

Abfallwirtschaftliche Maßnahmen und Klimaschutz

Scholz, Reinhard; Beckmann, Michael; Schulenburg, Frank

1 Einleitung

Unter dem Begriff Klimaschutz versteht man im wesentlichen die Senkung der Mengen der sog. Treibhausgase. Von diesen steht dabei aufgrund seines ganz überwiegenden Anteils das Kohlendioxid (CO₂) im Vordergrund der Diskussion. Es stammt mit wenigen Ausnahmen aus der Energieumsetzung.

Bild 1a zeigt die Zusammenstellung der Energiequellen (Bereitstellung) in Deutschland und **Bild 1b** Anhaltswerte für verschiedene Brennstoffe und einen Abfall aus dem kommunalen Bereich. Ungefähr 85 % der Quellen sind fossilen und nur 3 % regenerativen Ursprungs. Somit ist einerseits durch Substitution von fossiler durch regenerative Energie, d. h., durch Vergrößern des Balkens a in Bild 1a die Reduzierung des Balkens b voranzutreiben, andererseits erscheint die Reduzierung des Balkens b in Bild 1a durch Einsparmaßnahmen jedoch genauso wichtig, da deren Potential in Summe höher eingeschätzt wird, als das derzeitige regenerative Potential. Im folgenden wird im Zusammenhang mit der Abfallwirtschaft auf Energie- und dementsprechende CO₂-Einsparmaßnahmen eingegangen.

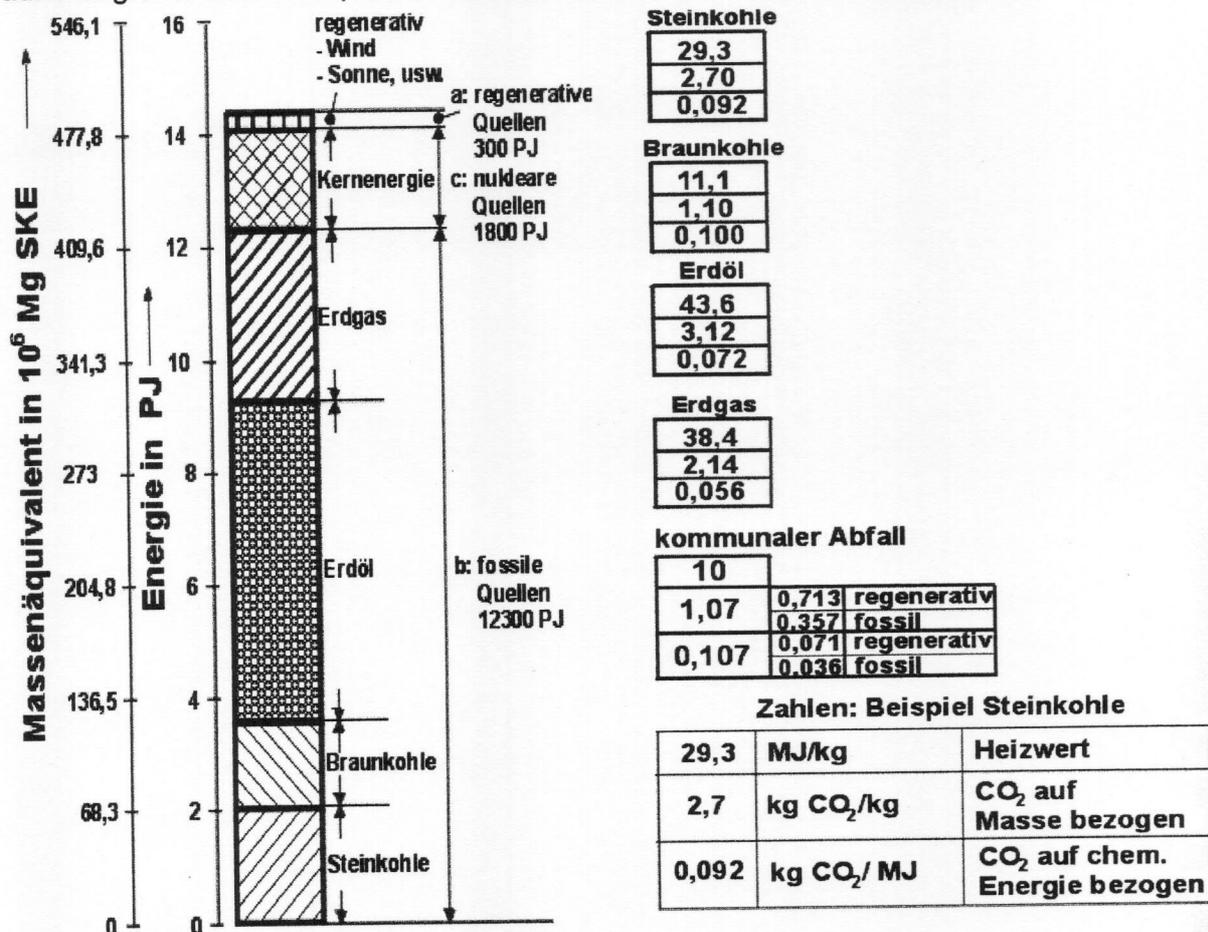


Bild 1a: Zusammenstellung der Energiequellen in Deutschland für 1998 [1].

Bild 1b: Anhaltswerte für verschiedene Brennstoffe bei vollständiger Oxidation.

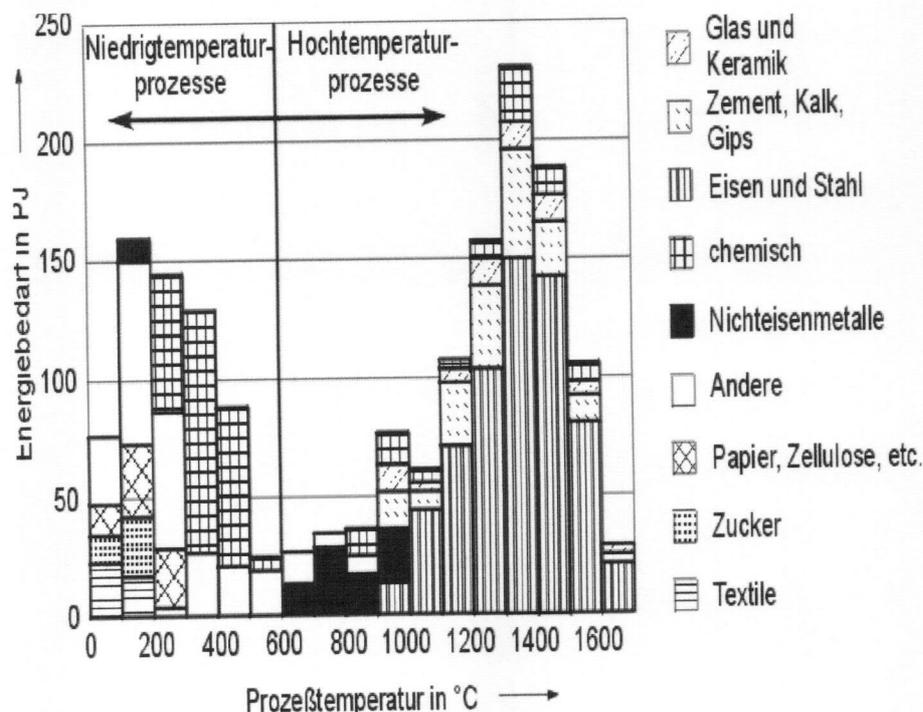
Da Energiequellen und Energieumwandlung in den verschiedenen Bereichen - sieht man von vergleichsweise kleinen Speichern als Puffer ab - sich im Gleichgewicht gegenüber stehen, kann man den Balken b des Bildes 1a grob in die vier Bereiche „Kraftwerke“, „Transport und Verkehr“, „Heizsysteme“ und „Stoffbehandlung“ (**Bild 2**) unterteilen. In der Regel ist die Umwandlung der fossilen Energie durch Verbrennung der erste technische Schritt mit der entsprechenden Freisetzung von CO₂. Zur Verringerung der CO₂-Emissionen findet man in der Öffentlichkeit häufig Diskussionen bei Kraftwerken zu verbesserten Kreisprozessen, zu Erdgaseinsatz usw., bei Transport und Verkehr zu Brennstoffzellen, zu „Drei-Liter-Auto“ usw., bei Heizsystemen zu verbesserter Isolierung, zu „Null-Energie-Haus“ usw.. Der Bereich „Stoffbehandlung“ (Produktion) findet dagegen vergleichsweise wenig Aufmerksamkeit. Da-

