

# Energetische Bewertung von Konzepten zur Substitution von fossilen Brennstoffen

Scholz, R.; Beckmann, M.; Horeni, M.: Energetische Bewertung von Konzepten zur Substitution von fossilen Brennstoffen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 3. Tagung 20.03.–22.03.2006, Berlin. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2006, S. 509–535. ISBN 3-935317-21-2

Reinhard Scholz, Michael Beckmann und Martin Horeni

1.	Grundsätze zur Bewertung .....	510
1.1.	Bewertungsmaßstäbe, Vergleichs- oder Referenzsituation und Ersatzsituation .....	510
1.2.	Systemdefinitionen, Bilanzierung und Bewertungskriterien .....	511
2.	Beispiele .....	512
2.1.	Einsatz von Ersatzbrennstoff aus Restmüll in Hochtemperaturproduktionsprozessen .....	512
2.2.	Einsatz von Ersatzbrennstoff aus Restmüll in Industriekraftwerken .....	517
2.3.	Einsatz von aufbereitetem Restmüll zur Energieerzeugung .....	522
2.4.	Bewertung der Herstellung und des Einsatzes von Brennstoffen aus Biomasse .....	524
2.5.	Bewertung der Bereitstellung von fossilen Brennstoffen .....	530
3.	Zusammenfassung .....	532
4.	Quellen .....	533
5.	Symbolverzeichnis .....	534

## Kap. 1.

## Grundsätze zur Bewertung

## Kap. 1.1.

## Bewertungsmaßstäbe, Vergleichs- oder Referenzsituation und Ersatzsituation

Technische Konzepte können nur bewertet werden, wenn sie an einem Konzept, das als Referenz dient, gemessen werden – *benchmarking* –, wenn also ein Bewertungsmaßstab – so genannte *benchmark* – als Vergleichsbasis vorliegt. Häufig muss für eine tragfähige Bewertung, d.h. einen tragfähigen Vergleich, erst ein geeignetes Referenzkonzept oder eine geeignete Referenzsituation (RS) definiert werden. Es ist dabei wichtig, dass sowohl bei der Referenzsituation als auch bei der zu beurteilenden neuen oder veränderten Situation – allgemein Ersatzsituation (ES) – von der jeweils gleichen Menge und Art von Stoffen ausgegangen und deren Wirkung anschließend verglichen wird.<sup>1</sup> Da diese Betrachtung hier vom Eintritt zum Austritt geht, wird sie auch als *Vorwärtsbetrachtung* bezeichnet<sup>2</sup>.

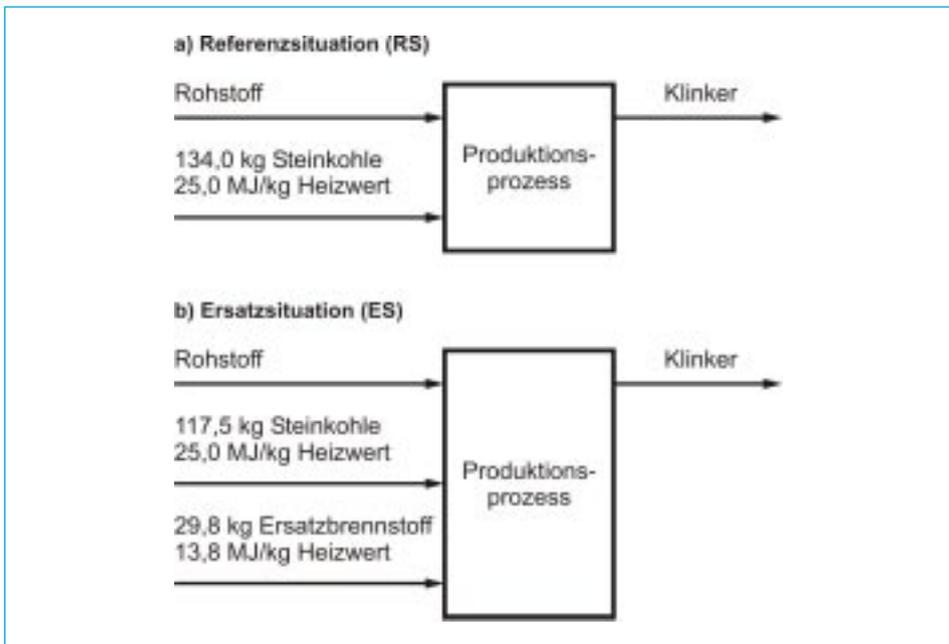


Bild 1: Häufig zu findender Systemvergleich zwischen System a) und System b) bei der Substitution von Brennstoffen

<sup>1</sup> Von der jeweils gleichen Menge und gleichen Art von Stoffen auszugehen hat den Vorteil, dass man alle Prozesse, die vom primären Ursprung bis zum Vorliegen dieser Stoffe vor Ort durchlaufen werden müssen, nicht in den Vergleich der Referenz- mit der Ersatzsituation einbeziehen muss (siehe Fußnote 4).

<sup>2</sup> Es ist auch möglich den Vergleich mit einer *Rückwärtsbetrachtung* durchzuführen, d.h. mit einer Betrachtung die vom Austritt zum Eintritt führt (siehe Fußnote 5).

Gegebenfalls sind die beiden zu vergleichenden Situationen – Systeme – solange zu ergänzen und zu erweitern, bis die Bedingung gleicher Stoffmengen und Stoffdaten, von denen ausgegangen wird, erfüllt ist.

In Bild 1 ist ein Beispiel dargestellt, das stellvertretend für eine häufig zu findende Vorgehensweise bei der Bewertung oder dem Vergleich steht, jedoch für den vorliegenden Zweck ungeeignet ist, weil von unterschiedlichen Arten und Mengen an Stoffen ausgegangen wird. Als Referenzsituation (RS) sei ein mit Kohle beheiztes Drehrohr zur Produktion von Klinker (Bild 1a) gegeben. Wurde nun ermittelt, dass in einem solchen Produktionsprozess hier z.B. 16,5 kg Steinkohle durch 29,8 kg Ersatzbrennstoff aus Restmüll ersetzt werden kann, ergibt sich Bild 1b (Ersatzsituation (ES) – Situation bei Substitution). Dann wird argumentiert, dass dementsprechend 1.000 kg Ersatzbrennstoff in der Lage wären, 554 kg Steinkohle zu ersetzen, d.h. dass die Primärressource Steinkohle geschont und dadurch energetische wie volkswirtschaftliche Vorteile erzielt werden. Ein solcher Vergleich ist in dieser Form sehr unvollständig, weil dabei nicht berücksichtigt wird, dass der Ersatzbrennstoff einen Herstellungsprozess durchläuft, dass in diesem Herstellungsprozess wiederum ein Reststoff aus der Ersatzbrennstoffherstellung verbleibt, d.h. ein *Restmüllrest* (RMR), der in der Regel nicht deponiert werden kann und in einer Müllverbrennungsanlage behandelt werden muss usw. Die in diesem Fall für einen zutreffenden Vergleich gegenüberzustellenden Systeme werden im Kapitel 2.1. erläutert.

## Kap. 1.2.

### Systemdefinitionen, Bilanzierung und Bewertungskriterien

Bei der Festlegung oder Auffindung der Referenzsituation geht man zunächst von der allgemeinen Aussage aus, dass die Referenzsituation – *Benchmark* – diejenige ist, die man vorfindet, wenn man die beabsichtigte Maßnahme – hier die Substitution von fossilen Brennstoffen – nicht durchführt, und zwar mit dem wichtigen Zusatz, dass dies *bei sonst gleichen Randbedingungen* zu geschehen hat.<sup>3</sup> Letzteres heißt wie bereits erwähnt, dass bei den Prozessen der Referenz- und Ersatzsituation bei einer Vorwärtsbetrachtung (vergleiche Fußnote 1) gleiche Anfangsbedingungen mit gleichen Mengen und Arten – Konsistenz, Aufbereitungsgrad usw. – an Stoffen gegeben sind. Man findet dann sowohl für die Referenz- wie auch für die Ersatzsituation die erforderlichen Teilprozesse. Für jeden Teilprozess müssen Bilanzgrenzen festgelegt und detaillierte, schlüssig aufgehende Bilanzen durchgeführt werden. Hierzu sei auf das Schrifttum (z.B. [2, 5, 6]) verwiesen. Um alle Teilprozesse, die zur Referenzsituation gehören,

<sup>3</sup> Wenn man eine vorhandene Situation als Referenz wählt, erhält man bei der Beurteilung der Ersatzsituation eine quantitative relative Bewertung besser oder schlechter. Vorteilhafter ist selbstverständlich ein absoluter Maßstab (absolute Referenzsituation), an dem gemessen werden kann. Dieser kann z.B. ein thermodynamisch begründetes Optimum etwa der Carnotsche Wirkungsgrad bei Kraftwerken oder etwa ein aus chemischen Gleichgewichten abgeleitetes Kriterium für Produktionsprozesse sein usw. Häufig ist ein absolutes Maßstabskriterium jedoch kaum zugänglich, so dass dann der Maßstab der Ist-Situation als Referenz weiterhilft (vergleiche Fußnote 10).

wird nun eine gemeinsame einhüllende Bilanzgrenze gelegt. Das Gleiche geschieht mit den zur Ersatzsituation gehörenden Teilprozessen. Die so erzeugten beiden großen zu Referenz- und Ersatzsituation gehörenden Bilanzkreise werden nun bilanziert und bewertet. Dabei wird zu dem Vorgehen bei Festlegung von Bilanzgrenzen, der detaillierten Bilanzierung selbst sowie zu Bewertungskriterien auf das Schrifttum (z.B. [6]) verwiesen.

*Kap. 2.*

## Beispiele

Bei den nachfolgenden Beispielen handelt es sich um vereinfachte Darstellungen von Energie- und Massenströmen oder -flüssen oder -mengen. Es werden dabei der Übersichtlichkeit wegen nur die für das generelle Vorgehen benötigten Größen dargestellt.

*Kap. 2.1.*

### Einsatz von Ersatzbrennstoff aus Restmüll in Hochtemperaturproduktionsprozessen

In Bild 1 ist bereits einleitend dargestellt, wie bei der Substitution von fossilen Brennstoffen – Primärbrennstoffen – häufig argumentiert wird, und dass diese Betrachtung für die Substitution, d.h. Einsparung von Primärressourcen, wesentliche Aspekte wie die Herstellung des Ersatzbrennstoffes usw. nicht beachtet. Zur Berücksichtigung solcher wichtigen Gesichtspunkte und Darstellung der Gesamtsituation dient Bild 2 (vergleiche hierzu auch weitere Beispiele in [2]).

In Bild 2b ist verdeutlicht, dass in dem gewählten Beispiel für die Herstellung der benötigten Masse an Ersatzbrennstoff (29,8 kg) in einer mechanisch-biologischen Aufbereitung zunächst 67,1 kg Restmüll nötig sind. Aus dieser Aufbereitung bleibt eine Masse *Restmüllrest* (RMR) von 14,9 kg ( $h_u = 5,8$  MJ/kg) übrig, die einer Müllverbrennungsanlage zuzuführen ist. Wegen des schwachen Heizwertes – keine eigenständige Feuerung möglich – müssen in dieser Müllverbrennungsanlage 44,7 kg Gewerbemüll zugefeuert werden, um die Zufuehrung von Erdgas – Primärenergie – zu vermeiden. Für die Ersatzsituation werden somit  $(67,1 + 44,7)$  kg = 111,8 kg Restmüll benötigt.

