

Thermische Rückstandsbehandlungsverfahren – Aufteilung in Bausteine und Möglichkeiten der Bilanzierung

Die Autoren führen eine Vielzahl unterschiedlicher derzeit in Diskussion stehender Verfahren zur thermischen Behandlung von Rückständen auf wenige Verfahrensbausteine zurück und schaffen so eine Voraussetzung, die Verfahren nach gleichen Gesichtspunkten zu bilanzieren. Damit wird über die Bildung von einheitlichen Wirkungs- und Aufwandsgraden eine Bewertung möglich, ob es sich bei dem jeweils betrachteten Verfahren z.B. um eine thermische Verwertung oder „nur“ um eine thermische Entsorgung handelt. Am Beispiel eines klassischen Sondermüllverbrennungsverfahrens wird die Vorgehensweise auch quantitativ gezeigt.

Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.; Brinker, W.: Thermische Rückstandsbehandlungsverfahren – Aufteilung in Bausteine und Möglichkeiten der Bilanzierung. In: Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK) 46 (1994), Nr. 11/12, S. 469-482

Für die thermische Behandlung von Rückständen (Restmüll aus Hausmüll, Rückstände nach mechanisch biologischer Müllvorbehandlung, Rückstände aus Produktionsverfahren usw.) werden eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren, die auf bekannte Verfahrensbausteine wie z.B. Pyrolyse, Vergasung und Verbrennung zurückgreifen, in Betracht gezogen. Dabei herrschen häufig große Unterschiede in der Bewertung.

- In dem vorliegenden Beitrag wird zunächst dargestellt, wie unterschiedliche thermische Behandlungsverfahren auf wenige Verfahrensbausteine und deren Kopplung zurückzuführen sind. Die innerhalb dieser Bausteine ablaufenden Vorgänge lassen sich mit unterschiedlichen Apparaten durchführen. Daher sollten die Begriffe für Apparate und Verfahren entsprechend differenziert verwendet werden.
- Aufgrund der Aufteilung der Verfahren in verschiedene Bausteine lassen sich dann einheitliche, für Vergleiche geeignete Bilanzgrenzen ziehen. Stehen wie hier die eigentlichen thermischen Behandlungsschritte im Vordergrund, so ist es zweckmäßig, zunächst einen inneren Bilanzkreis für das sogenannte „thermische Hauptverfahren“ festzulegen und in einem zweiten Schritt diesen auf den Bilanzkreis des „Gesamtverfahrens“ (einschließlich Abgasbehandlung, Nutzung erzeugter Gase usw.) zu erweitern. Diese Vorgehensweise wird anhand einiger Verfahren gezeigt.
- Nach Festlegung der Bilanzgrenzen können als Voraussetzung für eine vergleichende Bewertung zunächst Massen-, Stoff- und Energiebilanzen, d.h. sogenannte Sachbilanzen, aufgestellt werden.

- Aus den Sachbilanzen lassen sich erste Bewertungsmaßstäbe bilden wie z.B. die thermischen Wirkungsgrade zu den jeweiligen thermischen Hauptverfahren und zu den Gesamtverfahren. Berücksichtigt man weiter die Primärenergien, die zur Bereitstellung der von außen zusätzlich zuzuführenden Energien und zur Herstellung der benötigten Hilfs- und Betriebsstoffe erforderlich sind, so gelangt man von den thermischen Wirkungsgraden zu den im Vergleich dazu häufig beträchtlich kleineren sogenannten Aufwandsgraden.
- Am Beispiel eines klassischen Verbrennungsverfahrens werden im Zusammenhang mit der Berechnung von Wirkungs- und Aufwandsgraden verschiedene Prozeßführungen (Einsatz von Zusatzbrennstoff, Sauerstoffanreicherung des Reaktionsgases, Senkung des Stöchiometrieverhältnisses (Luftzahl)) diskutiert. Es zeigt sich, daß auch bei sogenannten klassischen Verfahren noch ein erhebliches Entwicklungspotential vorhanden ist. Neben der Entwicklung neuer Verfahren erscheint es deshalb vor diesem Hintergrund wichtig, auch bestehende Verfahren weiter zu entwickeln und vergleichend neuen gegenüberzustellen.
- Die bausteinartige Aufteilung von Verfahren mit vergleichbaren Bilanzgrenzen erleichtert auch die Einteilung in Teilmodelle bei der mathematischen Beschreibung der jeweiligen Verfahrensbausteine und insbesondere deren Kopplung zu einer zusammenfassenden Gesamtbeschreibung.

Solche Gesamtmodelle sind u.a. für Optimierungs- und Projektierungsrechnungen bei variierenden Prozeßführungen erforderlich.

Allgemeines

Der Bereich der thermischen Behandlung von Rückständen gehört zum Fachgebiet der Hochtemperaturprozeßtechnik. Dort werden in sogenannten Industrieöfen, z.B. durch Verbrennung oder Vergasung von fossilen Energieträgern, Stoffe thermisch behandelt. Beispielsweise seien hier das Brennen von Zement in Drehrohren, das Schmelzen von Glas in feuerfesten Wannen, die Erzeugung von Roheisen oder gebranntem Kalk in Schachtofen und das Brennen von Sanitärgeräten in Tunnelöfen genannt. Diese Prozesse laufen in einem Temperaturbereich von ca. 500 °C bis ca. 1700 °C ab.

Die Tabelle 1 soll verdeutlichen, daß es sich bei der thermischen Behandlung wiederum häufig nur um einen letzten Schritt innerhalb eines Gesamtkonzeptes handelt. Die konkret zu ergreifenden Teilschritte hängen sehr stark von der Zusammensetzung und den Eigenschaften der Rückstände ab. Als Mindestziel werden die Entsorgung, darüber hinaus die energetische und falls möglich noch eine stoffliche Nutzung als oberstes Ziel angestrebt. Dabei ist gleichermaßen darauf zu achten, daß der zusätzlich („von außen“) erforderliche Energieaufwand möglichst klein bleibt, daß weiter für die Bereitstellung der zugehörigen Primärenergie nicht unverhältnismäßig hohe Umweltbelastungen entstehen und daß möglichst wenig zusätzliche Stoffe für die zugehörigen Umwandlungsverfahren eingesetzt werden müssen.