- **Kraftwerke**
- **Transport und Verkehr**
- **Heizsysteme**
- **Stoffbehandlung**

Bild 2: Aufteilung der Umwandlung fossiler Energie in verschiedene Bereiche.

bei liegen auch hier große Einsparpotentiale für CO₂-Emissionen.

Bild 3 zeigt, was in dem vorliegenden Zusammenhang unter „Stoffbehandlung“ verstanden wird. Im weitesten Sinne sind dies sogenannte Industrieofenprozesse, in denen also Material (Gut) behandelt oder hergestellt wird. Der Energieaufwand aufgetragen über der Prozeßtemperatur zeigt deutlich, wo die verschiedenen Industriebereiche wie Stahl, Glas, Papier, Zucker usw. anzusiedeln sind. Die thermische Abfallbehandlung etwa von Restmüll aus dem kommunalen Bereich, z.B. in Müllverbrennungsanlagen (MVA) mit Prozeßtemperaturen zwischen 800 °C und 1200 °C, gehört zu den Hochtemperaturprozessen.



Da jeder produzierte Grundstoff und Gegenstand nach Ende der bestimmungsgemäßen Verwendung zum Abfall wird, sei es Abfall zur Verwertung (Recycling usw.) oder sei es Abfall zur Beseitigung, ist gerade auch in der Abfallwirtschaft eine Verfahrenstechnik mit Blick auf Energie- und CO₂-mindernde Maßnahmen gefragt.

Bild 3: Energiebedarf der industriellen Stoffbehandlung [2].

Neben den klassischen Maßnahmen

- Verminderung des Abgasverlustes
- Wärmerückgewinnung (Luft-/Gasvorwärmung und -kühlung, Gutvorwärmung und -kühlung, usw.)
- Sauerstoffanreicherung, usw.

sind derzeit auch Maßnahmen wie

- Brennstoffsubstitution (Ersatzbrennstoff, Sekundärbrennstoff)
- Prozeßkopplung (vernetzte Prozesse)
- Prozesse mit verringerter Anzahl von Prozeßschritten

in der Diskussion. Auf die vorgenannten Gesichtspunkte kann im folgenden nicht der Reihe nach, sondern nur exemplarisch anhand einiger typischer Beispiele aus industrieller und kommunaler Abfallwirtschaft eingegangen werden.

2 Einzelprozesse

Unter Einzelprozessen werden hier Verfahrenslinien verstanden, in denen die Erzeugung (Produktion) bzw. Verwertung oder die Beseitigung eines bestimmten Stoffes bzw. eines bestimmten Stoffgemisches beabsichtigt wird.

2.1 Beispiel: Stahlschrott

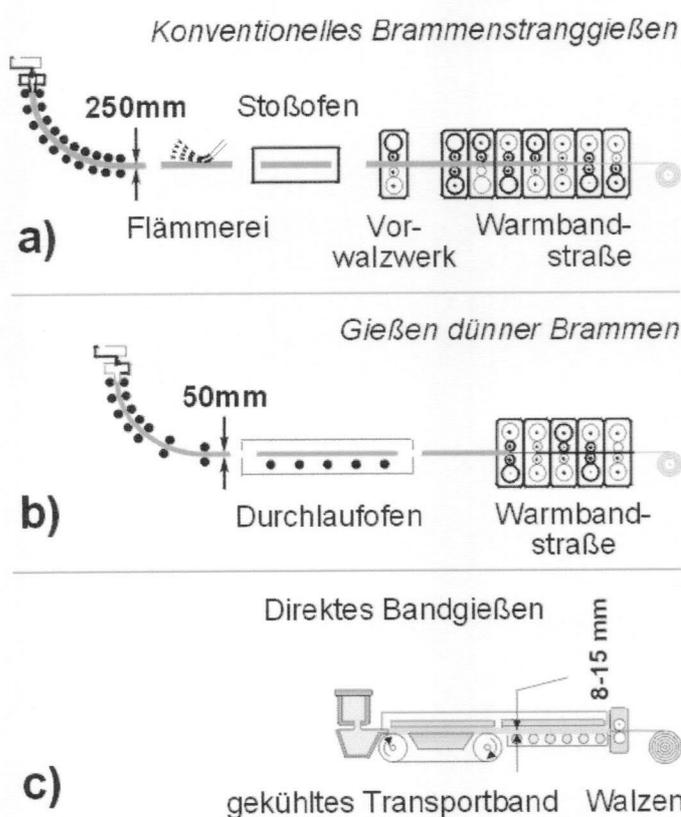


Bild 4: Einsparung von Produktionsstufen am Beispiel verschiedener Gießverfahren für Stahl.

Das Recycling von Schrott ist schon sehr lange ein wichtiger Bestandteil der Abfallwirtschaft. Typischer Schrott (z. B. von Automobilen) wird heute zu einem großen Teil in sogenannten Elektrolichtbogenöfen erwärmt und erschmolzen. Wenn man die heißen Abgase zur Schrottvorwärmung (Gutvorwärmung) benutzt, kann man im Schmelzgefäß selbst elektrische Energie im Verhältnis 1:1 durch thermische (zurückgewonnene) Energie substituieren. Dies bedeutet entsprechend dem Wirkungsgrad η des Kraftwerks, in dem die elektrische Energie erzeugt wird, dort zunächst einen absoluten Mindereinsatz an fossiler Primärenergie um das $[1/\eta]$ -fache, d. h., selbst bei sehr optimistischer Annahme ($\eta = 50\%$) somit um das 2-fache der im Ofen substituierten Energie. Auch bei Berücksichtigung einer ggf.