Wenn man nun die Substitution unterließe, müsste man die genannte

- Restmüllmasse von 111,8 kg in einer Müllverbrennungsanlage und die
- Steinkohlemasse von 134,0 kg zur Produktion von einer Tonne Klinker in einer zugehörigen Anlage verbrennen. Dies ist somit die Referenzsituation (Bild 2a), an der die Ersatzsituation (Bild 2b) zu messen ist (technisches *benchmarking*), bei der ebenfalls

- die gleiche Art Restmüll mit der gleichen Menge (111,8 kg) und
- die gleiche Art Steinkohle mit der gleichen Masse von 134,0 kg zugeführt werden.

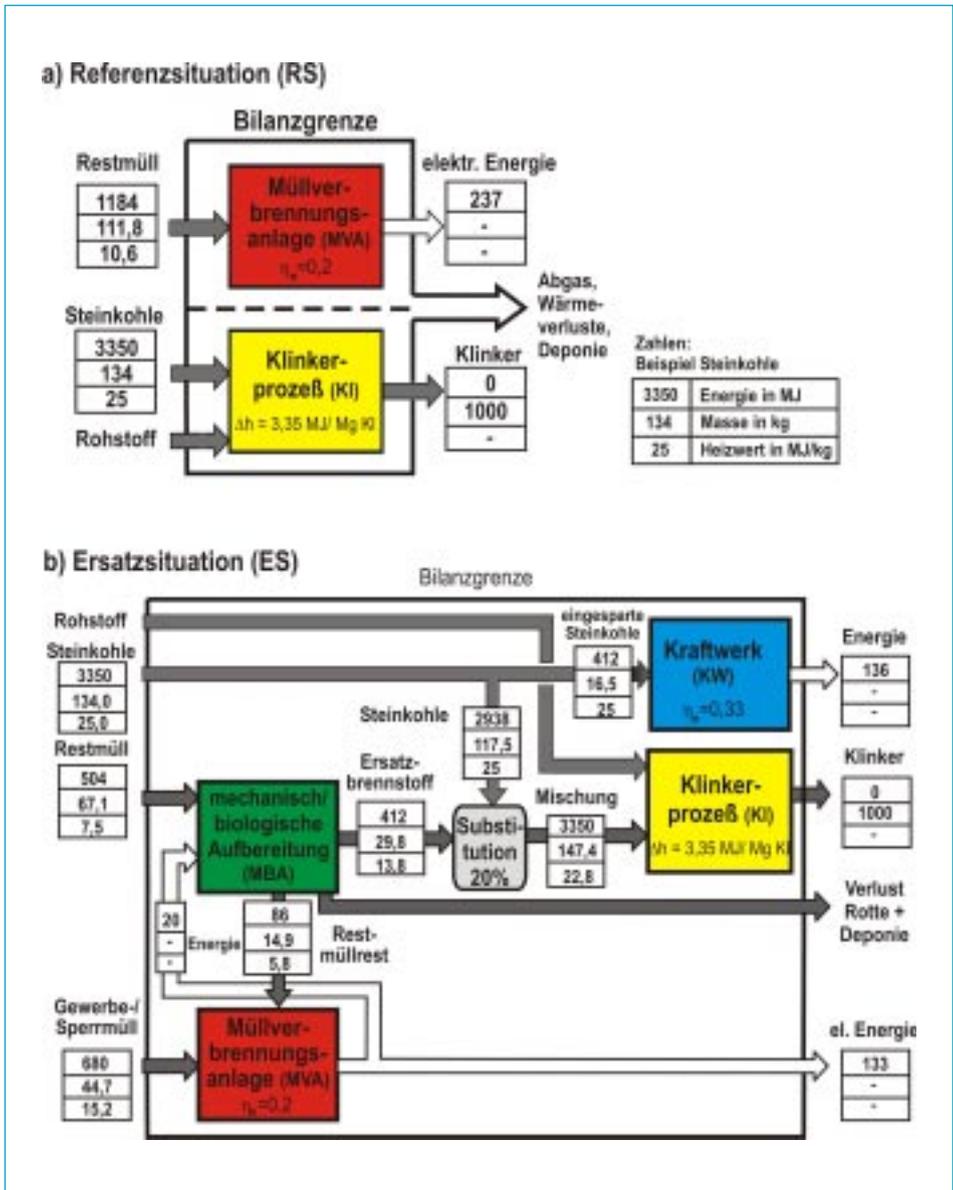


Bild 2: Vergleich der Referenzsituation (RS) mit der Ersatzsituation (ES) bei der Substitution von Primärbrennstoff durch Ersatzbrennstoff in Hochtemperaturprozessen, vereinfachte Darstellung

Aus dem Vergleich der Bilanzierung der Referenz- und der Ersatzsituation erkennt man aus dem hier nur für einen Betriebszustand dargestellten Fall, dass bei gleicher Menge an produziertem Klinker bei der Ersatzsituation (ES) 269 MJ elektrische Energie und bei der Referenzsituation (RS) 237 MJ elektrische Energie als Nutzen abgeführt werden können. Das heißt, bei der Substitution von fossilem Brennstoff (ES) wird in diesem Fall 14 % mehr elektrische Energie bereitgestellt im Vergleich zur Referenzsituation, was ein dementsprechendes CO<sub>2</sub>-Minderungspotential durch die Ersatzsituation darstellt<sup>4</sup>. Das Ergebnis ist natürlich das Gleiche, wenn man die Eingangsmenge an Kohle für die Ersatzsituation soweit vermindert, bis hier die gleiche elektrische Energie bereitgestellt wird, wie bei der Referenzsituation<sup>5</sup>. Im vorliegenden Fall bedeutet dies eine Verringerung der Primärenergieressource Kohle um etwa 3 % und ein dementsprechendes CO<sub>2</sub>-Minderungspotential durch die Ersatzsituation, d.h. durch Einsatz von Ersatzbrennstoff.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass sich bei solchen hier nur exemplarisch darstellbaren Verhältnissen je nach Randbedingungen auch ein negatives Ergebnis einstellen kann, d.h., dass bei der Referenzsituation weniger Primärenergieressourcen in Anspruch genommen werden und CO<sub>2</sub>-Emissionen in geringerem Umfang auftreten und somit die Ersatzsituation ungünstiger wird. Solche Verhältnisse können z.B. auftreten, wenn bei der Ersatzbrennstoffherstellung so weit gegangen wird, dass für den verbleibenden niederkalorigen Reststoff, der in einer Müllverbrennungsanlage entsorgt werden muss, dort z.B. Zusatzprimärenergie wie Erdgas oder zusätzlich Energie zur Sauerstoffbereitstellung erforderlich wird. Dieses wäre nicht im Sinne der Abfallwirtschaft und wird auch nicht bei der Ersatzbrennstoffherstellung beabsichtigt. Bei einem Vergleich der Referenzsituation mit der Ersatzsituation ist die Entscheidung, in welchem Umfang Primärenergie eingespart wird und gleichzeitig CO<sub>2</sub>-Emissionen gemindert werden, von folgenden Einflussgrößen abhängig:

- Energieaustauschverhältnis,
- Nettoprimärwirkungsgrad der Müllverbrennungsanlage (MVA) bei der Referenzsituation,

<sup>4</sup> Da sowohl bei RS wie ES gleiche Mengen und Arten von Stoffen verwendet werden, haben die Prozesse, die vom Ursprung bis zu dem Zustand führen, in dem die Stoffe vor Ort benötigt werden (Eintritt in RS und ES), keinen Einfluss auf das Ergebnis des Vergleichs (siehe Fußnote 1).

<sup>5</sup> Diese Betrachtung nennt man Rückwärtsbetrachtung, da von gleichen Austrittsverhältnissen (Ergebnis) zum Eintritt zurückgegangen und hier die Bewertung durchgeführt wird (siehe Fußnote 2).

- Nettoprimärwirkungsgrad der Müllverbrennungsanlage bei der Ersatzsituation,
- Nettoprimärwirkungsgrad des Kraftwerkes für die Primärenergieumwandlung,
- Energieaufwand für die Aufbereitung – Herstellung des Ersatzbrennstoffs, z.B. in einer mechanisch-biologischen Aufbereitungsanlage (MBA) –,
- Heizwert des Primärbrennstoffs,
- Heizwert des Ersatzbrennstoffs,
- Heizwert des Abfalls, von dem ausgegangen wird – in Bild 3 bis Bild 5 als Anfangsabfallheizwert bezeichnet –,
- Verteilung der Müllfraktionen auf Ersatzbrennstoffe, auf Anteile, die einer thermischen Behandlung (MVA) zugeführt werden müssen, auf Anteile, die auf einer Deponie abgelagert werden müssen und auf Anteile, die in die Atmosphäre ausgetragen werden (z.B. Rotteverluste),
- usw.

Beispiele für ausgewählte Randbedingungen zeigen Bild 3, Bild 4 und Bild 5. Hier bedeutet  $Z_{et}$  das elektrische Nutzenergieverhältnis, gebildet aus elektrischer Nutzenergie bei der Ersatzsituation zu elektrischer Nutzenergie bei der Referenzsituation.  $Z_{et} > 1$  bedeutet somit Ressourceneinsparung durch Substitution von Steinkohle durch Ersatzbrennstoff,  $Z_{et} < 1$  bedeutet also Ressourceneinsparung, wenn man es bei der Referenzsituation belässt, d.h. die Substitution nicht durchführt<sup>6</sup>. Bild 3, Bild 4 und Bild 5 machen jedoch beispielhaft sehr deutlich, dass man bei geeigneter Wahl der Randbedingungen bei der Verwendung von Ersatzbrennstoff zusätzliche Energieeinspar- und CO<sub>2</sub>-Minderungspotentiale gegenüber der Referenzsituation – hier ist das die Monoabfallverbrennung und getrennt davon ablaufende Hochtemperaturproduktionsprozesse – erzielen kann. Weitere Beispiele in diesem Zusammenhang sind in [2] zusammengestellt.

<sup>6</sup> Wenn in solchen Fällen trotzdem die Substitution durchgeführt wird, ist der Ersatzbrennstoff begrifflich kein Brennstoff im Sinne eines Ersatzes – einer Substitution – mehr, da er keine Primärenergieressourcen ersetzt, sondern zusätzlich verbraucht. Deswegen sollte bei Diskussionen um Ersatzbrennstoffe erst geprüft werden, ob wirklich Primärenergieressourcen bei der Ersatzsituation eingespart werden, bevor Fragen von Emissionen etc. diskutiert werden.