Bei den derzeit diskutierten thermischen Behandlungsverfahren stehen teilweise ganz unterschiedliche Zielsetzungen im Vordergrund. So kann beispielsweise ein Verfahren mit einer Vergasungsstufe das Ziel haben, ein Synthesegas zu erzeugen und dieses einer stofflichen Nutzung zuzuführen. Dabei muß jedoch für die Nutzung des erzeugten Synthesegases sowohl ein Bedarf als auch die erforderliche Infrastruktur (z.B. in der chemischen Industrie) vorhanden

Tabelle 1: Einteilung von Behandlungsmöglichkeiten für Rückstände anhand einiger Beispiele

	mechanisch	physikalisch	chemisch	biologisch
kalte Behandlung „niedrige“ Temperatur	Zerlegen Trennen Zerkleinern	Lösen Trocknen Aufsorbieren	Neutralisieren Naßgasfrieren Fällen	anaerob aerob
thermische Behandlung „hohe“ Temperatur	Heißstauben	Heißgasen Luftgasen Schmelzen	Verflüchtigen Vergasen Pyrolysieren Hydrieren	

¹⁾ Prof. Dr.-Ing. *Rüdiger Scholz*, und Dipl.-Ing. *Frank Schulenburg*, Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik der TU Carlsbad, Dipl.-Ing. *Michael Beckmann*, Clarastraße Umwelttechnik-Institut (CUTE), Dr.-Ing. *Werner Brinker*, ehemals EWE AG, Oldenburg, jetzt PreussisElektra, Hannover

sein. Wird kein Synthesegas, sondern ein Prozeßdampf für bestimmte Herstellungsverfahren benötigt (z.B. in der Papierindustrie), so kann auch ein Verfahren mit Dampferzeugung in den Bereich der stofflichen Nutzung eingeordnet werden. Häufig erscheint es sinnvoll, die Bereitstellung hochwertiger Energie (z.B. elektrischer) in den Vordergrund zu stellen. In solchen Fällen sehen die jeweiligen Verfahren vor, erzeugten Dampf über eine Turbine, Synthesegas über eine zusätzliche Verbrennung (z.B. in einem Gasmotor) usw. in elektrischen Strom umzuwandeln. Bei einer Verfahrensauswahl sind somit zunächst standortspezifische Fragestellungen zu beantworten. Weiter müssen für einen Vergleich neben den erforderlichen Sachbilanzen selbstverständlich auch Stand der Technik, Eingriffsmöglichkeiten zur Prozeßsteuerung, Entwicklungsbedarf und -potential, Betriebsverfahren, Betriebssicherheit, Verfügbarkeit, Flexibilität, Emissionskonzentrationen und -frachten, Verteilung von Schadstoffen, Verwertungsmöglichkeiten von Produkten, Investitionskosten und Betriebskosten usw. betrachtet werden.

Häufig wird darüber hinaus die Forderung erhoben, als Bewertungsmaßstab für jedes Verfahren eine „Ökobilanz“ zu erstellen. Dies scheidet aber bereits im Ansatz, weil die Anforderungen an eine Ökobilanz zu einem großen Teil nur verbal und nicht konkret mit Anweisungen zu einem technischen Vorgehen bei der Erstellung formuliert werden können. So können z.B. die Fragestellungen zu Wirkungsbilanzen, die die möglichen Auswirkungen auf die Umwelt in globalen, regionalen oder lokalen Räumen beschreiben sollen, oder Fragestellungen der Gewichtung der unterschiedlichen Umweltauswirkungen (Technikfolgeabschätzung) derzeit kaum oder nur sehr schwer beantwortet werden.

Als Voraussetzungen für geforderte umfassende Bewertungen sind in jedem Fall nacheinander

- zunächst eine systematische Darstellung der Verfahren mit Hilfe von Bausteinen (vereinfachten Blockfließbildern) und
- das Festlegen einheitlicher Bilanzgrenzen erforderlich. Daran schließt sich die Aufstellung von Sachbilanzen, d.h.:
 - Massenbilanzen,
 - Stoffbilanzen und
 - Energiebilanzen sowie
- die Ermittlung von Wirkungsgraden und Aufwandsgraden an.

Hierauf wird im folgenden näher eingegangen.

Verfahrensbeschreibung und -darstellung

a)

Als erstes ist festzustellen, welche der im folgenden genannten *Haupteinflußgrößen* im Hinblick auf Niveau und Verteilung längs des Reaktionsweges maßgebend sind [1; 2].

- Einsatzstoffe (Input); ist in der Regel vorgegeben und im Hinblick auf die Konsistenz, d.h.

- gasförmig, flüssig, staubförmig oder
- pastös, stückig,
- die Zusammensetzung und das zeitliche Aufkommen zu beschreiben;

- Sauerstoffangebot; mittels des Sauerstoffangebotes lassen sich

Thermolyse (kein Sauerstoffangebot, d.h. bei Wärmezufuhr kann es sich hierbei um Trocknung, Entgasung, Pyrolyse handeln).

- Vergasung (Sauerstoffzufuhr, so daß sich unterstöchiometrische Bedingungen ergeben ($\lambda < 1$)). Trocknungs- und Entgasungsreaktionen seien zu den eigentlichen Vergasungsreaktionen hinzugerechnet) und

Verbrennung (Sauerstoffzufuhr, so daß sich stöchiometrische oder überstöchiometrische Bedingungen ergeben ($\lambda \geq 1$)). Trocknungs-, Entgasungs- und Vergasungsreaktionen seien zu den eigentlichen Verbrennungsreaktionen hinzugerechnet)

unterscheiden;

- Reaktionsgaszufuhr; die Einstellung der Reaktionsbedingungen kann durch Zufuhr von:

Luft,
mit Sauerstoff angereicherter Luft, technisch reinem Sauerstoff, rückgeführten Abgasen, Wasserdampf, Inertgasen usw.

erfolgen;

- Temperatur;
- Verweilzeit;
- Verweilzeitverhalten, d.h. insbesondere der jeweilige Reaktortyp (Vermischungsverhalten von Rührkessel bis Kolbenströmer);
- Zusatzstoffe (Einsatz von Additiven, Inertmaterial für Reaktionsbett, usw.).

