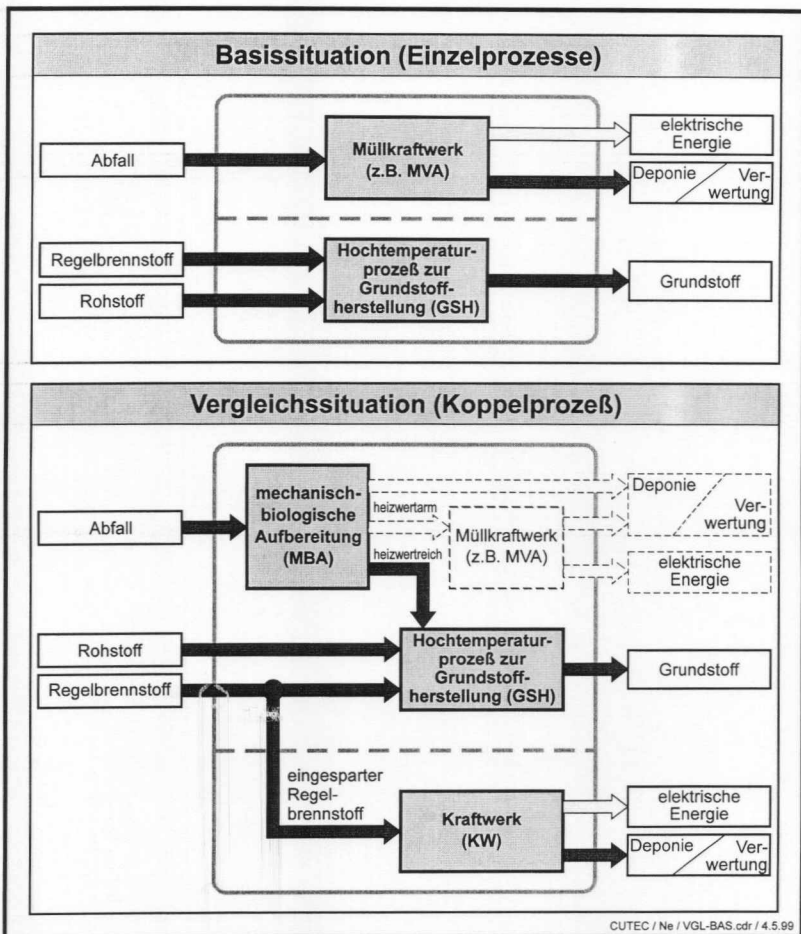


Bild 8. Energetischer Vergleich des Abfalleinsatzes im Müllkraftwerk (Basissituation) oder als heizwertreiche Restabfallfraktion in einem Hochtemperaturprozeß zur Grundstoffherstellung (Vergleichssituation) [30;32].