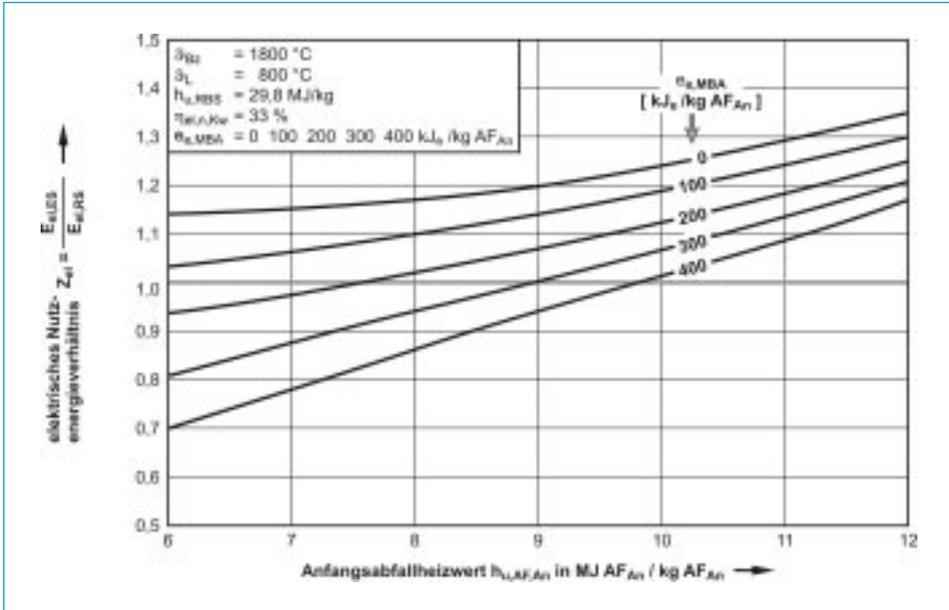


Bild 3: Elektrische Nutzenergie des Ersatzsystems bezogen auf das Referenzsystem in Abhängigkeit vom Anfangsabfallheizwert  $h_{u,AF,An}$  für verschiedene elektrische Energieaufwendungen in der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung  $e_{e,MBA}$  – Beispiel zu Bild 2 –

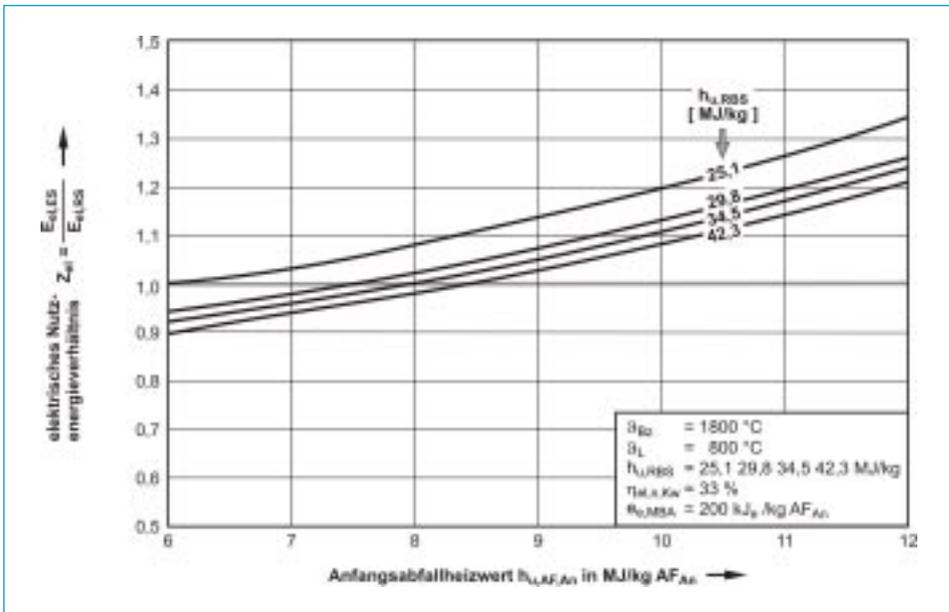


Bild 4: Elektrische Nutzenergie des Ersatzsystems bezogen auf das Referenzsystem in Abhängigkeit vom Anfangsabfallheizwert  $h_{u,AF,An}$  für verschiedene Heizwerte  $h_{u,RBS}$  des zu substituierenden fossilen Brennstoffs (Regelbrennstoff RBS) – Beispiel zu Bild 2 –

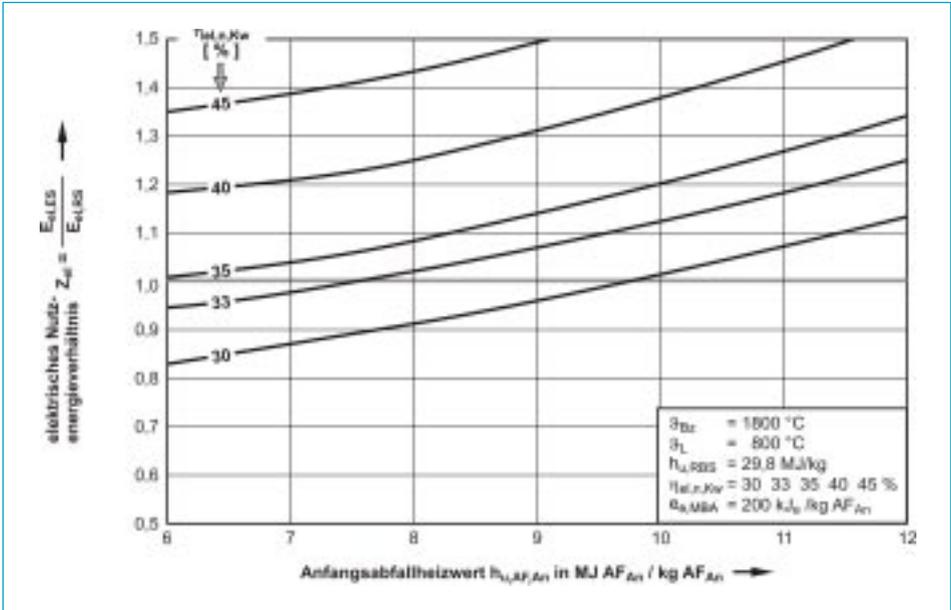


Bild 5: Elektrische Nutzenergie des Ersatzsystems bezogen auf das Referenzsystem in Abhängigkeit vom Anfangsabfallheizwert  $h_{u,AF,An}$  für verschiedene Nettowirkungsgrade (elektrisch)  $\eta_{el,KW}$  des Kraftwerks – Beispiel zu Bild 2 –

*Kap. 2.2.*

## Einsatz von Ersatzbrennstoff aus Restmüll in Industriekraftwerken

Die prinzipielle Vorgehensweise bei der energetischen Bewertung des Einsatzes von Ersatzbrennstoffen für die Erzeugung elektrischer und thermischer Energie, hier z.B. in Industriekraftwerken, ist in Bild 6 dargestellt. Bild 6a zeigt schematisch als Referenzsituation die Umwandlung von 1,25 t Restmüll (RM) mit einem vergleichsweise niedrigen Heizwert von  $h_u = 8,0 \text{ MJ/kg}$  in einer Müllverbrennungsanlage, bei der die angebotene thermische Nutzenergie von 4.200 MJ thermisch nicht genutzt werden kann – z.B. bei sehr ungünstigem Standort, in Stadtrandlage, ohne Anbindung an industrielle Verbraucher (vergleiche hierzu auch [5]). In Bild 6a ist diese Energie daher als Verlust *über Dach* gekennzeichnet. Der Anlagenverlust beträgt 4.000 MJ.

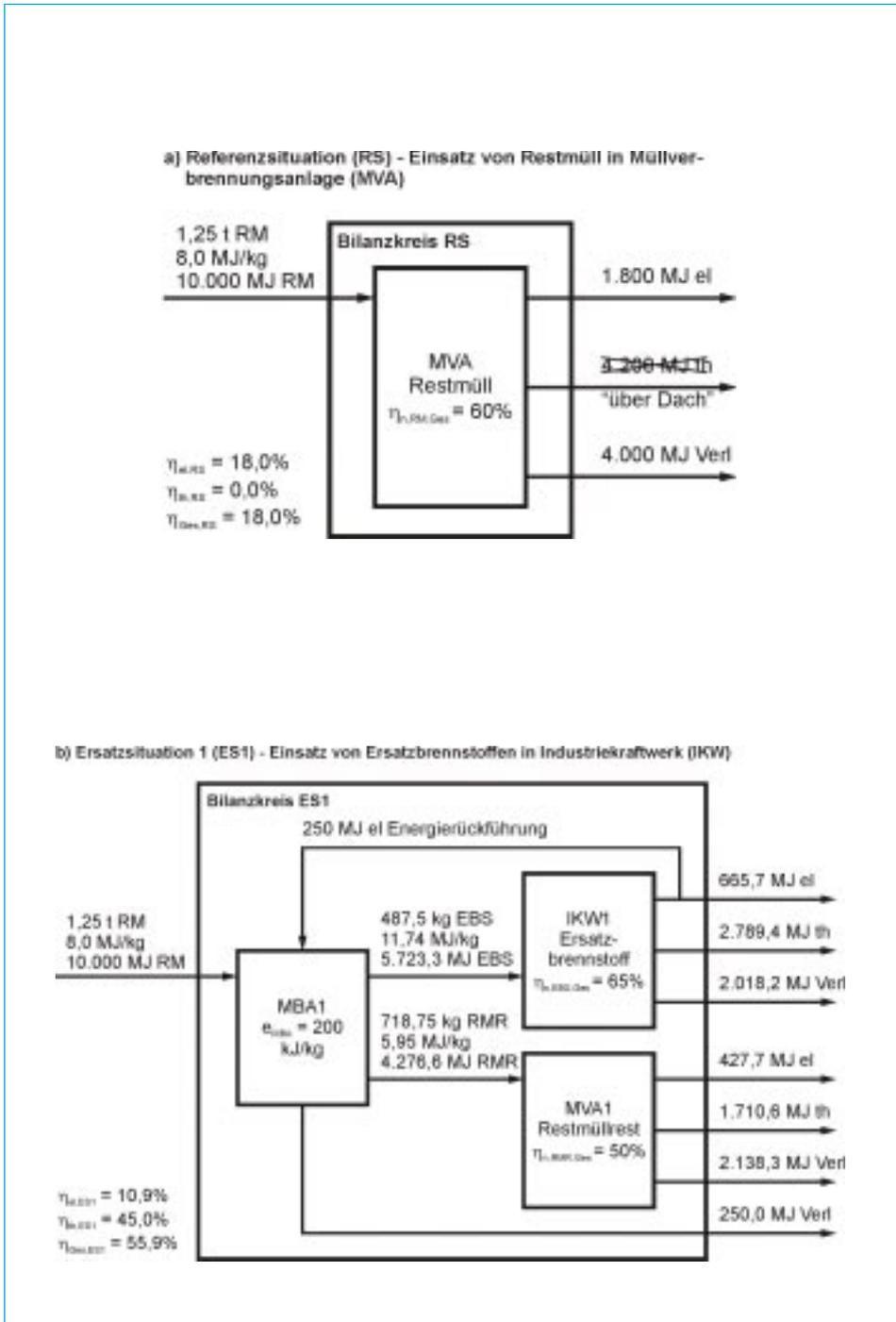
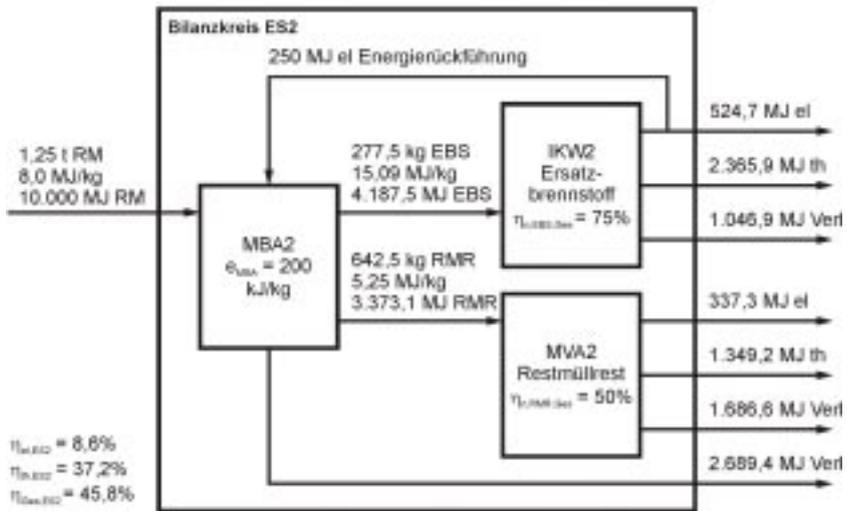