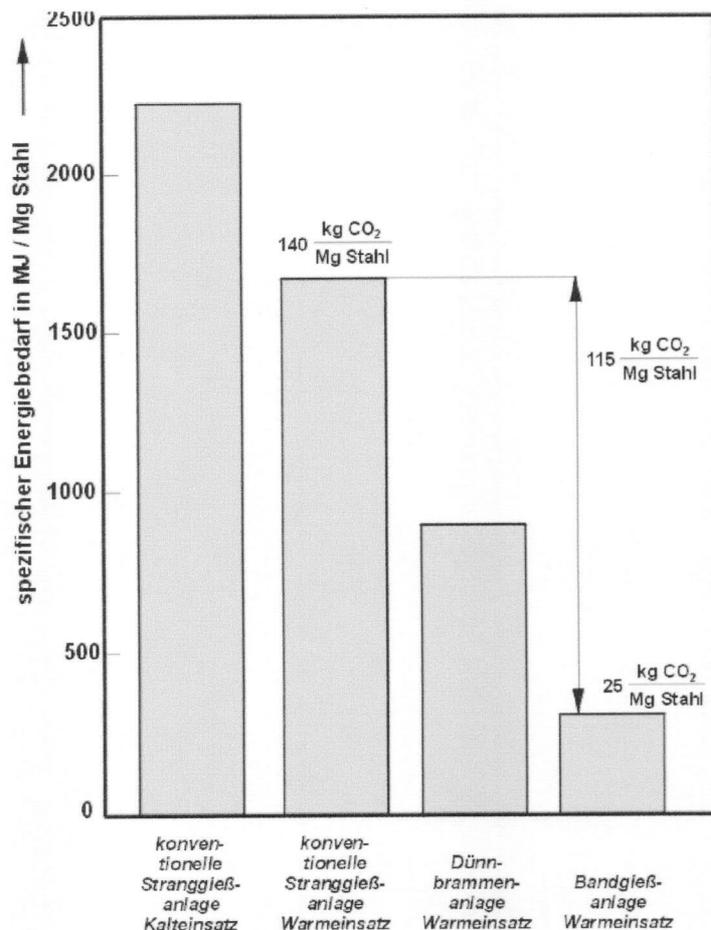


Bild 5: Spezifischer Energiebedarf bei verschiedenen Gießverfahren für Stahl [3, 4].

erforderlichen Nachverbrennung der Ofenabgase schätzt man eine Primärenergieeinsparung durch Schrottvorwärmung von ca. 290 MJ/Mg Stahl, was einer Minderung der CO₂-Emissionen um 35 kg CO₂/Mg Stahl entspricht. Der erschmolzene Stahl wird nach einer Konditionierung anschließend entweder in einer konventionellen Stranggießanlage (**Bild 4a**), einer Dünnbrammenstranggießanlage, einer Entwicklung jüngerer Datums (**Bild 4b**), oder möglicherweise künftig in einer sich derzeit in der Entwicklung befindlichen sogenannten Bandgießanlage (**Bild 4c**) gegossen und erstarrt sowie anschließend gewalzt und zu einem Coil für die weitere Verwendung aufgewickelt. Aufgrund der in Bild 4 dargestellten Verringerung der Gießdicke von ca. 250 mm auf ca. 8 bis 15 mm in den letzten 30 Jahren konnte die Anzahl von Prozessschritten verringert (Ersatz oder auch Weglassen von Wiedererwärmungsöfen, vermindern der Anzahl der Walzgerüste usw.) und die in **Bild 5** dargestellte zu Bild 4 zugehörige Energie- bzw. CO₂-Emissionseinsparung von ca. 115 kg CO₂/Mg Stahl realisiert werden. Wenn auch das direkte Bandgießen noch in der Entwicklung ist, läßt sich doch das CO₂ mindernde Potential von (35 + 115) kg CO₂/Mg Stahl = 150 kg CO₂/Mg Stahl bei einem Durchsatz von ca. 40 Mill. Mg Stahl/a (davon bis 50 % Schrott) zu 6,0 Mill. Mg CO₂/a in Deutschland in Zukunft allein aufgrund eines einzigen veränderten Teilprozesses abschätzen. Selbstverständlich muß sich erst erweisen inwieweit sich neue Prozesse durchsetzen. Zudem ist realistischer Weise bei Veränderungen immer in Jahrzehnten zu rechnen. Deswegen sei nochmals betont, daß es sich um die Abschätzung von Potentialen handelt.

Das Beispiel der Reihenschaltung des Einschmelz-, Gieß- und Walzvorganges steht hier nur stellvertretend für ein allgemeines Prinzip. Überall dort, wo die Temperatur in Stoffbehandlungsverfahren eine entsprechende Rolle spielt, und dies sind sehr viele (vgl. Bild 3), sollte man sich bemühen, direkt aus der „ersten Hitze“ heraus Schritt für Schritt von Temperaturniveau zu Temperaturniveau ohne Wiedererwärmungsschritte usw. nach Möglichkeit bis zum Produkt (oder wenigstens bis zum Halbprodukt) zu gelangen.

2.2 Beispiel: Abfall aus kommunalem Bereich

In naher Zukunft dürfen nur noch Stoffe, deren Kohlenstoffgehalt (TOC) unter einer zugelassenen Höchstkonzentration liegt, deponiert werden. Es ist für eine Kohlendioxidbilanz im Grundsatz zunächst ohne Belang, in welchen Schritten die Oxidation des Kohlenstoffs stattfindet, sei es durch alleinige thermische Behandlung, einer Reihenschaltung aus mechanisch-biologischer und thermischer Behandlung usw.. Treten Vergärung oder Vergasung auf, so ist der abschließende Schritt der Verwendung der erzeugten Gase (in der Regel die Verbrennung) natürlich in die CO₂-Bilanz mit einzubeziehen. In vielen Literaturstellen wird über verschiedene Verfahren bzw. Verfahrensketten berichtet. Sie unterscheiden sich durch unterschiedliche Abgasmengen (und damit Schadstofffrachten) sowie durch deren Wirkungsgrad zur Energieumsetzung (z.B. Heizwärme, elektrischer Strom) und durch die Eigenschaften der erzeugten Reststoffe. Wichtig ist, daß man zunächst die Bilanzgrenze um das jeweils betrachtete Verfahren so lange erweitert, bis alle Hilfsbilanzen für den Aufwand zur Erzeugung von Hilfsstoffen und Hilfsenergie erfaßt bzw. mit eingeschlossen sind, d.h. daß man jeweils den Weg und den Aufwand zurück bis zu den Primärenergieressourcen verfolgen kann. Dies erscheint selbstverständlich, kann aber im Einzelfall sehr schwierig sein, wenn z.B. bei biologischen Abfallbehandlungsanlagen ohne Einhausung die Erfassung der Abluft/Abgase erfolgen soll. Nur bei geschlossenen Bilanzen kann etwas über die insgesamt umgesetzte Energie und den erzeugten Nutzen sowie in Relation dazu die erzeugte CO₂-Menge gesagt und das Ergebnis für die Bewertung zur Substitution von Primärenergie durch Abfall herangezogen werden. Hierbei ist zu beachten, daß der Teil des CO₂, der aus regenerativen Quellen stammt, nicht als CO₂-Belastung zu werten ist. Dieser Anteil ist quellenspezifisch, d.h. nur abhängig von der Zusammensetzung des Abfalls und nicht etwa beeinflusst von den Abfallbehandlungsverfahren (Deponie, mechanisch-biologischen Verfahren, thermischen Verfahren usw.). Dies ist bei der Diskussion des regenerativen Energiebeitrages durch Abfall zu beachten.