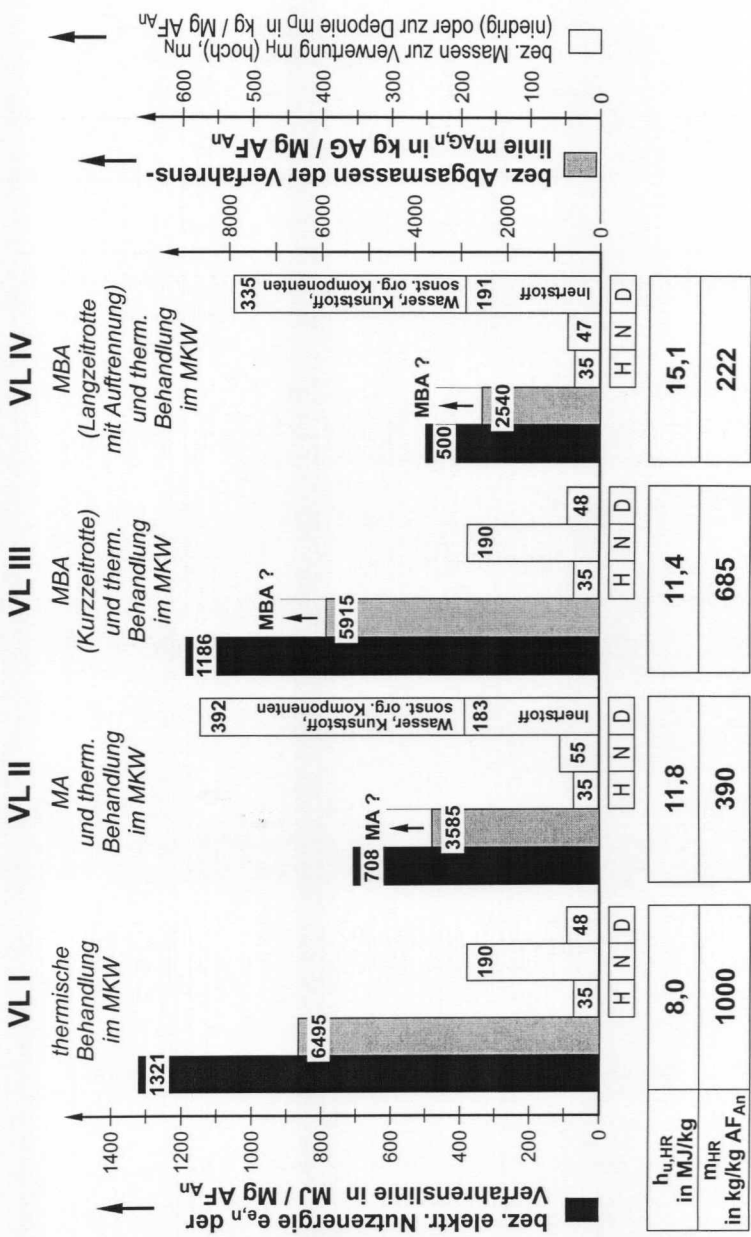
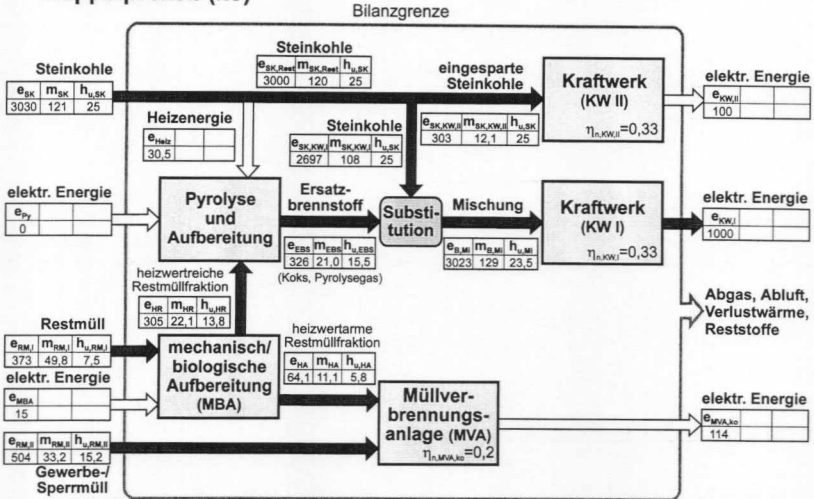
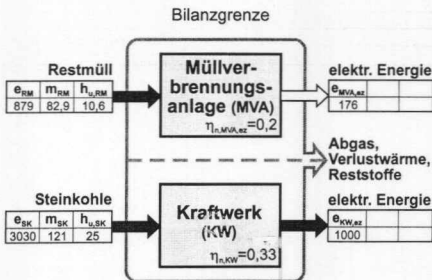


Bild 9. Vergleich unterschiedlicher Verfahrenslinien [25].

Koppelprozeß (ko)



Einzelprozesse (ez)

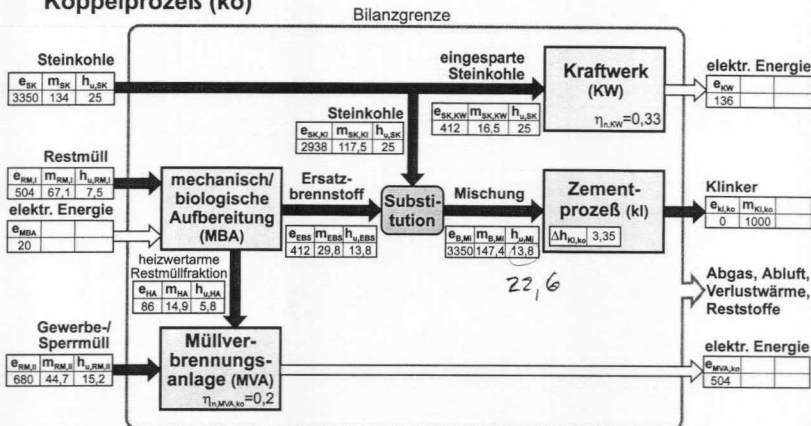


| Bezeichnung | Fall 1 | Fall 2 | Fall 3 |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|
| Energien [MJ] und Bilanzierung | | | |
| Φ_{MBA} | 15 | 15 | 15 |
| Φ_{Py} | 0 | 22,1 | 22,1 |
| Φ_{Heiz} | 30,5 | 30,5 | 30,5 |
| $\Phi_{\text{KW,I}}$ | 1000 | 1000 | 1000 |
| $\Phi_{\text{KW,II}}$ | 100 | 100 | 100 |
| $\Phi_{\text{KW,ez}}$ | 1000 | 1000 | 1000 |
| $\Phi_{\text{MVA,ko}}$ | 114 | 114 | 6,4 |
| $\Phi_{\text{MVA,ez}}$ | 176 | 176 | 59,8 |
| Φ_{el} | 199 | 177 | 69 |
| Φ_{el} | 176 | 176 | 60 |
| Z_{el} | 1,13 | 1,00 | 1,16 |