Bild 6: Vergleich der Referenzsituation (RS) mit der Ersatzsituation (ES) beim Einsatz von Ersatzbrennstoffen in Industriekraftwerken, vereinfachte Darstellung

c) Ersatzsituation 2 (ES2) - Einsatz von Ersatzbrennstoffen in Industriekraftwerk (IKW)



d) Ersatzsituation 3 (ES3) - Einsatz von Restmüll in Müllverbrennungsanlagen (MVA) mit Standortvorteil

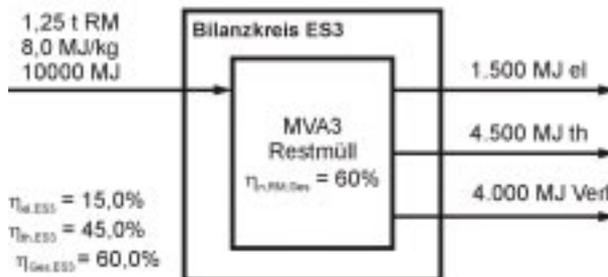


Bild 6: Vergleich der Referenzsituation (RS) mit der Ersatzsituation (ES) beim Einsatz von Ersatzbrennstoffen in Industriekraftwerken, vereinfachte Darstellung – Fortsetzung –

Würde nun zusätzlich thermische Energie benötigt, könnte diese in einem Industrieheizkraftwerk bereitgestellt werden, wobei in diesem Industrieheizkraftwerk Ersatzbrennstoffe eingesetzt werden, die zuvor aus dem Restmüll in einer mechanischen oder mechanisch-biologischen Aufbereitungsanlage (MBA) erzeugt wurden (Ersatzsituation 1 in Bild 6b und Ersatzsituation 2 in Bild 6c). In Abhängigkeit von dem jeweiligen Aufbereitungsverfahren entstehen dann neben den Ersatzbrennstoffen Reststoffe, die einer zusätzlichen thermischen Behandlung zugeführt werden müssen sowie Verluste<sup>7</sup>. Für die Industriekraftwerke IKW1 und IKW2 wurde hierbei ein unterschiedlicher (Netto-) Brennstoffnutzungsgrad  $\omega$  bei gleicher Stromkennzahl  $\sigma$  gewählt [1, 10 und 11]. Für das Gesamtverfahren, bestehend aus mechanisch-biologischer Abfallbehandlungsanlage, Industrieheizkraftwerk und Müllverbrennungsanlage können dann für das hier dargestellte Beispiel Gesamtwirkungsgrade<sup>8</sup> von

$$\eta_{Ges,ES1} = \eta_{el,ES1} + \eta_{th,ES1} = 55,9 \% \text{ und } \eta_{Ges,ES2} = \eta_{el,ES2} + \eta_{th,ES2} = 45,8 \%$$

ermittelt werden.

Dem gegenüber lässt sich ein weiterer Vergleichsprozess definieren (Ersatzsituation 3, Bild 6d), der eine Müllverbrennungsanlage *mit Standortvorteil* darstellt, d.h., bei der die entstehende – nutzbare – thermische Energie tatsächlich vollständig genutzt wird. Für diese Müllverbrennungsanlage lassen sich dann zwar etwas geringere elektrische Wirkungsgrade – z.B. aufgrund Nutzung von Gegendruck- anstelle von Kondensationsturbinen –, aber wesentlich höhere thermische Wirkungsgrade ermitteln. Der Gesamtprozess einer standortoptimierten Müllverbrennungsanlage ( $\eta_{Ges,ES3} = 60,0 \%$ ) stellt sich in dem Beispiel energetisch günstiger als die Ersatzsituation 1 und 2 dar, wobei

$$\eta_{Ges,ES3} > \eta_{Ges,ES1} > \eta_{Ges,ES2} \text{ mit}$$

$$\eta_{el,ES3} > \eta_{el,ES1} > \eta_{el,ES2} \text{ und}$$

$$\eta_{th,ES3} = \eta_{th,ES1} > \eta_{th,ES2} \text{ ist.}$$

Werden mechanische oder mechanisch-biologische Aufbereitungsstufen verwendet (z.B. Bild 7) ist deshalb sehr genau zu prüfen, ob das Gesamtverfahren energetisch tatsächlich günstiger ist, als die jeweilige Referenzsituation.

<sup>7</sup> Bei der Aufbereitung MBA2 findet eine Langzeitrotte statt, um den Heizwert des Ersatzbrennstoffes weiter steigern zu können. Die Verluste (in die Atmosphäre) sind deshalb sehr viel höher als bei der Aufbereitung MBA1.

<sup>8</sup> Für die Bildung des Gesamtwirkungsgrades wird die Summe aus thermischer und elektrischer Zielenergie als Nutzen auf die insgesamt zugeführte Einsatzenergie des jeweils betrachteten Bilanzraumes als Aufwand bezogen. Der Gesamtwirkungsgrad setzt sich aus der Summe des thermischen und des elektrischen Wirkungsgrades für ein und denselben Bilanzkreis zusammen. In der Kraftwerkstechnik wird hierfür auch der Brennstoffausnutzungsgrad verwendet (siehe z.B. [10, 11]). Dabei wird die Wertigkeit der einzelnen Energieformen nicht berücksichtigt.

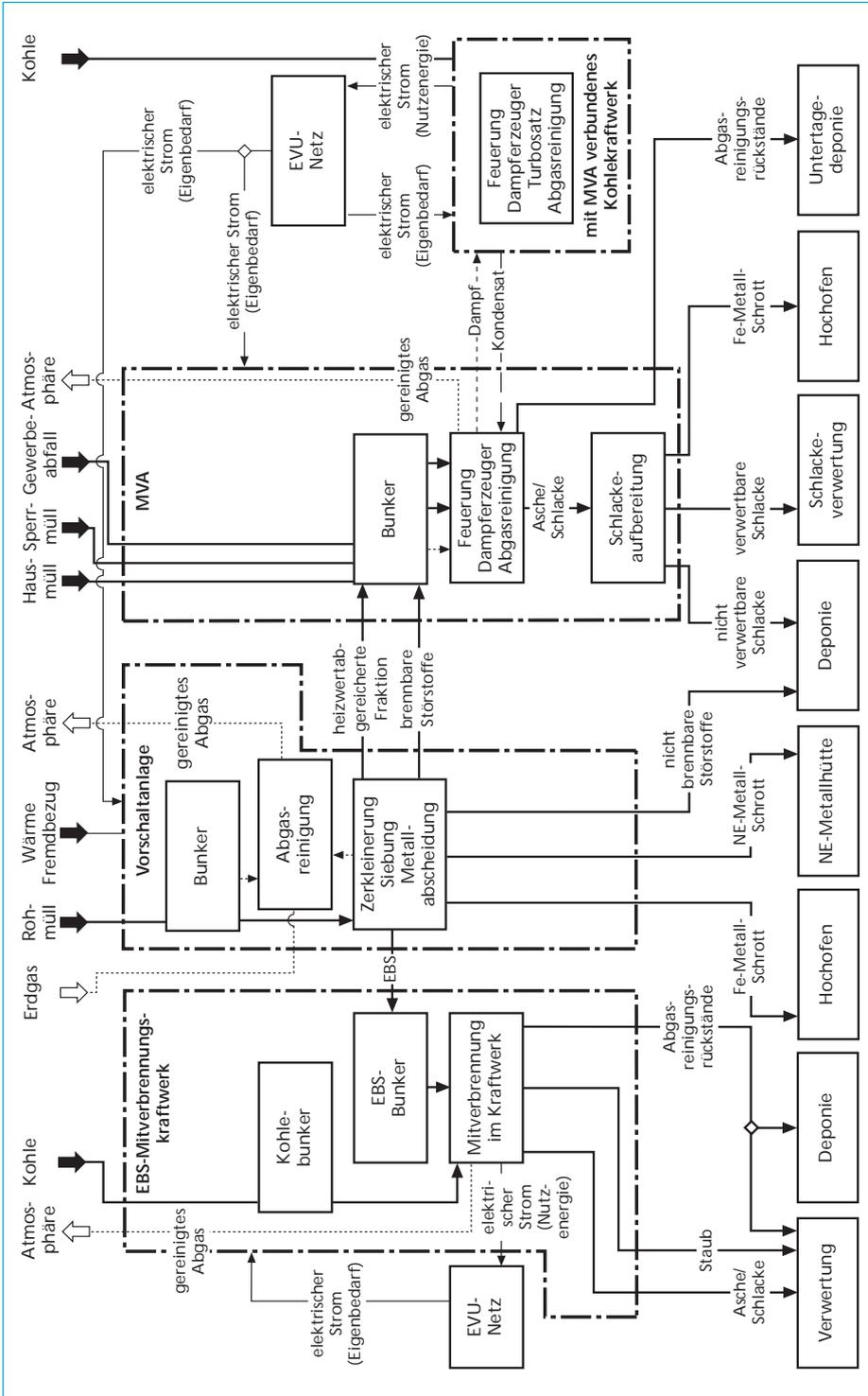


Bild 7: Systemdarstellung einer Müllverbrennungsanlage mit Vorschaltanlage und Verbrennung der heizwertabgereicherten Fraktion

Quelle: Thomé-Kozmiensky, K. J.: Vorschaltanlagen für die Abfallverbrennung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe 5 – Herstellung und Verwertung. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2005, S. 509

## Kap. 2.3.

**Einsatz von aufbereitetem Restmüll zur Energieerzeugung**

Die prinzipielle Vorgehensweise bei der energetischen Bewertung von Verfahren mit einem Pyrolyseprozess zur Ersatzbrennstoffaufbereitung ist in Bild 8 dargestellt. Bild 8a zeigt schematisch die gewählte Referenzsituation für die thermische Behandlung von 1,25 t Restmüll in einer Müllverbrennungsanlage (vergleiche Kapitel 2.2.) und von 1,38 t Steinkohle in einem Kraftwerk. Die benötigte Menge Steinkohle ergibt sich aus der hier untersuchten Ersatzsituation 1 in Bild 8b.

Bei dem Gesamtverfahren der Ersatzsituation 1 wird der in einer mechanisch-biologischen Aufbereitungsanlage (vergleiche Bild 6c) hergestellte Ersatzbrennstoff anschließend in einem Pyrolysedrehrohr in Pyrolysegas und -koks umgewandelt, die dann in einem Großkraftwerk für die Erzeugung elektrischer Energie eingesetzt werden (energetischer Anteil am Brennstoffeinsatz 10 %, für Pyrolyse- und Kraftwerksdaten siehe konkrete Anwendungsfälle, z.B. [3, 7]). In dem Beispiel ergibt sich dann für das Gesamtverfahren der Ersatzsituation 1 ein Wirkungsgrad – elektrisch und thermisch – von  $\eta_{Ges,ES1} = 33,7 \%$ .