Die **Bilder 6 und 7** zeigen beispielhaft eine Energie- und eine Stoffbilanz für eine Müllverbrennung. Man erkennt, daß neben dem sogenannten Hauptverfahren zusätzlich Abgasreinigung, integrierte Reststoffnachbehandlung, diverse benötigte Hilfsenergieanlagen sowie beispielhaft eine Sauerstoffanreicherung der Verbrennungsluft zum Erreichen der erforderlichen Prozeßtemperatur für einen hier angenommenen heizwertschwachen Abfall mit einem Heizwert von 6 MJ/kg¹⁾ berücksichtigt sind, d.h. daß der Bilanzkreis bis zu Primärenergieressourcen gezogen ist. Betrachtet man nur die Energieumsetzung in der Feuerung (einschließlich Kessel), erhält man für den Wirkungsgrad und die CO₂-Emissionen, die in Spalte 1 des **Bildes 8** angegebenen Werte. Zieht man die Bilanzgrenze um die ganze Anlage, d. h. einschließlich Abgasreinigung usw., ergeben sich die Werte der Spalte 2. Wird der Bilanzkreis wie erwähnt bis zu den Primärenergieressourcen gezogen, d. h. bis zur Bilanzgrenze K der Bilder 6 und 7, führt dies zu den sogenannten Primärwirkungsgraden, die in Spalte 3 des **Bildes 8** ange-

¹⁾ Der mittlere Abfallheizwert kann in Deutschland zu 10 MJ/kg angesetzt werden. Mit der Annahme eines Heizwertes von 6 MJ/kg soll gezeigt werden, daß sich auch mit einem solch niedrigen Heizwert Energienutzung und Schonung von Primärenergieressourcen durchführen lassen.

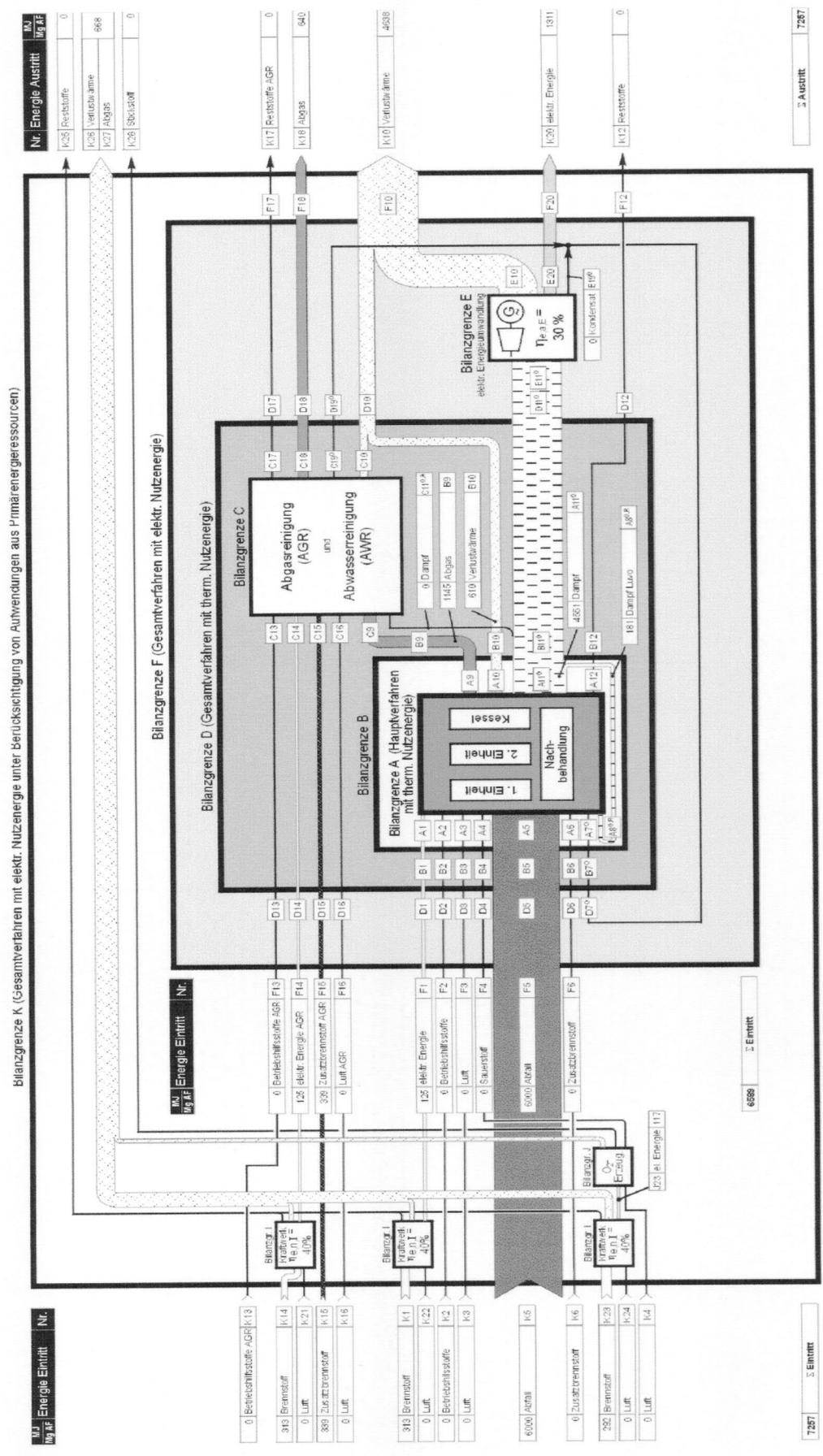


Bild 6: Vereinfachtes Energieflußdiagramm einer klassischen Hausmüllverbrennung unter Berücksichtigung von Aufwendungen aus Primärenergieressourcen (hier mit Sauerstoffanreicherung der Verbrennungsluft), Erläuterung im Text [5].

geben sind²⁾. Von dem erzeugten Nutzen wird nun die benötigte Primärhilfsenergie abgezogen, um den „Nettonutzen“, d.h. den Nutzen durch den Abfall allein darzustellen³⁾. Dann erhält man den sogenannten Nettoprimärwirkungsgrad und die zugehörigen CO₂-Emissionen, die in Spalte 4 des Bildes 8 dargestellt sind. Nimmt man nicht den sehr niedrigen Abfallheizwert von 6 MJ/kg (siehe Fußnote 1)), sondern einen mittleren Heizwert des Abfalls von 10 MJ/kg an, erhält man die in Spalte 5 des Bildes 8 dargestellten Werte. Die CO₂-Emissionen lassen sich entsprechend ihrem Ursprung in einen regenerativen und einen fossilen Anteil unterscheiden. Nur Letztere sind als CO₂-Belastung anzusehen.