Es ist weiter zu betonen, daß nicht nur das jeweilige Niveau der Haupteinflußgrößen, sondern auch deren Verteilung längs des betrachteten Reaktionsweges berücksichtigt werden müssen.

b)

Als nächstes sind mögliche Maßnahmen zur *Steuerung der Haupteinflußgrößen* (Einstellung des Niveaus und der Verteilung) und damit zur Beeinflussung der Prozeßführung zu betrachten. So kann z.B. die Sauerstoffkonzentration durch Luft- und Brennstoffstufung, Abgasrückführung, Sauerstoff- und Inertgaszufuhr, Lastzustand usw. variiert werden. Andere Möglichkeiten zur Beeinflussung der Prozeßführung sind z.B. die Aufteilung in unterschiedliche Reaktortypen, Maßnahmen zur direkten Wärmein- und -auskopplung (z.B. Einmischung von Gasen, Wassereinspeisung usw.) oder indirekten Wärmein- und -auskopplung (Strahlungsrohre, Wärmeüberträger usw.). Je nach Zielstellung und Art des Einsatzstoffes (Rückstandes) können eine Vielzahl von Maßnahmen miteinander kombiniert werden. Dabei ist anzustreben, daß die unterschiedlichen Aufgaben der Reihe nach in hintereinandergeschalteten Reaktoren

„abgearbeitet“ werden (z.B. 3; 4). In einigen Anlagen (insbesondere älterer Bauart) gelingen die verschiedenen Optimierungsaufgaben weniger gut, da zum Bauzeitpunkt die Anforderungen (auch gesetzliche) noch entsprechend gering waren.

c)

Bei der Realisierung des betrachteten Verfahrens sind selbstverständlich die eingesetzten *Apparate* von großer Bedeutung. Einerseits bestimmen die Einsatzstoffe die infrage kommenden Apparate, andererseits legen diese wiederum das mögliche Niveau der Haupteinflußgrößen ebenso wie deren Steuerungsmöglichkeiten längs des Apparateweges zumindest teilweise fest. Entsprechend sind die Apparate im Hinblick auf die gestellten Anforderungen einzuordnen (z.B. 1). Hauptsächlich handelt es sich dabei um:

- **Drehrohr**; z.B. für den Umsatz von festen, pastösen, flüssigen und gasförmigen Einsatzstoffen (einschließlich Gebindebeschickung usw.) in der 1. Stufe bei Sondermüllverbrennungen oder als Thermolysestufe (Pyrolysestufe) für die Hausmüllbehandlung,
- **Rost**; z.B. für den Feststoffumsatz in der 1. Stufe bei Hausmüllverbrennungsanlagen,
- **Etagenofen**; z.B. für den Feststoffumsatz in der 1. Stufe bei der Klärschlammbehandlung,
- **Brennkammer** (Behälterreaktor); z.B. für die Nachverbrennung von Gas und Stäuben in der 2. Stufe von Verbrennungsanlagen, für die Verbrennung von flüssigen Rückständen, für die Hochtemperaturvergasung (Nieder- und Hochdruck) usw.,
- **Wirbelschichtreaktor**; z.B. für den Feststoffumsatz in der 1. Stufe für Klärschlamm oder andere entsprechend aufbereitete staubförmige bis stückige Rückstände mit geeigneter enger Korngrößenverteilung,
- **Durchlauföfen**; z.B. für den Feststoffumsatz in der 1. Stufe bei Prozessen mit extrem langen Verweilzeiten,
- **Schachtofen**
- usw.

An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, daß zwischen den Begriffen „Verfahren“ und „Apparat“ zu unterscheiden ist. So kommt z.B. der Apparat „Drehrohr“ sowohl für einen „Verbrennungsprozeß“ als auch für einen „Pyrolyseprozeß“ in Frage. Der häufig benutzte Begriff „Drehrohrverfahren“ sagt daher über das Verfahren nur sehr wenig aus.

Erstellung von Bilanzgrenzen und vereinfachten Blockfließbildern

Im Hinblick auf eine Vergleichbarkeit der Verfahren müssen, nachdem jeweils der gleiche Rückstand und gleiche Rückstandsmassenströme festgelegt worden sind, sovielle Teilschritte miteinander gekoppelt werden.

- bis die gleiche Zielvorgabe, d.h. z.B. Erzeugung elektrischen Stromes oder

Prozeßdampferzeugung oder Synthesegaszerzeugung usw., erreicht ist

und

- bis die einzelnen austretenden Stoffströme dabei jeweils gleichen Anforderungen genügen (z.B. Eluierbarkeit der Reststoffe, Schadstoffkonzentrationen der Abgase usw.)

und

- bis die einzelnen austretenden Stoffströme jeweils direkt in die Umwelt entlassen bzw. direkt einer stofflichen Nutzung zugeführt werden können.

Dabei erweist es sich als zweckmäßig, in einem ersten Schritt, wie später noch dargestellt, die Bilanzgrenzen zunächst nur für das thermische Hauptverfahren festzulegen (Teilbilanz). In einem zweiten Schritt ist unter gleicher Zielvorgabe (s.o.) und gleicher Vorgabe der Anforderungen an die austretenden Stoffe der Bilanzkreis auf das Gesamtverfahren zu erweitern. Für den Fall einer beabsichtigten Erzeugung von elektrischer Energie, ist

z.B.

- bei einem klassischen Verbrennungsverfahren in den Bilanzraum die Abgasreinigungsanlage, die Turbinenanlage und der Generator usw. mit einzubeziehen.
- bei einem Verfahren mit Synthesegaszerzeugung in den Bilanzraum die zusätzliche Verbrennung z.B. mit einem Gasmotor, die Reinigung der zugehörigen Motorabgase, der Generator usw. mit einzuschließen.

Bei der Erstellung des Blockfließbildes werden innerhalb der Bilanzgrenzen die wichtigsten Bausteine und deren Koppung dargestellt. Dabei sollten schon hier die zusätzlich erforderlichen Ströme (Betriebshilfsstoffe, elektrische Energie) bzw. auch entstehende Ströme (Nutzenergie, Wärmeverlust, Abgasströme, Reststoffe) prinzipiell aufgeführt sein.

Beispielhafte Darstellung von thermischen Behandlungsverfahren

Thermische Hauptverfahren lassen sich zunächst grob, wie folgt, grundsätzlich in zwei thermische Stufen aufteilen [z.B. 2]:

In *Bild 1* ist eine klassische Müllverbrennung als Zuordnung zu dem Verfahrenskonzept A dargestellt. Je nach Konsistenz der eingesetzten Rückstände kann in der ersten Stufe z.B. ein Rostsystem oder ein Drehrohr eingesetzt werden. In der Regel werden für die Hausmüllverbrennung Rostsysteme [z.B. 5; 6; 7] und für die Sondermüllverbrennung Drehrohre [z.B. 8; 9; 10] verwendet. Als Reaktionsgas für die Verbrennungsprozesse wird in vielen Fällen Luft zugeführt. Gegenwärtig werden die Rückstände im Hinblick auf eine Vergleichmäßigung der Verbrennungsbedingungen (noch) nicht vorbehandelt, weshalb u.a. zur Erreichung eines niedrigen Glühverlustes am Ende der ersten Prozeßstufe häufig ein hoher Luftüberschuß erforderlich ist. Bei einem Rostsystem werden die Reststoffe in der Regel als Asche bzw. in angesintertem Zustand und bei einem Drehrohr schmelzflüssig abgezogen. Falls zur Nachbehandlung von Asche oder Schlacke aus Gründen der Vergleichbarkeit weitere Behandlungsstufen erforderlich sind, so müssen diese selbstverständlich in den Bilanzkreis mit aufgenommen werden. Bei dieser Betrachtungsweise können dann auch Verfahren, die eine sogenannte integrierte Reststoffbehandlung vorsehen, mit Verfahren, bei denen eine zusätzliche Nachbehandlung der Reststoffe erforderlich ist, auf einer gleichen Basis bewertet werden. Bei dem Verfahrenskonzept A wird in der Regel zunächst Dampf erzeugt, der, wie in *Bild 1* dargestellt, für eine energetische Nutzung oder aber auch wie bereits erwähnt, als Prozeßdampf einer stofflichen Nutzung zugeführt werden kann. Für ein Verfahrenskonzept nach *Bild 1* wird (s.u.) noch eingehender beispielhaft gezeigt, wie durch variierende Prozeßbedingungen Verbesserungen und Optimierungen zu erzielen sind.

Das Verfahrenskonzept B greift auf die Bausteine Thermolyse und Verbrennung zurück (*Bild 2*) [z.B. 11; 12]. In der Thermolyse wird häufig ein Drehrohr eingesetzt, wobei die Wärmeeinkopplung indirekt erfolgt. Zur Verbesserung der Wärmeübertragungs- und Reaktionsverhältnisse in der Thermolysestufe werden die festen und pastösen Rückstände zunächst einer Aufbereitungsstufe zugeführt. Nach der Thermolyse können je nach Aufbereitungsgrad verschiedene Wertstoffe wie z.B. Metalle, Glas usw. abgetrennt werden. Der verbleibende Pyrolysekoks, einschließlich der teilweise darin noch enthaltenen anorganischen Bestandteile, wird dann zusammen mit dem erzeugten Pyrolyse-

gas einer Verbrennungsstufe (Brennkammersystem) zugeführt. Als Reaktionsgas wird Luft verwendet. Durch die vorgeschaltete Thermolyse und mechanische Aufbereitungsstufe ergibt sich für die Verbrennungsstufe ein homogenisiertes Brennstoff, was einen entsprechend gleichmäßigen Verbrennungsablauf bei nahstöchiometrischen Bedingungen ermöglicht. Die Reststoffe der Nachverbrennungsstufe werden schmelzflüssig abgezogen. Sollte eine Nachbehandlung erforderlich sein, ist diese mit in den Bilanzkreis einzuschließen. Die nach der Verbrennung ausgekoppelte Wärmeenergie wird zum einen Teil für die indirekte Wärmeeinkopplung der Thermolysestufe verwendet und zum anderen für die Dampferzeugung genutzt.

Bei dem Verfahrenskonzept B werden im Unterschied zu dem vorangehend erläuterten Fall, wie im *Bild 3* dargestellt [z.B. 13], eine Aufbereitung des in der ersten Stufe erzeugten Pyrolysegases angeboten. Als Produkte werden dabei gereinigtes Pyrolysegas, Öle, verschiedene Aromate usw. angestrebt. In dem im *Bild 3* dargestellten Beispiel wird ein Teil des Pyrolysegases zur indirekten Beheizung der Thermolysestufe mit Luft verbrannt.

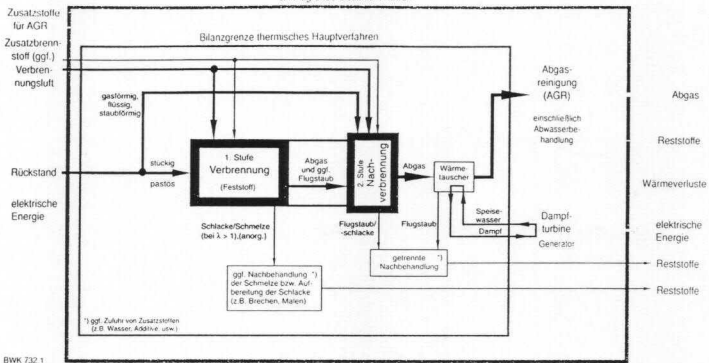
Das Verfahrenskonzept C greift, wie das *Bild 4* zeigt, auf die Grundbausteine Vergasung und Verbrennung zurück. Bei einem Vergasungsprozeß kann ebenso wie bei einem Verbrennungsprozeß ein nahezu vollständiger Ausbrand der Reststoffe am Prozeßende, d.h. ein entsprechend kleiner Glühverlust, erreicht werden. Dabei wird ein Brenngas (Vergasungsgas) erzeugt, das einem eigenständigen Nachverbrennungsprozeß in der zweiten Stufe zugeführt wird. Für stückige Einsatzstoffe wie z.B. Restmüll kann in der Vergasungsstufe ein Rostsystem eingesetzt werden. Diese Art der Prozeßführung ist bislang nicht üblich, wird aber derzeit im Pilotmaßstab untersucht [z.B. 14]. Dabei besteht aufgrund der zahlreichen Eingriffsmöglichkeiten zur Steuerung der Haupteinflußgrößen entlang des Apparates (Rostlänge) ein hohes Entwicklungspotential. Bei einem unabhängig vom Rostprozeß geführten eigenständigen Nachverbrennungsprozeß können dort nahstöchiometrische Bedingungen erreicht werden, was zu entsprechend niedrigen Abgasmassenströmen führt. Bei einer solchen Prozeßführung kann daran gedacht werden, nach dem Rost eine Wertstofftrennung vorzunehmen, wobei gleichzeitig aufgrund der Vergasung auf dem Rost die Vermeidung von Pyrolysekoks angestrebt wird. Sind für die Behandlung des festen Rückstandes sehr hohe Prozeßtemperaturen z.B. im Hinblick auf einen schmelzflüssigen Abzug der Reststoffe gefordert, ist natürlich ein Rost nicht oder nur sehr bedingt einsetzbar. Dann werden in der Vergasungsstufe entsprechend feuerfest ausgekleidete Reaktoren eingesetzt. Abhängig vom Heizwert der zu behandelnden Rückstände wird, wie im *Bild 5* [z.B. 15; 16] beispielhaft dargestellt, dann als Vergasungsmittel Sauerstoff eingesetzt und falls erforderlich, für außerordentlich hoch angestrebte Temperaturen zusätzlich Energie von außen, z.B. über einen Plasma Brenner, eingetragen.