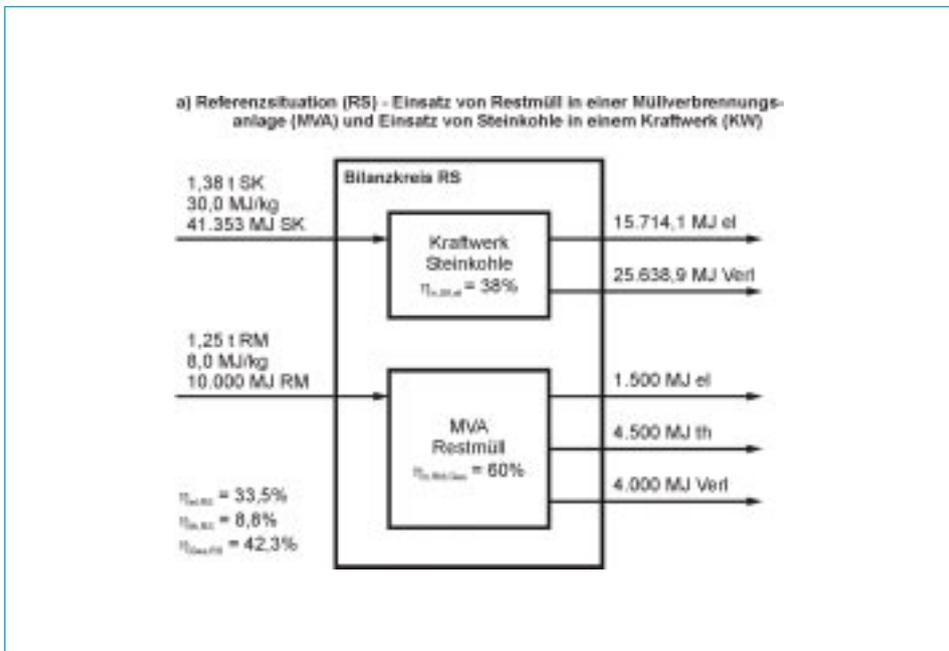


Bild 8: Vergleich der Referenzsituation (RS) mit der Ersatzsituation (ES) bei der Mitverbrennung von aufbereitetem Restmüll (Ersatzsituation 1, nach mechanisch-biologischer Aufbereitung und anschließender Pyrolyse) und bei Einsatz von aufbereitetem Restmüll für die Energieerzeugung (Ersatzsituation 2, nach Pyrolyse), vereinfachte Darstellung

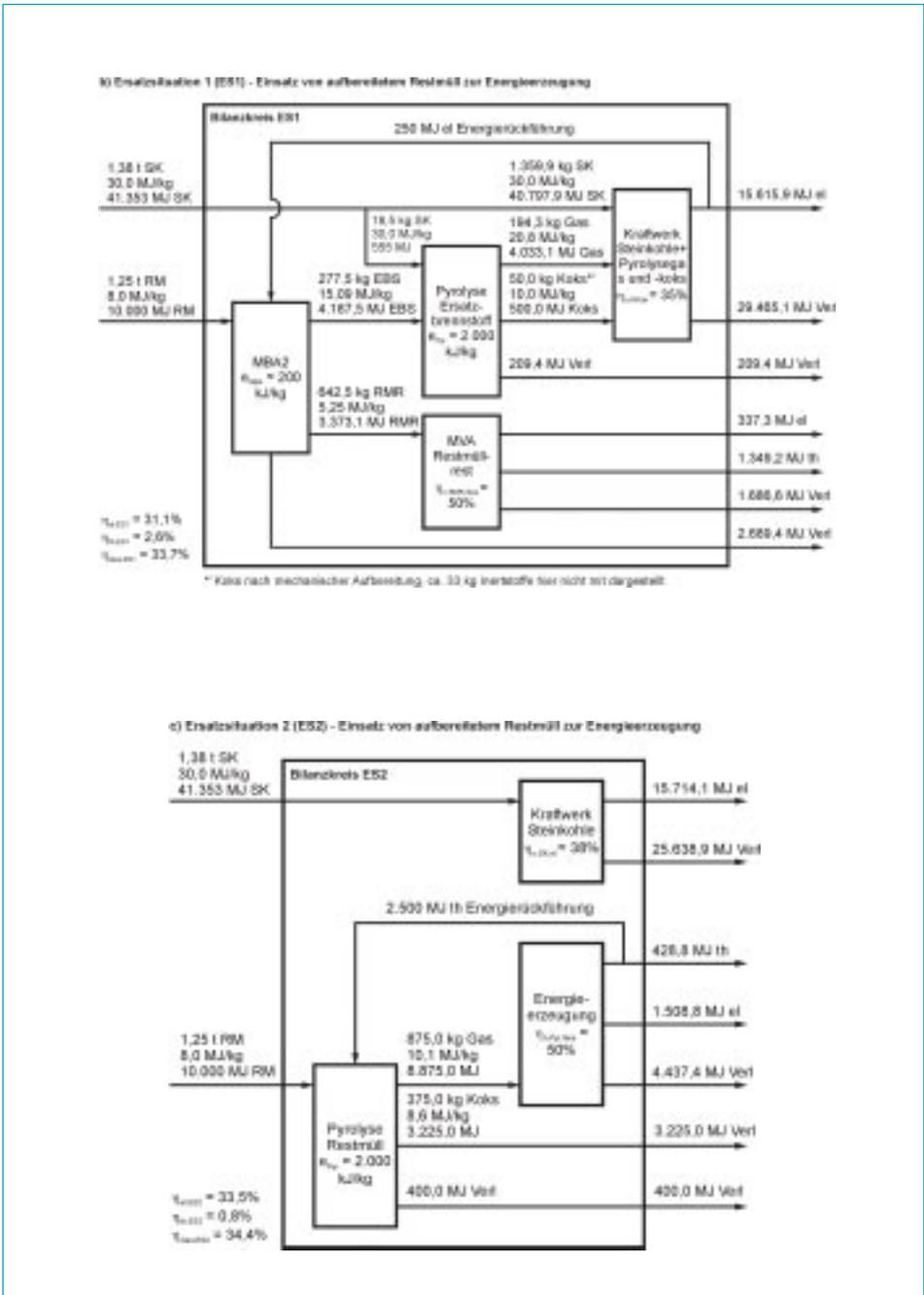


Bild 8: Vergleich der Referenzsituation (RS) mit der Ersatzsituation (ES) bei der Mitverbrennung von aufbereitetem Restmüll (Ersatzsituation 1, nach mechanisch-biologischer Aufbereitung und anschließender Pyrolyse) und bei Einsatz von aufbereitetem Restmüll für die Energieerzeugung (Ersatzsituation 2, nach Pyrolyse), vereinfachte Darstellung – Fortsetzung –

Eine weitere Ersatzsituation 2 kann wie in Bild 8c dargestellt gebildet werden (für Daten zur Pyrolyse siehe konkrete Anwendungsfälle, z.B. [4]). Dort wird der Restmüll unmittelbar einer Pyrolyse zugeführt und das entstehende Pyrolysegas wird in einer Brennkammer verbrannt, mit anschließender Erzeugung von elektrischer und thermischer Energie. Der erzeugte Pyrolysekoks wird im vorliegenden Beispiel deponiert, stellt also im energetischen Sinne einen Verlust dar. Um gleiche Anfangsbedingungen für den Verfahrensvergleich vorzugeben (Vorwärtsbetrachtung, siehe Kapitel 1.1.) wird das Steinkohlekraftwerk in den Bilanzkreis der Ersatzsituation mit aufgenommen. Insgesamt ergibt sich für das Beispiel der Ersatzsituation 2 ein Gesamtwirkungsgrad von  $\eta_{Ges,ES2} = 34,4\%$ . Damit stellen sich beide Ersatzsituationen – in Abhängigkeit von den gewählten Parametern (Wirkungsgrade der Kraftwerke, Energieaufwand bei der Aufbereitung und Pyrolyse usw.) – als energetisch nachteilig gegenüber der Referenzsituation ( $\eta_{Ges,RS} = 42,3\%$ ) dar, wobei

$$\eta_{Ges,RS} > \eta_{Ges,ES2} > \eta_{Ges,ES1} \text{ mit}$$

$$\eta_{el,RS} > \eta_{el,ES2} > \eta_{el,ES1} \text{ und}$$

$$\eta_{th,RS} > \eta_{th,ES1} > \eta_{th,ES2} \text{ ist.}$$

Es ist jedoch wiederholt darauf hinzuweisen, dass die Bewertung von den jeweiligen Randbedingungen abhängig ist – hier insbesondere der Wirkungsgrad des Steinkohlekraftwerkes, siehe auch Kapitel 2.1. –, und deshalb keine allgemein gültigen Aussagen zu einem bestimmten Verfahren ohne Berücksichtigung der jeweiligen Standortfaktoren – Energieabnahmesituation, Brennstoffqualitäten usw. – möglich sind. Im Vordergrund steht hier die Darstellung des methodischen Vorgehens für das technische *Benchmarking*. Dieses methodische Vorgehen ist unabhängig von den jeweils konkret vorliegenden Randbedingungen und zu untersuchenden Verhältnissen.

*Kap. 2.4.*

## **Bewertung der Herstellung und des Einsatzes von Brennstoffen aus Biomasse**

Die Verwendung von Brennstoffen aus Biomasse zur Substitution fossiler Brennstoffe ist selbstverständlich CO<sub>2</sub>-neutral und spart Primärressourcen ein, so dass die Forderung, den Anteil regenerativer Energie am gesamten Energieaufkommen zu vergrößern, deutlich zu unterstreichen ist. Dennoch ist bei Herstellung und Einsatz von Brennstoffen aus Biomasse der Vergleich von bislang fossil betriebenen Prozessen – Referenzsituation – mit der Situation bei diesen Prozessen im Falle der Substitution – Ersatzsituation – erforderlich, um Verbesserungs- und Optimierungspotentiale aufzuzeigen und darzulegen, wie gut die Situation bei Substitution – Ersatzsituation – gegenüber der herkömmlichen Situation – Referenzsituation – ist. Dies geschieht vor dem Hintergrund, dass man noch auf

Jahrzehnte auf fossile Energie angewiesen sein wird und daher die Aufgabe besteht, diese Ressourcen so sparsam wie möglich einzusetzen und damit *zu strecken*.

Derzeit werden in der Regel lediglich die Herstellungsprozesse bei Brennstoffen aus Biomasse detailliert geschildert und die zugehörigen Aufwendungen genannt. Dann steht der Brennstoff zur Verfügung und sein Einsatz wird ähnlich vereinfacht bewertet, wie einleitend in Kapitel 1.1. beispielhaft gezeigt. Gerade vor dem Hintergrund der CO<sub>2</sub>-Minderung und Primärenergieeinsparung – Ressourcenschonung – sind, wie im folgenden Beispiel exemplarisch gezeigt wird, die jeweiligen betrachteten Verfahren und Verfahrensketten sowohl fossil wie regenerativ betrieben gegenüberzustellen.

Zunächst sei in Bild 9 die Argumentation bei der Substitution regenerativer durch fossile Energie dargelegt, wie man sie häufig findet.