				Heizwert 6 MJ/kg				Heizwert 10 MJ/kg
				Spalte 1	Spalte 2	Spalte 3	Spalte 4	Spalte 5
				Umsetzung in Feuerung	Bilanzgrenze um Anlage	primär	netto primär	netto primär
1	Wirkungsgrad	%	thermisch	72	66	59,7	47	60
2			elektrisch	-	20	17,9	14	18
3	CO ₂ auf thermische Nutzenergie bezogen	kg CO ₂ MJ _{th}	gesamt				0,229	0,178
4			regenerativ				0,153	0,119
5			fossil				0,076	0,059
6	CO ₂ auf elektrische Nutzenergie bezogen	kg CO ₂ MJ _{el}	gesamt				0,763	0,594
7			regenerativ				0,509	0,396
8			fossil				0,254	0,198

Bild 8: Wirkungsgrade und CO₂-Emissionen bei einer thermischen Behandlung von Abfall (Vergleiche auch Abfallwerte in Bild 1b auf chemische Energie (Heizwert) bezogen).

Man erkennt, daß man ganz unterschiedliche Werte für die CO₂-Emissionen erhält, je nach dem ob man

- auf die in Bild 1b angegebene chemische (gesamte) Energie (Heizwert),
- auf den thermischen Nutzen (Bild 8) oder
- auf den elektrischen Nutzen (Bild 8)

bezieht und dann jeweils zwischen gesamten, fossilen und regenerativen spez. CO₂-Mengen unterscheidet. Es ist in diesem Zusammenhang zu betonen, daß, wenn für einen vorgegebenen Zweck eine bestimmte Nutzenergie erforderlich ist, die zugehörige CO₂-Emission nicht aus den Werten, die in Bild 1b angegeben sind, berechnet werden kann, sondern daß selbstverständlich Wirkungsgrade zu berücksichtigen sind (z.B. Bild 8). Es wird deutlich, daß sich je nach Bilanzgrenze und Bewertungshintergrund ganz unterschiedliche Zahlen ergeben, d.h. man bei Substitutionsrechnungen auf die Randbedingungen achten und diese bei Diskussionen sehr sorgfältig herausstellen muß, um Mißverständnisse zu vermeiden.

²⁾ Den Aufwand an benötigter Primärhilfsenergie in einen Bilanzkreis einzubeziehen, erscheint naheliegend, wird aber dennoch häufig nicht durchgeführt. So wird z. B. bei der Berechnung von Kraftwerkswirkungsgraden in der Regel nicht berücksichtigt, daß nach [6] 3 % des Heizwertes bei Braunkohle, 6,8 % bei Steinkohle und 11,2 % des Heizwertes bei Erdgas bereits „verbraucht“ sind, bevor die Energienutzung im Kraftwerk beginnt.

³⁾ Hierbei ist das in Abschnitt 3 erwähnte Energieaustauschverhältnis zu berücksichtigen.

Die Einschätzung des Potentials des Hausmüllaufkommens läßt sich damit unterschiedlich darstellen, wie die folgenden 3 Beispiele zeigen.

- A) Bei Annahme eines Abfallheizwertes von 10 MJ/kg (6 MJ/kg)⁴⁾ ergibt sich bei einem Aufkommen von ca. 40 Mill. Mg/a⁵⁾ ein Energieinhalt (chemisch) von 400 PJ/a (240 PJ/a) und damit für einem regenerativen CO₂-Anteil von 66 % (zwei Drittel) ein zugehöriger regenerativer Energieanteil von 264 PJ/a (158 PJ/a).

Verwendet man diese Energie für eine elektrische Versorgung bei einem Wirkungsgrad von 18 % (14 %) (vgl. Spalten 4 und 5, Zeile 2, Bild 8) ergibt sich ein elektrisches Energiepotential von 47 PJ/a (22 PJ/a), was ungefähr dem derzeitigen genutzten Windenergiepotential [8] in Deutschland entspricht.

Ein Drittel (33 %) der Energie ist fossilen Ursprungs d.h. 136 PJ/a (82 PJ/a), die man zu Heizzwecken verwenden und als Potential zur Substitution von Steinkohle verwenden kann.

- B) Man kann auch annehmen, daß der o.g. Energieinhalt (chemisch) von 400 PJ/a (240 PJ/a) in **40 Mill. Mg Abfall/a** mit einem Wirkungsgrad von 60 % (47 %) (vgl. Spalten 4 und 5, Zeile 1, Bild 8) für Heizzwecke verwendet wird. Dann erhält man eine thermische Nutzenergie von 240 PJ/a (113 PJ/a), wobei 14,2 Mill. Mg CO_{2,fossil}/a (8,6 Mill. Mg CO_{2,fossil}/a) aus dem fossilen Anteil (vgl. Spalten 4 und 5, Zeile 5, Bild 8) freigesetzt werden. Die gleiche thermische Nutzenergie von 240 PJ/a (113 PJ/a) erhielte man für Heizzwecke aus Steinkohle bei einem Wirkungsgrad von 85 % durch den Einsatz von **9,6 Mill. Mg Steinkohle/a** (4,5 Mill. Mg Steinkohle/a), wobei 26,0 Mill. Mg CO_{2,fossil}/a (12,3 Mill. Mg CO_{2,fossil}/a) freigesetzt würden.

In diesem Beispiel würde also 1 Mg Abfall dann 0,244 Mg (0,114 Mg) Steinkohle energetisch gleichwertig substituieren. Gleichzeitig würden beim Umsatz von 1 Mg Abfall dann +0,295 Mg CO_{2,fossil} (+0,093 Mg CO_{2,fossil}) eingespart im Vergleich zum Einsatz von Steinkohle.

- C) Man kann auch annehmen, daß der o.g. Energieinhalt (chemisch) von 400 PJ/a (240 PJ/a) in **40 Mill. Mg Abfall/a** mit einem Wirkungsgrad von 18 % (14 %) (vgl. Spalten 4 und 5, Zeile 2, Bild 8) für die elektrische Energieerzeugung verwendet wird. Dann erhält man eine elektrische Nutzenergie von 72 PJ/a (34 PJ/a), wobei wieder 14,2 Mill. Mg CO_{2,fossil}/a (8,6 Mill. Mg CO_{2,fossil}/a) aus dem fossilen Anteil (vgl. Spalten 4 und 5, Zeile 8, Bild 8) freigesetzt würden. Die gleiche elektrische Nutzenergie von 72 PJ/a (34 PJ/a) aus Steinkohle erhielte man beim Einsatz von **6,1 Mill. Mg Steinkohle/a** (2,9 Mill. Mg Steinkohle/a) bei einem Kraftwerkswirkungsgrad von 40 %, wobei 16,6 Mill. Mg CO_{2,fossil}/a (7,8 Mill. Mg CO_{2,fossil}/a) freigesetzt würden.