Kurzbezeichnung	1. Stufe	2. Stufe	Verfahren (beispielhafte Darstellungen in Bildern 1 bis 7)
A.	Verbrennung ^(*)	Verbrennung	Verbrennungs-Nachverbrennungs-Verfahren
B.	Thermolyse ^(*)	Verbrennung	Thermolyse-Nachverbrennungs-Verfahren
C.	Vergasung ^(**)	Verbrennung	Vergasungs-Nachverbrennungs-Verfahren
D.	Thermolyse ^(*)	Vergasung	Thermolyse-Nachvergasungs-Verfahren
E.	Vergasung ^(**)	Vergasung	Vergasungs-Nachvergasungs-Verfahren

(*) hier: zusammenfassende Bezeichnung für Trocknungs-, Entgasungs- und Pyrolysevorgänge

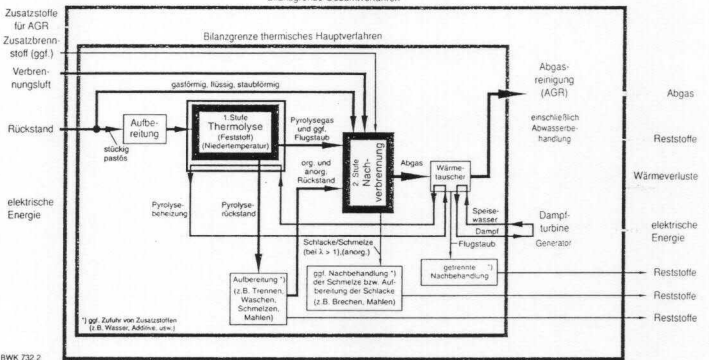
(*) hier: zusammenfassende Bezeichnung für Trocknungs-, Entgasungs- und Vergasungsvorgänge

(**) hier: zusammenfassende Bezeichnung für Trocknungs-, Entgasungs-, Vergasungs- und Verbrennungsvorgänge



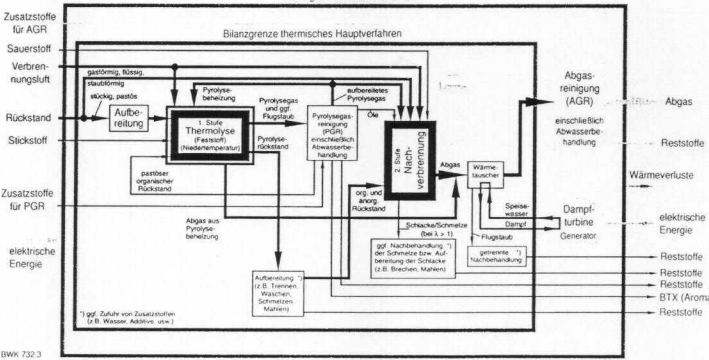
BWK 732.1

Bild 1: **Blacktiebild** für ein **Verbrennungs-Nachverbrennungs-Verfahren**; Beispiel: **Klassische Müllverbrennung**



BWK 732.2

Bild 2: **Blacktiebild** für ein **Thermolyse-Nachverbrennungs-Verfahren**; Beispiel: **Schweiß-Brand-Verfahren nach Siemens KIVU**



BWK 732.3

Bild 3: **Blacktiebild** für ein **Thermolyse-Nachverbrennungs-Verfahren**; Beispiel: **PYROCOM-Verfahren nach BC Berlin-Consult**

Das thermische Hauptverfahren ist in dem Konzept D aus den Bausteinen Thermolyse und Vergasung zusammengesetzt. Falls eine energetische Nutzung des erzeugten Vergasungsgases vorgesehen ist, schließt sich in der Regel ein mit Luft betriebener Verbrennungsprozess, z.B. in einem Gastomotor, an das thermische Hauptverfahren an. Dieser ist dann, zum Zwecke der Vergleichbarkeit, in den Bilanzkreis des Ge-

samtverfahrens mit einzubeziehen, ebenso, falls notwendig, die Reinigung der Motorabgase. Im vorliegenden Beispiel (Bild 6) [z.B. 17] werden die festen Rückstände vor der Thermolysestufe noch einer Aufbereitungsstufe (Vergleichsmäßigkeit des Einsatzstoffdurchsatzes und der Konsistenz des Einsatzstoffes) zugeführt. Der nach der Thermolyse verbleibende Pyrolysekoks wird nach Abscheiden von Wert- und Inert-

stoffen gemahlen und in eine Vergasungsstufe geleitet. Hier werden auch flüssige Rückstände eingebracht. Die Vergasungsstufe wird mit Sauerstoff als Vergasungsmittel betrieben. Aus dieser werden die Reststoffe schmelzflüssig abgezogen. Im Gegensatz zu den Reststoffen aus einer Verbrennung mit oxidierenden Verhältnissen werden die Reststoffe aus einer Vergasung unter reduzierenden Verhältnissen erzeugt.

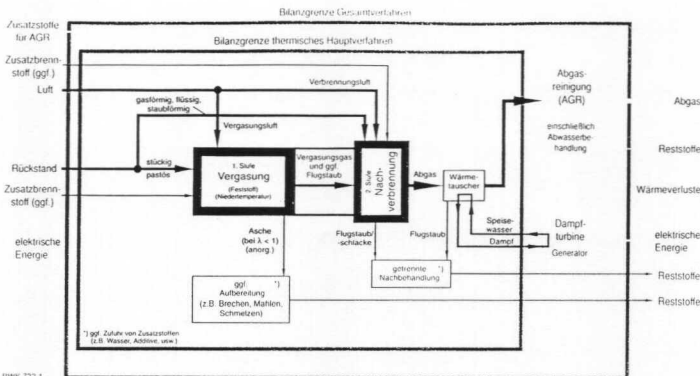


Bild 4: Blockfließbild für ein Vergasungs-Nachverbrennungs-Verfahren

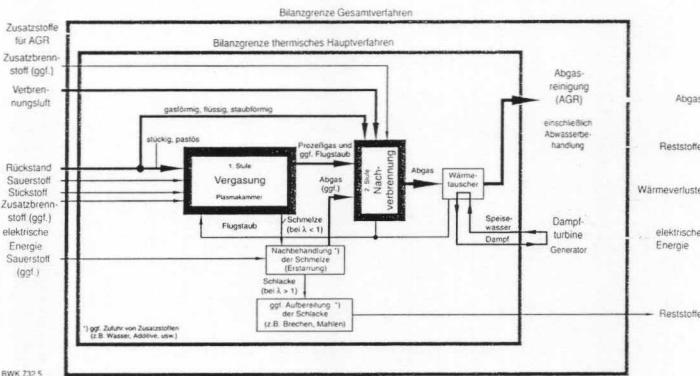


Bild 5: Blockfließbild für ein Vergasungs-Nachverbrennungs-Verfahren; Beispiel: Plasmox-Verfahren nach MGC-Plasma