- Bild 9a: Unterstellt man bei der Erzeugung von elektrischem Strom vereinfachend, dass ein Kraftwerk (KW) mit Biomasse (Bm) den gleichen Gesamtwirkungsgrad<sup>9</sup> ( $\eta_{Ges}$ ) hat wie ein Kraftwerk mit Steinkohle (SK), dann substituieren  $E_{Bm} = 100$  kJ Biomasse die Energie von  $E_{Sk} = 100$  kJ Steinkohle, d.h., bei der elektrischen Stromerzeugung ist das Substitutionsverhältnis  $f_{sub} = 1$  kJ Bm/kJ Sk.
- Bild 9b: Unterstellt man bei der Erzeugung von flüssigem Brennstoff für den Kraftfahrzeugverkehr vereinfachend, dass aus  $E_{Bm} = 100$  kJ Biomasse eine Energie von  $E_{Fk} = 35$  kJ flüssigem Kraftstoff (Fk) und aus  $E_{Sk} = 100$  kJ Steinkohle eine Energie von  $E_{Fk} = 50$  kJ Flüssigkraftstoff gewonnen werden können, so ersetzen 143 kJ Biomasse (Bm) dann 100 kJ Steinkohle (Sk), d.h. das Substitutionsverhältnis ist  $f_{sub} = 1,43$  kJ Bm/kJ Sk, wenn man unterstellt, dass bei beiden Herstellungsprozessen der Aufwand jeweils so weit getrieben wird, dass die erzeugten Brennstoffe für die motorische Verbrennung gleichwertig sind, man also bei der Bereitstellung der chemisch gebundenen Energie  $E_{Fk}$  zunächst nicht deren Herkunft indizieren muss.

Die Argumentation nach Bild 9 ist zwar plausibel, sie fragt jedoch nicht danach, wie der Einsatz der Energien optimiert werden könnte. Hierzu diene Bild 10, das bekannte Sachverhalte neben die in Bild 9 stellt.

Zunächst ist die Feststellung wichtig, dass man noch auf Jahrzehnte auf fossile Brennstoffe angewiesen sein wird, d.h. dass man bei der Substitution fossiler durch regenerative Ressourcen auch für die mittelfristige Zukunft beide, d.h. regenerative wie fossile Ressourcen nebeneinander benötigen wird.

<sup>9</sup> Gesamtwirkungsgrad heißt: Umfassen der Verfahrenskette vom Ursprung (von der Exploration bei fossilen Brennstoffen, vom Agrarbetrieb bei nachwachsenden Stoffen) über die Herstellung des Brennstoffes bis zur letztendlichen Energieumwandlung im Kraftwerk in einer gemeinsamen Bilanzgrenze. Dieser Wirkungsgrad wird als Nettoprimärwirkungsgrad bezeichnet (vergleiche [5, 6, 9]).

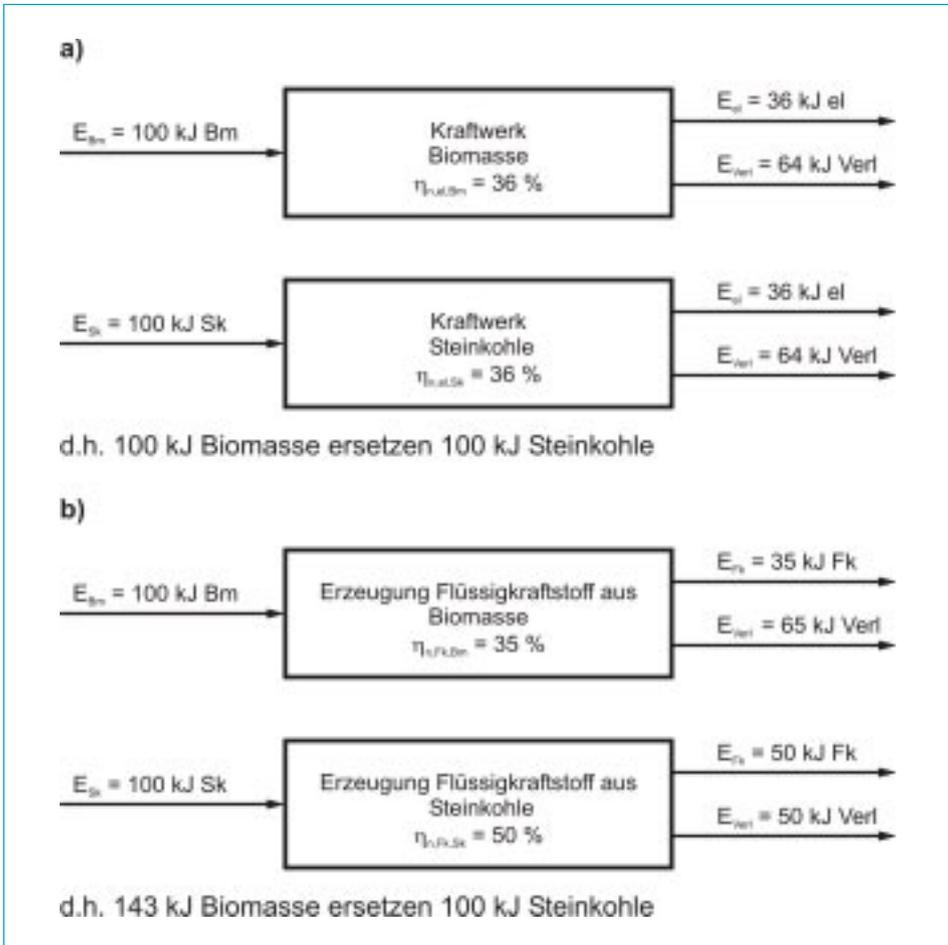


Bild 9: Häufig zu findender Systemvergleich: Systeme bestehend aus  
 a) Kraftwerksprozess mit Biomasse und mit Steinkohle zur Erzeugung von elektrischer Energie und  
 b) Herstellungsprozess mit Biomasse und mit Steinkohle zur Erzeugung von Flüssigkraftstoff

- Bild 10a: Geht man daher von der Nutzung etwa von Steinkohle zur Erzeugung von elektrischem Strom und der Nutzung von Biomasse zur Erzeugung von flüssigem Kraftstoff (Fk) für die motorische Verbrennung aus, und legt diese Situation der beiden Prozesse als Referenzsituation (RS) in einer gemeinsamen Bilanzgrenze A zugrunde – System A als *benchmark* –, ist zu prüfen, ob es daran gemessen ein besseres Ersatzsystem (ES) gibt (*benchmarking*). Ausgegangen wird von  $E_{Sk} = 100 \text{ kJ Steinkohle}$  und  $E_{Bm} = 100 \text{ kJ Biomasse}$ , die über die gemeinsame Systemgrenze A in das System fließen. Hier findet mit den Gesamtwirkungsgraden  $\eta_n$  wie in Bild 9 angegeben die Umwandlung von Steinkohle zu elektrischer Energie  $E_{el}$  und die Umwandlung

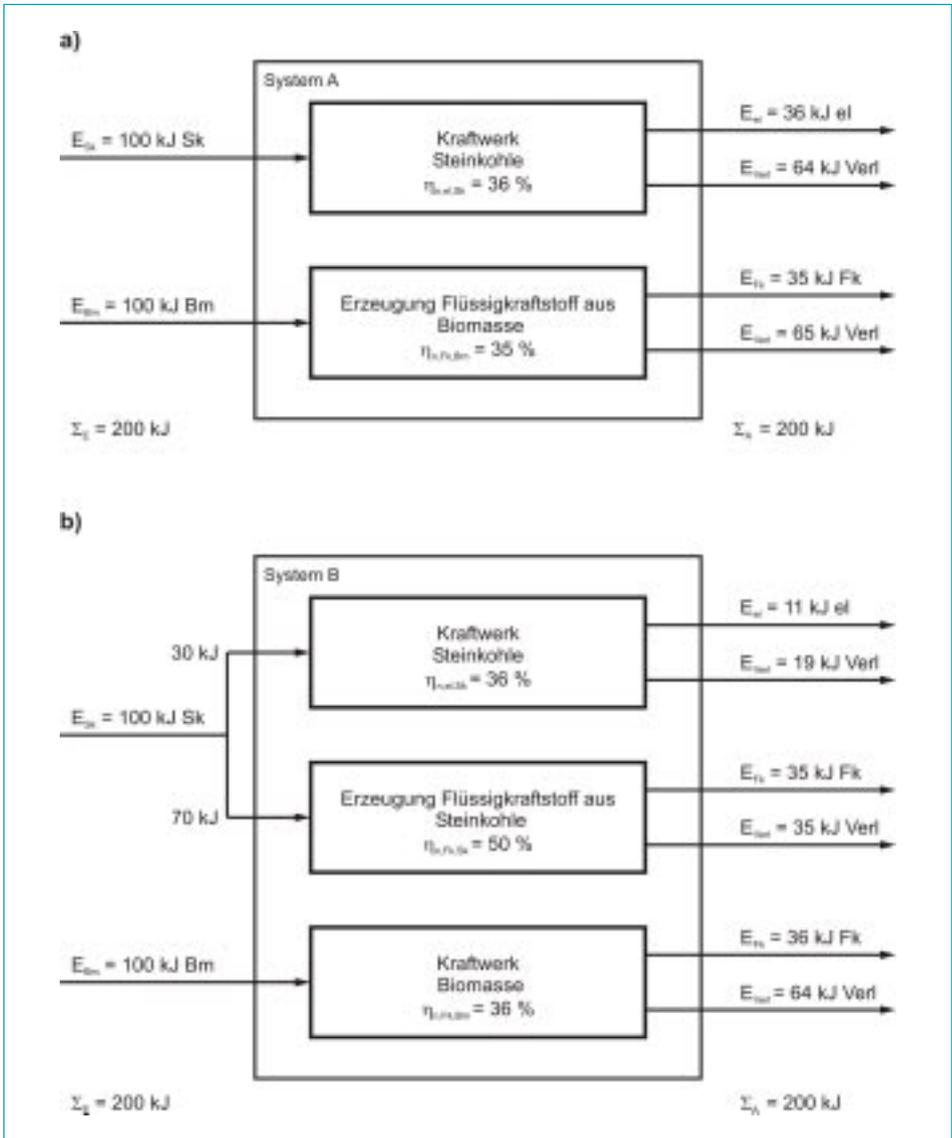


Bild 10: Systemvergleich zur Erzeugung von flüssigem Kraftstoff und elektrischer Energie aus Biomasse und Steinkohle auf Basis gleichen Aufwandes

von Biomasse zu flüssigem Kraftstoff  $E_{FK}$  statt. Die Bilanzgrenze verlassen also als Nutzen  $E_{el} = 36 \text{ kJ}$  elektrisch und  $E_{FK} = 35 \text{ kJ}$  als Energie des flüssigen Kraftstoffs. Der Rest ist jeweils Verlust. Es sei nochmals betont, dass es sich hier nicht um detaillierte Bilanzierungen, sondern um die Darlegung prinzipiellen, bekannten, methodischen Vorgehens handelt, weshalb hier der Übersichtlichkeit wegen nur auf energetische Aspekte und hierbei wiederum nur auf die unbedingt benötigten Ströme, Mengen usw. eingegangen wird.

- Bild 10b: Schlägt man nun vor, bei einer Ersatzsituation – Bilanzkreis B – wiederum  $E_{Sk} = 100$  kJ Steinkohle und  $E_{Bm} = 100$  kJ Biomasse zuzuführen, jedoch nun die Steinkohle zu 70 % zu flüssigem Brennstoff zu verarbeiten und zu 30 % in elektrischen Strom umzuwandeln, erhält man die Verhältnisse des Bilds 10b. Man erkennt, dass man nunmehr einen höheren Nutzen erhält als bei der Referenzsituation, nämlich  $E_{Fk} = 35$  kJ Flüssigkraftstoff sowie  $E_{el} = (11 + 36)$  kJ = 47 kJ elektrisch. Dies liegt natürlich an dem angenommenen besseren Umwandlungswirkungsgrad bei Kohle zu flüssigem Kraftstoff im Vergleich zu der Erzeugung von flüssigem Kraftstoff aus Biomasse.