In diesem Beispiel würde also 1 Mg Abfall dann 0,154 Mg (0,072 Mg) Steinkohle energetisch gleichwertig substituieren. Gleichzeitig würde beim Umsatz von 1 Mg Abfall dann +0,060 Mg CO_{2,fossil} (-0,020 Mg CO_{2,fossil}) eingespart (zusätzlich freigesetzt) im Vergleich zum Einsatz von Steinkohle.

⁴⁾ Für Deutschland kann ein mittlerer Abfallheizwert von ca. 10 MJ/kg angenommen werden. In Klammern werden im folgenden die jeweiligen Werte angegeben, die man erhält, wenn man einen sehr niedrigen Abfallheizwert von 6 MJ/kg annähme. Damit soll verdeutlicht werden, wie bereits in Fußnote 1) vermerkt, daß es sich lohnt, bei einem solch niedrigen Heizwert noch eine Energienutzung zu betreiben.

⁵⁾ Es werden unterschiedliche Zahlen für das Aufkommen z.B. zwischen 30 und 42 Mill. Mg Abfall/a in der Literatur genannt. Zur Potentialabschätzung wird hier ein Wert von 40 Mill. Mg Abfall/a [7] gewählt.

Obwohl Pauschalierungen vermieden werden sollten, zeigen die vorgenannten Größenordnungen, daß das Primärenergie substituierende bzw. CO₂ mindernde Potential von kommunalem Abfall in etwa mit dem derzeit insgesamt vorhandenen Potential der Bereitstellung regenerativer Energie (vgl. Balken a. in Bild 1a) vergleichbar ist, wie z.B. die Bewertung B zeigt, wo 40 Mill. Mg Abfall mit 9,6 Mill. Mg Steinkohle energetisch gleichwertig sind (vgl. auch Bild 1a). Es ist somit sehr wichtig, auch in den Bereichen der Abfallwirtschaft mit Restmüll weitere Optimierungsanstrengungen zu unternehmen, was auch im nächsten Abschnitt dargestellt wird.

3 Vernetzte Prozesse (Koppelprozesse)

Es stellt sich die Frage, ob in der Abfallwirtschaft anfallende Reststoffe nicht nur in Einzelprozessen wie oben dargestellt, sondern auch zur Substitution von Brennstoffen z. B. in Hochtemperaturproduktionsprozessen (vgl. Bild 3) oder Kraftwerken (Co- bzw. Mitverbrennung)) verwendet werden können. Es zeigt sich, daß dabei häufig Abfall nicht unmittelbar eingesetzt werden kann, sondern daß zunächst ein Ersatzbrennstoff (EBS) bzw. sog. Sekundärbrennstoff (SBS) hergestellt werden muß, um den Randbedingungen des jeweiligen Einsatzes ausreichend angepaßt zu sein. Die Herstellung von Ersatzbrennstoff kann auf ganz unterschiedliche Weise geschehen, von der mechanischen Abtrennung von bestimmten Fraktionen über die mechanisch-biologische Vorbehandlung bis zur thermischen Vorbehandlung. In **Bild 9** ist das bekannte Beispiel der Herstellung eines Vergasungsgases aus Abfall zur Substitution von Primärenergie in der Calcinatorfeuerung der Klinkerherstellung eines Zementwerkes dargestellt. Optional kann die Asche in den Drehrohrofen gegeben und dort in das Gut in einer Weise eingebunden werden, daß Phasen entstehen, die ohnehin im Klinker vorhanden sind.

Bei der Charakterisierung eines erzeugten Ersatzbrennstoffs sind neben

- chemischen Eigenschaften (Elementaranalyse, Spurenanalyse, Aschezusammensetzung, Ascheschmelzverhalten, usw.)
- kalorischen Eigenschaften (Heizwert, Mindestluftbedarf, adiabate Verbrennungstemperatur (ohne Hilfsmittel), usw.)
- mechanischen Eigenschaften (Konsistenz, Handhabbarkeit, usw.)

insbesondere

- anlagentechnische Gesichtspunkte
 - und hier wiederum in Abhängigkeit von Apparaten und Haupteinflußgrößen
 - Maßnahmen zur Prozeßbeeinflussung und Prozeßführung

wichtig.

Hierüber ist an anderen Stellen schon häufiger berichtet worden. Es sei daher zusammengefaßt, daß im Zusammenhang mit der Energiesubstitution bzw. CO₂-Minderung zunächst das sogenannte Energieaustauschverhältnis zu berücksichtigen ist, das ausdrückt, wieviel mehr oder weniger der Ersatzbrennstoff gegenüber dem Primärbrennstoff energetisch wert ist. Dabei kann es vorkommen, daß je nach Anlagenschaltung, Prozeßführung und Einsatz

vergleich ein Ersatzbrennstoff mit einem kleineren Heizwert energetisch mehr wert ist als ein solcher mit höherem Heizwert. Damit soll angemerkt sein, daß mit der Trennung von Abfall zur Beseitigung oder Verwertung an der Heizwertgrenze von 11 MJ/kg zwar der Versuch eines Ordnungsrahmens unternommen, daß aber verfahrenstechnisch eine solche Grenze nicht gesehen werden kann.

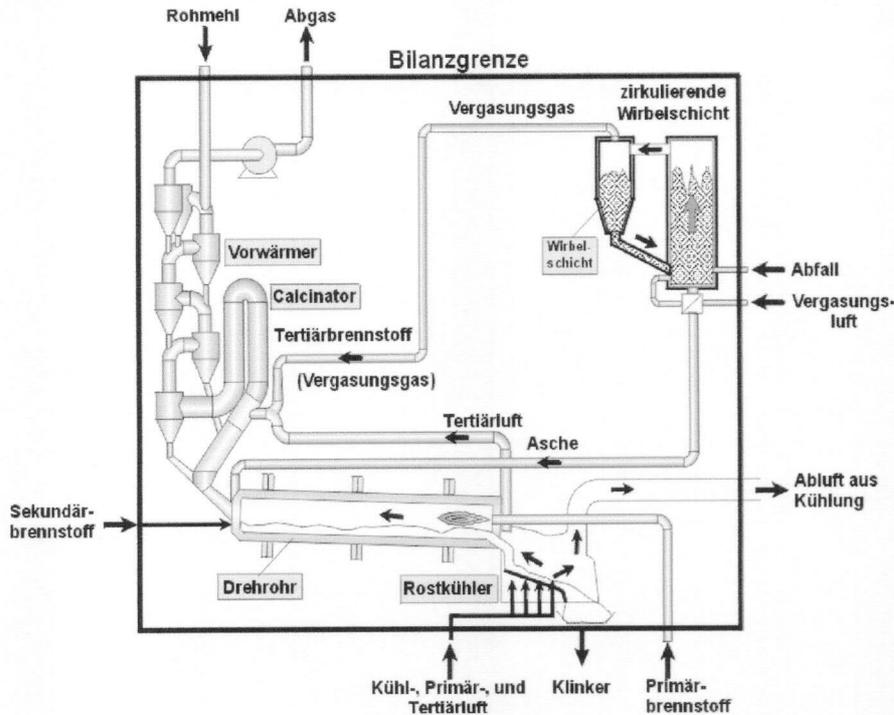


Bild 9: Schematische Darstellung eines Klinkerherstellungsprozesses in Kombination mit einer Wirbelschichtvergasung.