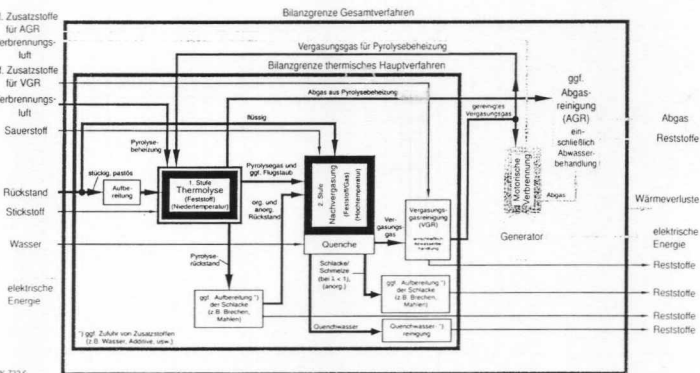


Bild 6: Blockfließbild für ein Thermolyse-Nachvergassungs-Verfahren; Beispiel: Konversionsverfahren nach Noell, Konversionsverfahren nach VEGA DEL

In Bild 7 ist für das Verfahrenskonzept C ein Beispiel angegeben, bei dem die festen Rückstände aus der Thermolysestufe, die hier aus einem Entwicksungskanal besteht, direkt ohne zwischengeschaltete Aufbereitung oder Wertstoffabtrennung in die Vergasungsstufe geleitet werden [z. B. 18].

Das Bild 8 zeigt ein Beispiel [z. B. 19], bei dem auf die Bausteine Pyrolyse, Vergasung und Verbrennung zurückgegrif-

fen wird. In einer thermischen Vorbehandlungsstufe wird der feste Rückstand einem Pyrolyseprozeß auf einem Rost unterzogen. Die Wärmegekoppelung erfolgt dabei direkt durch eine stark unterstöchiometrische Verbrennung der erzeugten Pyrolysegase oberhalb des Feststoffbettes durch Sauerstoffzufuhr. Insgesamt kann der Vorgang als Vergasung bezeichnet werden, wenn man die erzeugten Produkte, die aus Rückstand und

(unterstöchiometrisch) zugeführtem Sauerstoff entstehen, betrachtet. Der nachfolgende Verfahrensablauf ist dann ähnlich wie im Zusammenhang mit dem Konzept A erläutert. Wird, wie im Beispiel (Bild 8) dargestellt, ein schmelzflüssiger Abzug der Reststoffe nach der ersten Verbrennungsstufe angestrebt, so muß in der Regel hier die Verbrennung in einem Drehrohr erfolgen. Es sind somit bei diesem Beispiel die Apparate

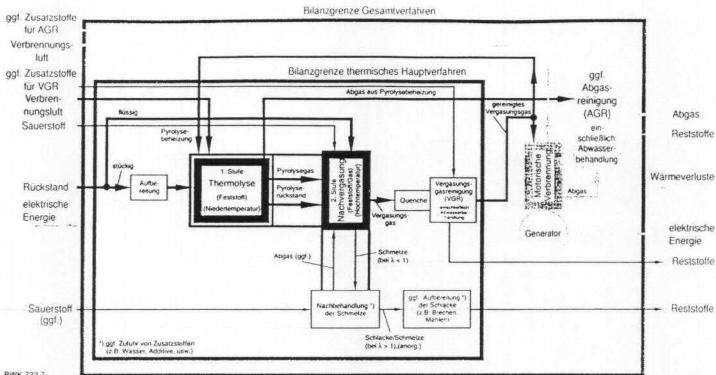


Bild 7: Blockbild für ein Thermolyse-Nachvergasungsverfahren.
Beispiel: Thermoselect-Verfahren nach Thermoselect

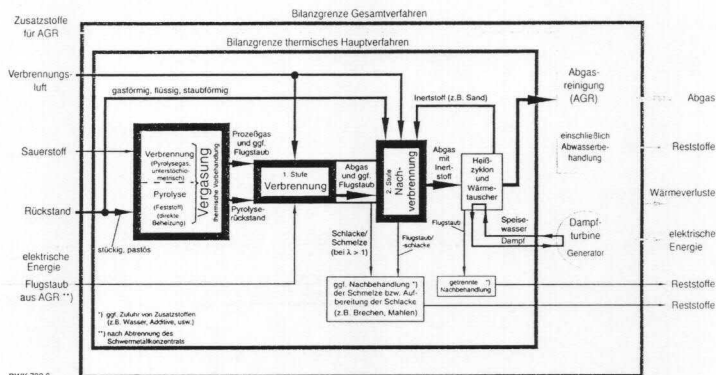


Bild 8: Blockbild für ein Verbrennungs-Nachvergasungsverfahren mit thermischer Vorbehandlung.
Beispiel: Duotherm-Verfahren nach Von Roll

„Rost“, „Drehrohr“ und „Brennkammer“ hintereinandergeschaltet.

Das Beispiel in **Bild 9** [z.B. 20; 21] kann in gleicher Weise, wie voranstehend erläutert, als ein Verfahrenskonzept mit thermischer Vorbehandlungsstufe aufgefaßt werden, wobei letztere hier eine Thermolyse (Pyrolyse in einem Drehrohr) ist. Im Unterschied zu den bisher betrachteten Beispielen, bei denen als Reaktionsgas entweder Luft oder Sauerstoff in bestimmten Prozessstufen zugeführt wird, ist hier bei den Verbrennungsstufen die Zufuhr von technisch reinem Sauerstoff bei gleichzeitiger Rückführung erheblicher Abgasmengen vorgesehen. Bei dieser Art der Verbrennung spricht man daher auch davon, daß innerhalb der Reaktoren vor allem der Stickstoff durch Kohlenstoffdioxid ersetzt wird, wenn man einen Vergleich mit der Verbrennung mittels Luft heranzieht. An den Bilanzgrenzen des Gesamtverfahrens ist deshalb als Reaktionsgas nur Sauerstoff eingetragen. Entsprechend nimmt auch der abgeführte Abgasmassenstrom den Umfang an, der bei einem Verbrennungsprozeß mit reinem Sauerstoff entsteht. Mit der Menge der innerhalb des Verfahrens rückgeführten Abgase kann das Temperaturniveau gesteuert werden. Die Apparate im thermischen Hauptverfahren und z.T. auch in der Abgasreinigungsanlage müs-

sen jedoch von ihrer Größe her die rückgeführten Abgasströme berücksichtigen.

Die Verfahren nach **Bild 8** und **9** können auch als Verfahren nach **A** mit thermischer Vorstufe bezeichnet werden.