Benötigt man für ein System – z.B. für eine ganze Region, eine Volkswirtschaft usw. – elektrische Energie und Energie in Form von flüssigem Kraftstoff im Verhältnis wie in Bild 10a angenommen, kann man nun von der Einsatzsituation in Bild 10b ausgehen und fragen, welche Mengen an gleichen Einsatzbrennstoffen erforderlich sind, um den gleichen Nutzen wie bei der Referenzsituation zu erhalten. Das Ergebnis ist, obwohl aus Bild 10b bereits unmittelbar erkennbar, in Bild 11 nochmals deutlich hervorgehoben:

- Man sieht, dass man auf die Umwandlung von  $E_{Sk} = 30$  kJ Steinkohle verzichten kann, so dass von der insgesamt zuvor vorhandenen Energie in Form von  $E_{Sk} = 100$  kJ Steinkohle nur noch  $E_{Sk} = 70$  kJ Steinkohle zur Umwandlung in flüssigen Kraftstoff vorzusehen sind.

Geht man also von dem Bedarf an elektrischer Energie und flüssigem Kraftstoff bei der Referenzsituation aus, so kann man aus Bild 11 durch eine *Rückwärtsbetrachtung* ermitteln, dass man bei der Ersatzsituation 30 % fossile Energie einspart, wenn man die Biomasse in elektrische Energie statt in flüssigen Brennstoff umwandelt. Dies hat also nicht nur die Verlängerung der fossilen Vorräte – Ressourcenschonung –, sondern auch eine im Vergleich zur Referenzsituation erhöhte Emissionsminderung an fossilem  $\text{CO}_2$  zur Folge.

Hieraus sind zwei wesentliche Schlüsse zu ziehen, die **gerade nicht** gegen die Entwicklung von flüssigem Kraftstoff aus Biomasse sprechen:

1. Selbstverständlich spart Biomasse fossile Ressourcen gemäß der Referenzsituation ein und mindert die fossilen  $\text{CO}_2$ -Emissionen. Würde man die Erzeugung des benötigten flüssigen Brennstoffes in der Referenzsituation nicht durch Biomasse sondern auch durch Steinkohle bewerkstelligen müssen, läge die Auswirkung sofort auf der Hand.
2. Entscheidendes Argument ist, dass es nicht (Bild 11) – wie häufig argumentiert wird – egal ist, mit welchem Wirkungsgrad Biomasse in flüssigen Brennstoff (Ersatzbrennstoff für fossilen Brennstoff) umgewandelt wird, weil ja Biomasse *unerschöpflich* nachwächst. Solange man z.B. Steinkohle benötigt und aus ihr mit einer höheren Umwandlungsrate flüssigen Brennstoff herstellen kann – im Vergleich zu Biomasse, Restmüll usw. – solange ist es aus energetischer Sicht besser, die Biomasse zu verbrennen, um elektrischen Strom zu erzeugen als zu flüssigem Brennstoff zu verarbeiten. Damit wird, wie im Beispiel gezeigt,  $\text{CO}_2$  in entsprechendem Maße eingespart, weshalb – aus dieser Sicht – der Einsatz von Biomasse **nicht**  $\text{CO}_2$ -neutral ist. Die Forderung muss sein, die Biomasse so effektiv wie irgend möglich einzusetzen,

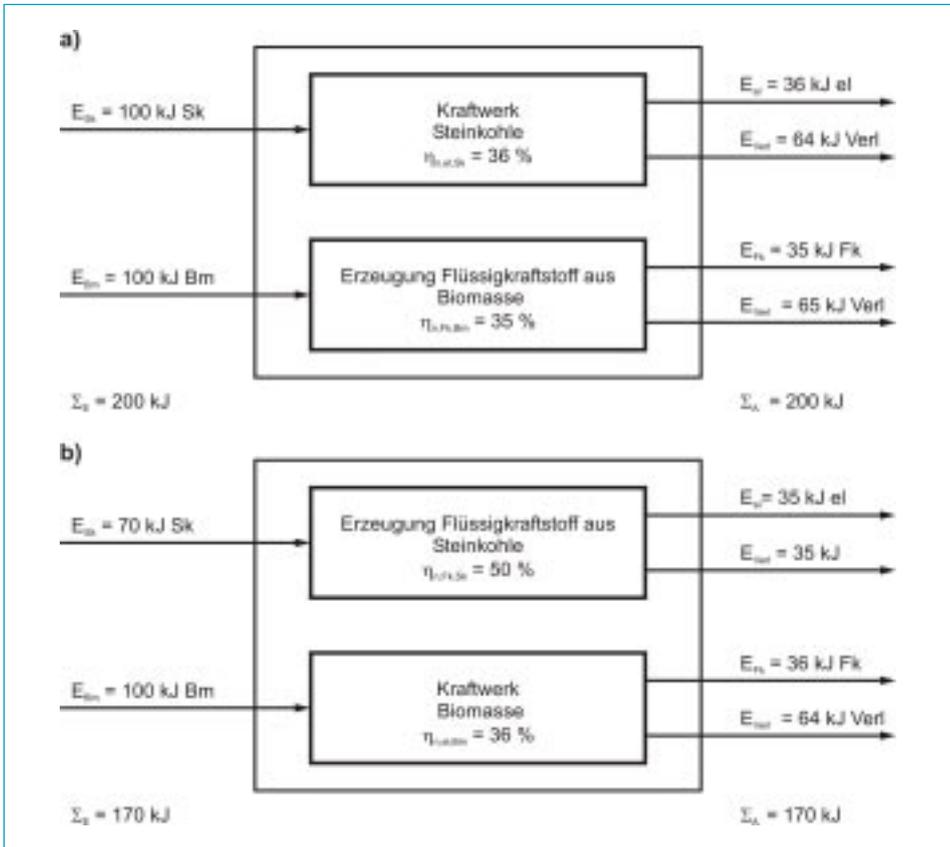


Bild 11: Systemvergleich zur Erzeugung von flüssigem Kraftstoff und elektrischer Energie aus Biomasse und Steinkohle auf Basis gleichen Nutzens

um die fossilen  $\text{CO}_2$ -Emissionen soweit wie möglich zu senken. Dies heißt nun gerade nicht, die Entwicklung für die Erzeugung flüssiger Brennstoffe aus Biomasse einzustellen. Im Gegenteil, da die Umwandlung von Biomasse noch nicht effektiv genug ist, ist noch mehr Forschungs- und Entwicklungstätigkeit erforderlich. Es muss das Ziel bei der Umwandlung von Biomasse in flüssigen Brennstoff sein, an die Höhe der Effizienz der Umwandlungsmöglichkeiten bei fossilen Brennstoffen heranzureichen. D.h. der Maßstab – *benchmark* – muss für die Biomasse der Entwicklungsstand bei fossilen Brennstoffen sein. Erst wenn dieser Maßstab – *benchmark* – erreicht ist, macht eine flächendeckende Industrieproduktion von flüssigem Brennstoff aus Biomasse Sinn, zumindest was das technische Wirtschaften mit Energie bei der Versorgung ganzer Regionen – Volkswirtschaft – betrifft.<sup>10</sup>

<sup>10</sup> Sollte es nicht möglich sein, diesen Maßstab zu erreichen, weil grundsätzlich physikalische, chemische und thermodynamische Gründe dagegen sprechen, müsste der Vergleich an einer mit den vorgenannten Restriktionen begründeten maximal erreichbaren Entwicklungshöhe gemessen werden, um die Ausschöpfung von Potentialen darzulegen. Schließlich wird die Notwendigkeit der Nutzung von Biomasse zur Substitution von fossiler Energie nicht in Frage gestellt. Ziel muss sein, auch mit regenerativer Energie möglichst effizient umzugehen (vergleiche Fußnote 3).

Das vorgenannte Beispiel soll nur schlaglichtartig an einem Zahlenbeispiel die Verhältnisse verdeutlichen. Selbstverständlich sind die gesamten Verfahrensketten sorgfältig bis zum Ursprung zurück und bis zu Problemen bei der Entsorgung nebeneinander zu stellen. Auch kann man die Verhältnisse in funktionellen Abhängigkeiten von Haupteinflussgrößen usw. darstellen (vergleiche Beispiel in Kapitel 2.1. und Bild 2 bis Bild 5). An dieser Stelle sollen nur noch einmal bekannte Gesichtspunkte und bekannte Methoden dargestellt werden, wie sie bei der heutigen Diskussion um die Einführung regenerativer Energie häufig nicht berücksichtigt werden.

Wenn bei einem detaillierten Vergleich der fossil und regenerativ betriebenen Verfahrensketten letztere besser abschneiden sollten, so ist das kein Widerspruch zu dem vorangegangenen gewählten Beispiel sondern als Ergebnis eben der Hinweis, mit dem gewählten Ersatz der Biomasse *richtig* gehandelt zu haben.

## *Kap. 2.5.*

### **Bewertung der Bereitstellung von fossilen Brennstoffen**

In Anlehnung an das vorangegangene Beispiel (Kapitel 2.4.) wird im Folgenden auch wieder auf einen im Grundsatz bekannten Sachverhalt hingewiesen, der bei Vergleichen verschiedener Kraftwerkskonzepte mit unterschiedlichen Brennstoffen häufig vernachlässigt wird.

Bei der Angabe von Kraftwerkswirkungsgraden wird in der Regel der Anlagenwirkungsgrad  $\eta_a$  genannt. Werden die für den Betrieb des Kraftwerkes erforderlichen Zusatzenergien einschließlich der für deren Bereitstellung erforderlichen Primärenergieträgerressourcen in die Ermittlung der Energieeffizienz mit eingeschlossen<sup>11</sup>, ergibt sich ein Nettonutzen und damit der Nettoprimarywirkungsgrad  $\eta_n$  (siehe Bild 12 für Steinkohle, Bilanzkreis A und in Bild 13 für Erdgas Bilanzkreis A). Für die Bereitstellung – Exploration und Aufbereitung – des Brennstoffes sind jedoch auch Aufwendungen zu berücksichtigen, die durch einen eigenen Bilanzkreis B in Bild 12 und Bild 13 darzustellen sind. Beide Bilanzkreise – Bereitstellung und Kraftwerk – werden zu einem gemeinsamen Bilanzkreis C zusammengefasst. Die Bereitstellung selbst benötigt für sich einen (energetischen) Teil des Brennstoffes und einen Teil elektrischer Energie als chemisch gebundene Brennstoffenergie. Dieser Anteil wird mit dem jeweiligen Umwandlungswirkungsgrad angegeben, mit dem der zugehörige Bereitstellungsprozess bereits berücksichtigt wird. An diesem über alle benötigten Verfahrensbausteine gezogenen Bilanzkreis C wird der Wirkungsgrad allgemein als Nutzen zu Aufwand gebildet. Da in diesen Bilanzkreis C nur noch Brennstoff – Rohkohle (RK) oder Rohgas (RG) – eintritt, wird der so gebildete Wirkungsgrad *Nettoprimärwirkungsgrad*  $\eta_n$  genannt (vergleiche [5, 6]). Dieser Wirkungsgrad ist z.B.

<sup>11</sup> Hierfür werden die erforderlichen Primärenergieressourcen unter Berücksichtigung des Energieaustausch- oder Substitutionsverhältnisses  $f_{sub}$  von dem entstehenden Nutzen des Kraftwerkes (im Wesentlichen elektrische und thermische Energie) abgezogen.