Wenn das Energie-austauschverhältnis für den jeweiligen Anwendungsfall spezifisch ermittelt worden ist, darf man die unmittelbar in dem betrachteten Prozeß ersetzte Primärenergie nicht direkt als Primärenergieeinsparung bzw. CO₂-Minderung betrachten. Es muß vielmehr nach der technischen Substitution durch den Ersatzbrennstoff in der betrachteten Anlage noch ein Vergleich zwischen den Einzelprozessen und dem zugehörigen

Koppelprozeß erfolgen. Dies soll an einem Beispiel verdeutlicht werden (Bilder 10 und 11).

Einzelprozesse

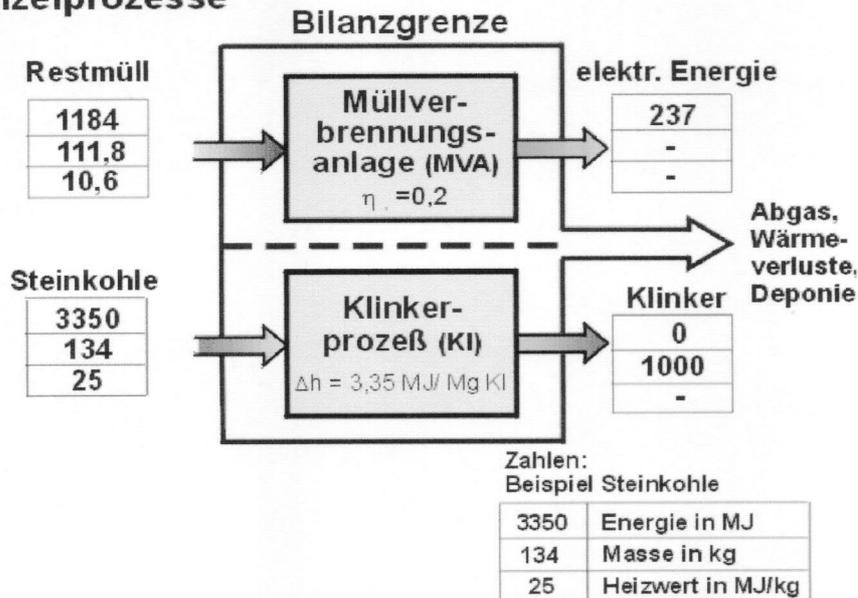


Bild 10: Einzelprozesse Müllverbrennungsanlage und Klinkerherstellungsprozeß [9, 10].

Koppelprozeß

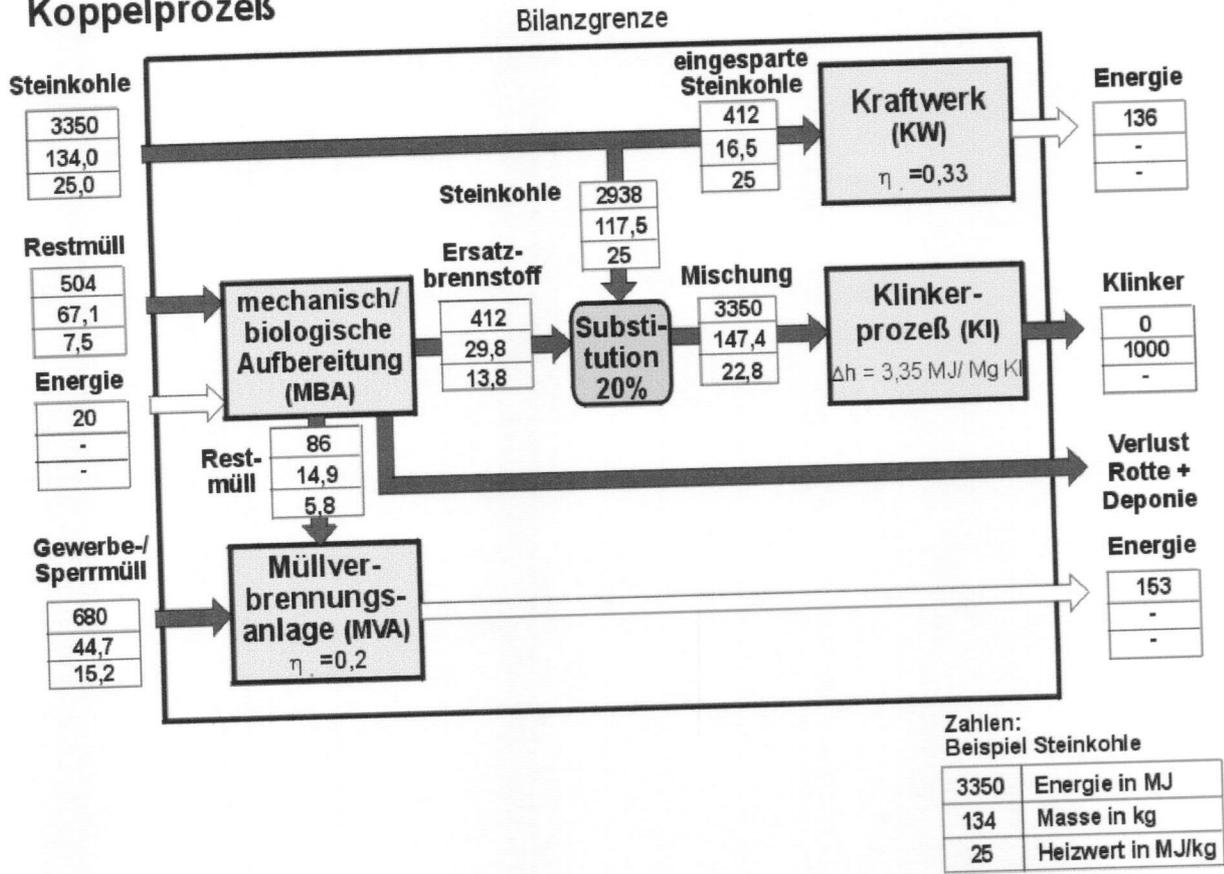


Bild 11: Vereinfachte Darstellung eines Koppelprozesses: Substitution von Primärbrennstoff durch Ersatzbrennstoff aus mech.- biologischer Vorbehandlung in einem Koppelprozeß aus Müllverbrennungsanlage und Klinkerherstellungsprozeß [9, 10].