Sachbilanzen

Die Aufstellungen von Massen-, Stoff- und Energiebilanzen bedürfen keiner besonderen Erläuterung. Sie seien daher nur der Vollständigkeit halber kurz angesprochen.

Massenbilanzen

Der Begriff der Bilanz beinhaltet zunächst die Gegenüberstellung „der Summe der ein- und austretenden Ströme“ für einen festgelegten Bilanzraum bei identischen Einheiten. Es erweist sich als zweckmäßig, eventuelle Quellen als Zufuhr (eintretend) und Senken als Abfuhr (austretend) an den Bilanzgrenzen aufzuführen [vgl. z.B. 22]. Die Summe eintretender ist dann gleich der Summe austretender Ströme. Es empfiehlt sich weiter, in einem ersten Schritt zunächst nur das sogenannte „thermische Hauptverfahren“ zu bilanzieren. In einem weiteren Schritt wird die Massenbilanz, unter Hinzufügung einer Abgasreinigungsanlage, einer eventuell vorhandenen motorischen Verbrennung mit Generator oder einer Dampfturbine mit Generator

usw. je nach Erfordernis erweitert. Für einen Verbrennungs-Nachvergasungsverfahren mit Erdgas als Zusatzbrennstoff zeigt **Bild 10** beispielhaft eine Massenbilanzierung des thermischen Gesamtverfahrens. Ziel ist eine Dampferzeugung, so daß der Bilanzraum des Gesamtverfahrens „nur“ um die Dampferzeugung und Abgasreinigung zusätzlich zum thermischen Hauptverfahren erweitert ist. Für eine übersichtliche Darstellung sollten die einzelnen Massenströme nummeriert sein und jeder Massenstrom die gleiche Nummer haben wie der zugehörige Energiestrom. Dabei treten aus formalen Gründen auch „Leerströme“ auf. So ist z.B. Nr. 7 ein „Leerstrom“, weil die Nr. 7 in **Bild 13** einen elektrischen Strom (Prozeßgröße, nicht an Masse gebundene Energie) darstellt. Das gleiche gilt auch für Ströme wie Nr. 14 und Nr. 18. Auch hier sind die zugehörigen Energieströme als Wärmeverlustströme in **Bild 13** nicht an Masse gebundene Energie. Diese Formalisierung scheint geboten, um einerseits bei Rechenprogrammen eine übersichtliche Darstellung zu erhalten, aber andererseits auch um Primärenergie- und Primäraufwendungen einfach berücksichtigen zu können. Z.B. könnte so bei einer Kohlenstoffdioxid-Bilanzierung (Stoffbilanzierung ist hier nicht dargestellt) der CO₂-Massenstrom, der bei der

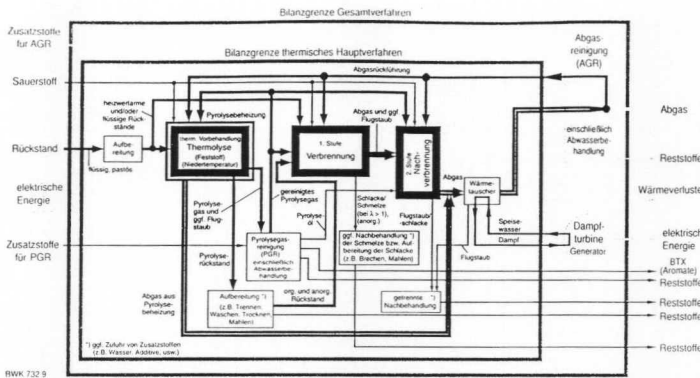


Bild 9: Blockfließbild für ein Verbrennungs-Nachverbrennungs-Verfahren mit thermischer Vorbehandlung; Beispiel: Thermo-Cycling-Verfahren nach SBW Sonderabfallentsorgung Baden-Württemberg und BC Berlin Consult

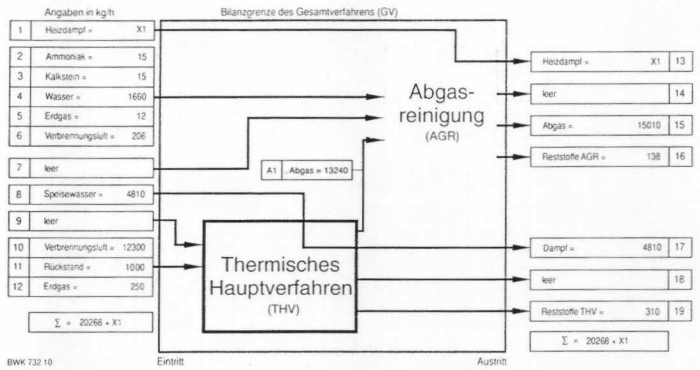


Bild 10: Vereinfachte Massenbilanz für ein Verbrennungs-Nachverbrennungs-Verfahren mit Erdgas als Zusatzbrennstoff (Gesamtverfahren)

elektrischen Stromerzeugung im Kraftwerk entsteht, der Nr. 7 in Bild 10 als Massenstrom zugewiesen werden usw. (vgl. zu diesem Vorgehen auch z.B. [22]). Massen-, Stoff- und Energiebilanzen können so mit identischen Fließbildern bearbeitet werden.

Bei der Massenbilanzierung sind sämtliche Stoffströme wie z.B.

- Zusatzbrennstoffe (Erdgas, Heizöl, usw.),
 - Betriebsstoffe (Sauerstoff, Luft, usw.),
 - Zusatzstoffe (Wasser, Kalkstein, usw.) und
 - Reststoffe (Schlacken, Metalle, usw.) (in Bild 10 zur Vereinfachung nicht näher aufgeschlüsselt)
- zu berücksichtigen.

Insgesamt sollte bei der Bilanzierung erkennbar sein, welche zusätzlichen Massenströme zum eingetragenen Rückstand eintreten, wie sich die Stoffströme innerhalb des Verfahrens aufteilen und welche Stoffströme aus dem Bilanzraum in einzelnen austreten. Die zusätzlich benötigten Stoffströme (z.B. Zusatzbrennstoff, Sauerstoff usw.) bestimmen häufig nicht unerheblich die Größe einer Abgasreinigung, die in die Umwelt entlassenen Schadstofffrachten, die Energiebilanz usw.