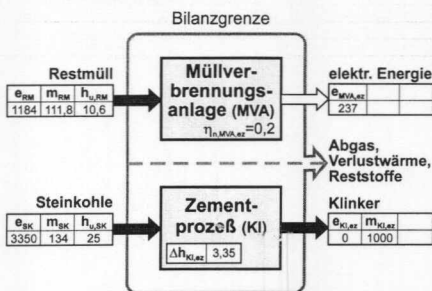
| Bezeichnung | Fall 1 | Fall 2 | Fall 3 |
|---|--------|--------|--------|
| Parametervariationen | | | |
| Φ_{Py} | 0 | 22,1 | 22,1 |
| m_{GWB} | 33,2 | 33,2 | 0 |
| Massen [kg] im Koppelprozeß | | | |
| $m_{\text{SK,Reiz}}$ | 120 | 120 | 120 |
| $m_{\text{SK,KW,I}}$ | 108 | 108 | 108 |
| $m_{\text{SK,KW,II}}$ | 12,1 | | |
| $m_{\text{RM,I}}$ | 49,8 | 49,8 | 49,8 |
| $m_{\text{RM,II}}$ | 22,1 | 22,1 | 22,1 |
| $m_{\text{RM,EA}}$ | 11,1 | 11,1 | 11,1 |
| m_{EB} | 21,0 | 21,0 | 21,0 |
| m_{SB} | 129 | 129 | 129 |
| Massen [kg] im Koppel- und Einzelprozeß | | | |
| m_{SK} | 121 | | |
| m_{RM} | 82,9 | 82,9 | 49,8 |
| Heizwerte [MJ/kg] und Energieaustauschverhältnis im Koppelprozeß | | | |
| $h_{\text{RM,I}}$ | 7,5 | | |
| $h_{\text{RM,II}}$ | 15,2 | | |
| $h_{\text{RM,EA}}$ | 13,8 | | |
| $h_{\text{RM,EA}}$ | 5,8 | | |
| h_{EB} | 15,5 | 15,5 | 15,5 |
| h_{SB} | 23,5 | 23,5 | 23,5 |
| EA | 1,08 | 1,08 | 1,08 |
| Heizwerte [MJ/kg] im Koppel- und Einzelprozeß | | | |
| h_{SK} | 25 | | |
| h_{RM} | 10,6 | | |
| Nettoprimärwirkungsgrade | | | |
| η_{MVA} | 0,33 | | |
| $\eta_{\text{KW,I}}$ | 0,33 | | |
| $\eta_{\text{MVA,ko}}$ | 0,20 | 0,20 | 0,10 |
| $\eta_{\text{MVA,ez}}$ | 0,20 | 0,20 | 0,16 |

Bild 10. Vereinfachte Darstellung eines Verfahrensvergleichs: Kopplung von mechanisch-biologischer Aufbereitung, Pyrolyse und Kohlekraftwerk (Bild enthält nur die hier wesentlichen Stoff- und Energiepfade; Zahlenwerte sind Auszug einer detaillierten Massen- und Energiebilanz).

Koppelprozeß (ko)



Einzelprozesse (ez)