Zunächst werden Müllverbrennung und Hochtemperaturproduktionsprozeß getrennt (Bild 10) betrieben (Einzelprozesse) und wie im vorangegangenen Abschnitt erläutert, detailliert bilanziert. Das Ergebnis sei das in Bild 10 dargestellte, bei dem nur die benötigten Daten angegeben sind. 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 1000 kg) erzeugt. Die beiden Prozesse werden nun gekoppelt (Bild 11), indem ein Teil der Steinkohle für den Klinkerprozeß durch Abfall substituiert wird, wobei die Eingangsmengen an Abfall und Steinkohle gegenüber den Einzelprozessen gleich bleiben. Aus Bild 11 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 werden kann (in dem Beispiel in Bild 11 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 die niederkalorische Fraktion aus der mechanisch-biologischen Vorbehandlung zusammen mit dem Sperrmüllanteil ausreicht, um eine Müllverbrennung noch befriedigend betreiben zu können (z.B. ohne Sauerstoffanreicherung der

Verbrennungsluft im Gegensatz zu der Situation in den Bildern 6 und 7). 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 bereit gestellt wird im Vergleich zu dem Betrieb der Einzelprozesse, was ein entsprechendes CO₂-Minderungspotential darstellt. Dabei wird die produzierte Klinkermenge als Basis beibehalten. Das Ergebnis ist natürlich das gleiche, wenn man die Eingangsmenge an Kohle für den Koppelprozeß soweit vermindert, bis hier die gleiche elektrische Energie bereit gestellt wird wie bei den Einzelprozessen. Im vorliegenden Fall bedeutet dies eine Verringerung der Primärenergieressource „Kohle“ um 3 % und ein entsprechendes CO₂-Minderungspotential.

Es sei an dieser Stelle deutlich 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, d.h. daß dann bei Einzelprozeßbetrieb Primärenergieressourcen einspart und CO₂-Emissionen gemindert werden. Solche Verhältnisse können auftreten, wenn bei der Ersatzbrennstoffherstellung soweit 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 von Ersatzbrennstoffherstellern 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 liegt beim Vergleich von Einzel- mit Koppelprozessen die Entscheidung, in welchem Umfang Primärenergie eingespart und entsprechend CO₂-Emissionen gemindert werden, von dem Energieaustauschverhältnis, dem Nettoprimärwirkungsgrad der Müllverbrennungsanlage (MVA) im Einzelprozeß, dem Nettoprimärwirkungsgrad der MVA im Koppelprozeß, dem Nettoprimärwirkungsgrad des Kraftwerks für Primärenergie, dem Energieaufwand 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. ab.

Ersatzbrennstoffherstellung und Müllverbrennung widersprechen sich 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 neben dem CO₂-Minderungspotential auch auf den Eintrag von Spurenelementen wie Schwermetallen aus dem Brennstoff in das Gut geachtet werden. Wenn von dem Brennstoff nur ein Bruchteil dessen, was durch das Gut eingetragen wird, stammt und sich dabei Phasen bilden, die ohnehin im Gut beim Herstellungsprozeß (Brennprozeß) ohne Brennstoffsubstitution „natürlich“ entstehen, sollte die Prüfung für eine Umweltverträglichkeit nicht an einem Primärenergiebrennstoff sondern an den im Koppelprozeß erzeugtem Gut und der verbleibenden Müllverbrennungsschlacke geschehen. Es sei weiter daran erinnert, daß nach dem derzeitigen Stand wegen der in Kürze zu erwartenden Änderungen der Ablagerungsbestimmungen die Müllmengen, die nicht mehr auf die Deponie gelangen dürfen, erheblich anwachsen werden. Dann sind alle Maßnahmen für kontrollierte abfallwirtschaftliche und umweltgerechte Wege erforderlich.

Insgesamt sei wie bereits oben angedeutet zusammengefaßt, daß es sehr wichtig ist, sowohl mit Einzel- wie auch mit Koppelprozessen das CO₂-mindernde Potential der Abfallwirtschaft zu nutzen. Allein im Bereich der kommunalen Abfälle wird es in der Größenordnung des derzeit vorhandenen regenerativen Potentials bei der Energiebereitstellung eingeschätzt.

Literatur

- [1] Thöne, E.; Fahl, U.: Energiewirtschaftliche Gesamtsituation. BWK, Bd. 51 (1999), Nr. 4 April.
- [2] Möglichkeiten und Grenzen der industriellen Abwärmenutzung (1989) VIK-Mitteilungen 6, S. 151.
- [3] Kroos, J.; Evertz, T.; Dubke, M.; Urlaub, U.; Reichelt, W.; Trakowski, W.; Spitzer, K.-H.; Schwerfeger, K.; Nystöm, R.: The „Direct Strip Casting“ Process. Metec 99, International Conference on New Development in Metallurgical Process Technology, Düsseldorf, Juni 13-15, 1999.
- [4] Spitzer, K.-H.; Scholz, R.; Kroos, J.; Hower, K.H.; Nyström, R.; Burström, E., Reichelt, W.; Dubke, M.: Aktuelle technologische Entwicklungen beim Direct Strip Casting (DSC)-Verfahren. Stahl 2000, 16. u. 17 November 2000, Düsseldorf.
- [5] Schulenburg, F., Scholz, R.: Energetische Bilanzierung von Verfahrenslinien aus mechanisch-biologischer und nachgeschalteter thermischer Abfallbehandlung; In: Stoffstromspezifische Abfallbehandlung im Hinblick auf thermische Verfahren, 13. Seminar des Zentrums für Abfallforschung (ZAF), Braunschweig, 1998, S. 15-52.
- [6] Ganzheitliche Bilanzierung von Grundstoffen und Halbzeugen, Teil I Allgemeiner Teil; Forschungsstelle für Energiewirtschaft der Gesellschaft für praktische Energiekunde e.V., München, 1999.
- [7] Statistische Bundesamt (Hrsg.): Statistische Jahrbücher 1995, 1996, Verlag Metzler-Poeschel, Stuttgart.
- [8] Klimaschutz durch Nutzung erneuerbarer Energien. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und des Umweltbundesamtes, Berlin, UfoPlan-Vorhaben 29897340, Bonn, Münster, Stuttgart, Wuppertal, 31. Okt. 1999.
- [9] Scholz, R.; Beckmann, M.: Substitution von Brennstoffen und Rohstoffen durch Abfälle in Hochtemperaturprozessen; In: Stoffliche und thermische Verwertung von Abfällen in industriellen Hochtemperaturprozessen, 11. Kolloquium der Deutschen Vereinigung für Verbrennungsforschung (DVV), Braunschweig, 1998, S. 21-46.
- [10] Beckmann, M.; Scholz, R.: Energetische Bewertung der Substitution von Brennstoffen durch Ersatzbrennstoffe bei Hochtemperaturprozessen zur Stoffbehandlung, Teil 1 und 2. ZKG International 52 (1999) Nr. 6 und Nr. 8.