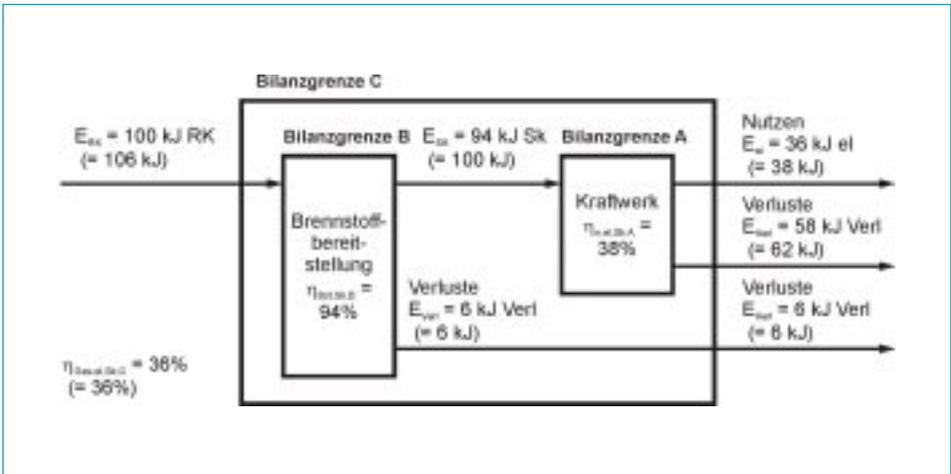


Bild 12: Bewertung der Brennstoffbereitstellung bei Kraftwerken, hier: Kohle

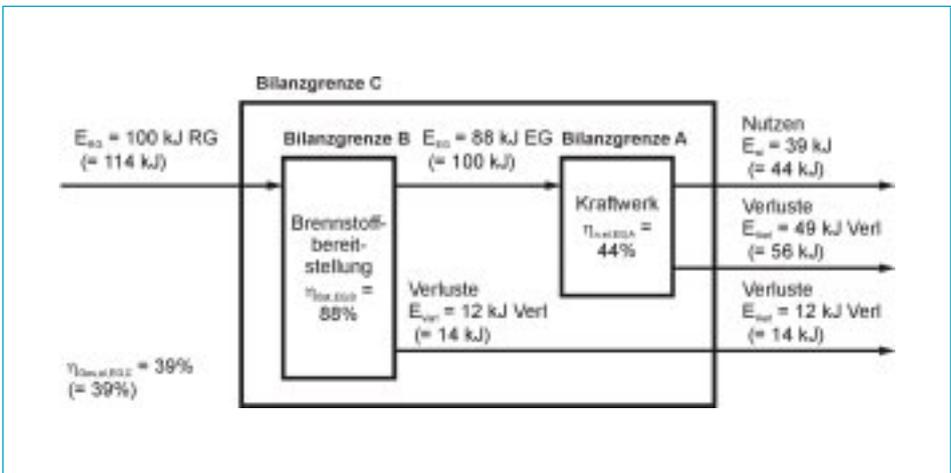


Bild 13: Bewertung der Brennstoffbereitstellung bei Kraftwerken, hier: Erdgas

auch heranzuziehen, wenn man einen Vergleich der Stromerzeugung aus Biomasse einschließlich des Aufwandes für die Gewinnung zu der Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen vornehmen möchte (vergleiche Kapitel 2.4.).

In der Literatur findet man summarische Angaben über den Energiebedarf der Brennstoffbereitstellung in der Form, dass man für alle vor dem Kraftwerk liegenden Aufwendungen einen bestimmten Anteil des Heizwertes veranschlagt. Der verbleibende Rest steht für die energetische Umwandlung in der Kraftwerksanlage zur Verfügung.

Man findet als zu berücksichtigenden Aufwand für die Bereitstellung (Bst)

- von Braunkohle (Bk) 3 bis 4 % von  $h_u$  d.h.  $\eta_{Bst,Bk} \approx 96$  %
- von Steinkohle (Sk) 5 bis 6 % von  $h_u$  d.h.  $\eta_{Bst,Sk} \approx 94$  %
- von Erdgas (EG) 10 bis 14 % von  $h_u$  d.h.  $\eta_{Bst,EG} \approx 88$  %

Mit diesen Angaben lässt sich für eine orientierende Betrachtung ein Nettoprimärwirkungsgrad von

$$\eta_n = \eta_{Bst} \cdot \eta_a$$

- von Steinkohle  $\eta_{n,Sk} \approx 94$  %  $\cdot 0,38 = 36$  %
- von Erdgas  $\eta_{n,EG} \approx 88$  %  $\cdot 0,44 = 39$  %

angeben. Genauere Angaben sind natürlich anhand der jeweiligen Randbedingungen und Gegebenheiten vor Ort zu ermitteln.

In Bild 12 und Bild 13 wird jeweils von  $E_{RK} = 100$  kJ Rohkohle und  $E_{RG} = 100$  kJ Rohgas Energieeinheiten ausgegangen, um den unmittelbaren Vergleich anhand der Ergebnisse – Nutzen – ziehen zu können (Zahlen ohne Klammern). Geht man von jeweils gleichen Energien am Eintritt des Kraftwerkes aus – Steinkohle oder Erdgas – erhält man die in Klammern angegebenen Zahlen. An diesen erkennt man am Eintritt des Bilanzkreises C unmittelbar den Mehraufwand an Primärenergieressourcen im Vergleich zu den Ressourcen, die in das Kraftwerk gelangen.

*Kap. 3.*

## Zusammenfassung

Voraussetzung für die vergleichende Bewertung technischer Konzepte (*Benchmarking*) ist die Festlegung eines Bewertungsmaßstabes (*benchmark*), der definiert werden muss. Die zu vergleichenden Konzepte, d.h. das Referenzkonzept und das damit zu vergleichende veränderte Konzept – hier als Ersatzkonzept bezeichnet –, müssen jeweils gleiche Randbedingungen, d.h. gleichen Aufwand haben. Gleicher Aufwand heißt, dass von der jeweils gleichen Menge und Art der in das jeweilige System eintretenden Stoffe ausgegangen wird. Erst bei einer solchen einheitlichen Basis ist die für eine tragfähige Bewertung bzw. für einen tragfähigen Vergleich erforderliche funktionale Äquivalenz der Konzepte gegeben. Um gleiche Randbedingungen zu erhalten, ist es oftmals erforderlich, die jeweils betrachteten Prozesse um zusätzliche Teilprozesse (z.B. Brennstoffaufbereitung, Reststoffnachbehandlung, zusätzliche Energieumwandlungsprozesse usw.) zu erweitern. Erst dann ist eine Bilanzierung und Bewertung möglich. In

dem vorliegenden Beitrag wird das methodische Vorgehen dargestellt und anhand von Beispielen anhand des Einsatzes von Ersatzbrennstoff in der Zementindustrie, anhand des Einsatzes von Restmüll und von daraus hergestellten Ersatzbrennstoffen in Müllverbrennungsanlagen und Industriekraftwerken sowie anhand von Beispielen des Einsatzes von aus Biomasse hergestellten Brennstoffen im Vergleich zum Einsatz fossiler Brennstoffe erläutert.

*Kap. 4.*

## Quellen

- [1] Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft AGFW e.V. (Hrsg.): Arbeitsblatt 308 Zertifizierung von KWK-Anlagen – Ermittlung des KWK-Stromes. AGFW-Regelwerk, November 2002
- [2] Beckmann, M.; Scholz, R.: Energetische Bewertung der Substitution von Brennstoffen durch Ersatzbrennstoffe bei Hochtemperaturprozessen zur Stoffbehandlung. Teil 1: ZKG International 52 (1999) Nr. 6, S. 287-303. Teil 2: ZKG International 52 (1999) Nr. 8, S. 411-419
- [3] Hauk, R. et al.: ConTherm – Thermische Abfallverwertung im Kraftwerk durch kraftwerksintegrierte Pyrolyse von heizwertreichen Ersatzbrennstoffen. In: VGB PowerTech (2004), Nr. 7, S. 66-71
- [4] Schmidt, R.: Restmüll-Pyrolyseanlage Burgau. Informationsbroschüre zu der Pyrolyseanlage
- [5] Scholz, R.; Beckmann, M.; Harnaut, T.; Horeni, M.: Zur systematischen Bewertung der Energieumwandlung bei der thermischen Abfallbehandlung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 1. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2004, S. 203-235
- [6] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren – Verbrennung, Vergasung, Pyrolyse, Verfahrens- und Anlagenkonzepte. B.G. Teubner-Reihe Umwelt, 1. Auflage, 2001
- [7] Schulz, W.; Hauk, R.: Kombination einer Pyrolyseanlage mit einer Steinkohlenkraftwerksfeuerung (ConTherm-Anlage). 11. DVV-Kolloquium *Stoffliche und thermische Verwertung von Abfällen in industriellen Hochtemperaturprozessen* am 23.09.1998 in Braunschweig
- [8] Thomé-Kozmiensky, K. J.: Vorschaltanlagen für die Abfallverbrennung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe 5 – Herstellung und Verwertung. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2005, S. 509

## VDI-Richtlinien

- [9] Richtlinie VDI 3460: Energieumwandlung bei der thermischen Abfallbehandlung – Blatt 2 Emissionsminderung. Beuth-Verlag GmbH Berlin, im Entwurf
- [10] Richtlinie VDI 4660 Blatt 2: Ermittlung zielenergiebezogener Emissionen bei der Energieumwandlung. Beuth-Verlag GmbH Berlin, Mai 2003
- [11] Richtlinie VDI 4661: Energiekenngrößen – Definitionen – Begriffe – Methodik. Beuth-Verlag GmbH Berlin, September 2003

*Kap. 5.*

## Symbolverzeichnis

### Symbole

$\Delta$	Delta, Differenz
$\eta$	Wirkungsgrad
$\vartheta$	Temperatur
$\Sigma$	Summe
AF	Abfall
Bm	Biomasse
e	spezifische Energie (-bedarf)
EG	Erdgas
el	elektrisch, elektrische Energie
EBS	Ersatzbrennstoff
ES	Ersatzsituation 1-3
f	(Substitutions-) Verhältnis
Fk	Flüssigkraftstoff
h	spezifische Enthalpie
IKW	Industriekraftwerk
Kl	Klinker
KW	Kraftwerk
MBA	mechanisch-biologische Aufbereitungsanlage
MVA	Müllverbrennungsanlage
RG	Rohgas
RK	Rohkohle
RM	Restmüll
RMR	Restmüllrest
RS	Referenzsituation
Sk	Steinkohle
th	thermisch
Verl	Verlust
Z	Nutzenergieverhältnis

### Indizes tiefgestellt

A,B,C	Bilanzkreis (bei der Bewertung der Brennstoffbereitstellung)
A	Austritt (am Bilanzkreis), Anlage (-nwirkungsgrad)
AF	Abfall
An	Anfang (-sabfallheizwert)

Bm	Biomasse
Bst	Bereitstellung
Bz	Bilanz (-temperatur)
e	spezifische Energie (-bedarf)
E	Eintritt (am Bilanzkreis)
EG	Erdgas
el	elektrisch, elektrische Energie
ES	Ersatzsituation
Fk	Flüssigkraftstoff
Ges	Gesamt
KW	Kraftwerk
L	Luft
MBA	mechanisch-biologische Aufbereitungsanlage
n	Netto (-primärwirkungsgrad)
Pyr	Pyrolyse
RBS	Regelbrennstoff
RG	Rohgas
RK	Rohkohle
RM	Restmüll
RS	Referenzsituation
Sk	Steinkohle
sub	Substitution
u	unterer (Heizwert)
Verl	Verlust