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

| Bezeichnung | Fall 1 | Fall 2 | Fall 3 | Fall 4 |
|---|--------|--------|--------|--------|
| Parametervariationen | | | | |
| EA Energieaustauschverhältnis | 1 | 1,012 | 1,012 | 1,012 |
| [%] Zusatzenergie (Bypass usw.) | 0 | 0 | 2 | 2 |
| [%] Zusatzenergie (gesamt) | 0 | 1,3 | 3,35 | 1,25 |
| λ_{EBB} Berücksichtigung Aschegehalt | nein | nein | nein | ja |
| Massen [kg] im Koppelprozeß | | | | |
| $m_{SK,KI}$ Steinkohle Zementprozeß | 117,5 | 117,6 | 119,9 | 117,7 |
| $m_{SK,KW}$ Steinkohle Kraftwerk | 16,5 | 16,4 | 14,1 | 16,3 |
| $m_{RM,MBA}$ Restmüll MBA | 67,1 | 73,1 | 74,6 | 73,1 |
| m_{GSM} Gewerbe-/Sperrmüll | 44,7 | 48,7 | 49,7 | 48,8 |
| m_{HA} Heizwertarme Restmüllfraktion | 14,9 | 16,2 | 16,6 | 16,2 |
| m_{EBB} Ersatzbrennstoff | 29,9 | 32,6 | 33,3 | 32,6 |
| $m_{B,EBB}$ Substitutionsbrennstoff | 147,4 | 150,2 | 153,2 | 150,3 |
| Massen [kg] im Koppel- und Einzelprozeß | | | | |
| m_{SK} Steinkohle gesamt | 134 | | | |
| m_{RM} Restmüll gesamt ($m_{RM,MBA} + m_{GSM}$) | 111,8 | 121,8 | 124,3 | 121,9 |
| m_{KL} Klinker | 1000 | | | |
| Heizwerte und spez. Energieaufwand [MJ/kg] im Koppelprozeß | | | | |
| $h_{u,RM,MBA}$ Restmüll MBA | 7,5 | | | |
| $h_{u,RM,G}$ Gewerbe-/Sperrmüll | 15,2 | | | |
| $h_{u,HA}$ Heizwertarme Restmüllfraktion | 5,8 | | | |
| $h_{u,EBB}$ Ersatzbrennstoff | 13,8 | | | |
| $h_{u,M}$ Substitutionsbrennstoff | 22,6 | 22,6 | 22,6 | 22,6 |
| $\Delta h_{KL,KI}$ Spez. Energieaufwand Klinker | 3,35 | 3,390 | 3,458 | 3,392 |
| Spezifischer Energieaufwand [MJ/kg] im Einzelprozeß | | | | |
| $\Delta h_{KL,ez}$ Spez. Energieaufwand Klinker | 3,35 | | | |
| Heizwerte [MJ/kg] im Koppel- und Einzelprozeß | | | | |
| $h_{u,SK}$ Steinkohle | 25 | | | |
| $h_{u,RM}$ Restmüll gesamt | 10,6 | | | |

Bild 11. Vereinfachte Darstellung eines Verfahrensvergleichs: Kopplung von mechanisch-biologischer Aufbereitung und Zementklinkerbrennprozeß. (Bild enthält nur die hier wesentlichen Stoff- und Energiepfade; Zahlenwerte sind Auszug einer detaillierten Massen- und Energiebilanz) [29].

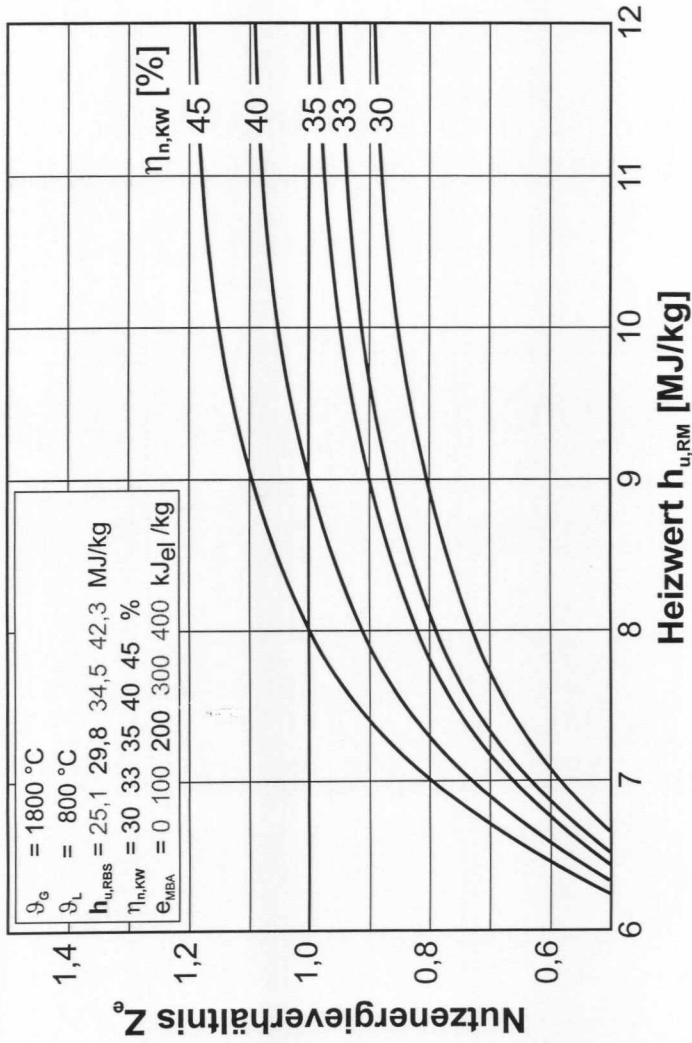


Bild 12. Elektrisches Nutzenergieverhältnis Z_e in Abhängigkeit vom Abfallheizwert für verschiedene Kraftwerkswirkungsgrade $\eta_{n,KW}$ [25].