Für die Auslegung eines Verfahrens werden nicht nur die Massenströme, sondern auch die Volumenströme herangezogen. Bei Verfahrensvergleichen werden deshalb häufig Abgasvolumina betrachtet. Mit dem Nomogramm in Bild 11 besteht die Möglichkeit, das Abgasvolumenverhältnis v , d.h. das Verhältnis des feuchten Abgasvolumens zum Normzustand bezogen auf den Mindestabgasvolumenstrom im Normzustand für die Verfahrensbausteine Verbrennung ($\lambda \geq 1$) und Vergasung ($\lambda < 1$), zu bestimmen. Der Mindestabgasvolumenstrom ist der trockene Abgasstrom, der sich ergibt, wenn man gedanklich für die Umsetzung reinen Sauerstoff in stöchiometrischem Verhältnis verwendet. Dabei werden die unterschiedlichen Brennstoffe durch sogenannte Brennstoffkenngrößen charakterisiert [23]. Tabelle 2 zeigt für einige Müllfraktionen mit unterschiedlichen Heizwerten die bezeichneten Brennstoffkenngrößen. Für die Aufstellung des Nomogrammes werden zur Vereinfachung die Brennstoffkennwerte ξ und v gleich Null gesetzt (siehe Tabelle 2). Das Abgasvolumenverhältnis ergibt sich für die Verbrennung $\lambda \geq 1$ (linke Seite in Bild 11) und für die Vergasung $\lambda < 1$ (rechte Seite in Bild 11) in Abhängigkeit von unterschiedlichen Stöchiometrieverhältnissen und Sauerstoffkonzentration des Reaktionsgases

als Parameter. Die Ablesemethodik für die Verbrennung und die Vergasung ist jeweils an einem Beispiel dargestellt.

Mit dem Diagramm in Bild 12 besteht die Möglichkeit, das Verhältnis der Abgasvolumenströme einer Verbrennung im Vergleich zu einer Vergasung direkt zu bilden. Als Beispiel sind die Brennstoffkennwerte $\omega = 1,3$ und $\sigma = 1,16$ sowie die Sauerstoffkonzentration des für die Vergasung erforderlichen Reaktionsgases mit $\psi_{O_2, G} = 1,0$ festgelegt (siehe Bild 12). Als Variable dienen das Stöchiometrieverhältnis der Verbrennung und die Sauerstoffkonzentration des Reaktionsgases für die Verbrennung. In dem dargestellten Beispiel ist das Verhältnis $w_1 = 4,1$. Wird das Vergasungsgas zum Zwecke der energetischen Nutzung ebenfalls mit Luft und entsprechenden Stöchiometriezahlen weiter verbrannt, so ergeben sich häufig Abgasvolumenströme, die in der gleichen Größenordnung liegen wie bei der unmittelbaren Verbrennung des Rückstands. Wird beispielsweise in dem vorliegenden Fall ein mit $\lambda_{G,0} = 0,5$ erzeugtes Vergasungsgas mit z.B. $\lambda_{G,0} = 1,2$ weiter verbrannt, so ergibt sich ein Verhältnis des Abgasvolumenstromes aus der unmittelbaren Verbrennung des Rückstands zu dem Abgasvolumenstrom aus der Verbrennung des aus dem Rückstand zuvor erzeugten Vergasungsgases von $w_1 = 1,7$. Es sind in

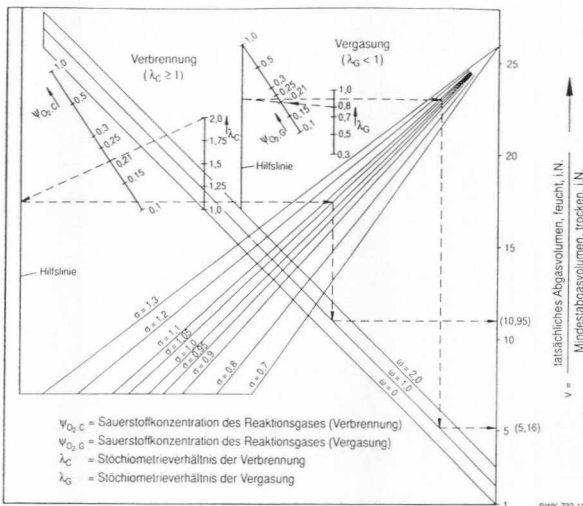


Bild 11: Nomogramm zur näherungsweise Bestimmung des Abgasvolumens bezogen auf ein Mindestabgasvolumen für die Verbrennung und Vergasung bei variablen Stöchiometrieverhältnissen, Sauerstoffkonzentrationen und unterschiedlichen Brennstoffkenngrößen

jedem Fall auch bei der Gegenüberstellung der Abgasvolumina, diese jeweils am Austritt des Gesamtverfahrens zu vergleichen. Das Beispiel soll hier lediglich die Problematik verdeutlichen, bezüglich allgemeiner Beschreibungen sei auf das entsprechende Schrifttum [z.B. 23 bis 26] verwiesen.

Stoffbilanzen

Stoffbilanzen unterscheiden sich von Massenbilanzen dadurch, daß nicht die Massen aller beteiligten Stoffe in Summe betrachtet werden, sondern die einzelner Stoffe, Stoffgruppen oder Elemente (z.B. Bilanz von Kohlenstoffdioxid oder eines bestimmten Schwermetalles usw.) [z.B. 27]. Weiter ist es wichtig zu wissen, wie sich die Mengen eines mit dem Rückstand eingetragenen Stoffes (z.B. eines Schwermetalles) in einem thermischen Behandlungsverfahren

- auf die Asche der ersten Stufe,
- auf die Schlacke der zweiten Stufe,

Tabelle 2: Elementaranalysen und Brennstoffkenngrößen unterschiedlicher Müllfraktionen

	Einheit	Müll A	Müll B	Müll C
Kohlenstoff	[Ma.-%]	20,23	16,29	28,56
Wasserstoff	[Ma.-%]	2,77	2,14	3,88
Sauerstoff	[Ma.-%]	14,24	11,34	19,27
Stickstoff	[Ma.-%]	0,69	0,45	0,50
Chlor	[Ma.-%]	0,51	0,40	0,64
Schwefel	[Ma.-%]	0,12	0,12	0,19
Wasser	[Ma.-%]	32,56	19,49	19,71
Asche	[Ma.-%]	28,88	49,77	27,25
Summe	[Ma.-%]	100,00	100,00	100,00
Heizwert	[kJ/kg]	8456	6746	12018

Brennstoffkenngrößen:

Kenngröße	Einheit	Müll A	Müll B	Müll C
ξ	[kmol SO ₂ /kmol C]	0,0023	0,0027	0,0025
v	[kmol N ₂ /kmol C]	0,0146	0,0119	0,0076
ω	[kmol H ₂ O/kmol C]	1,8946	1,5860	1,2748
σ	[kmol O _{min} /kmol C]	1,1492	1,1335	1,1569

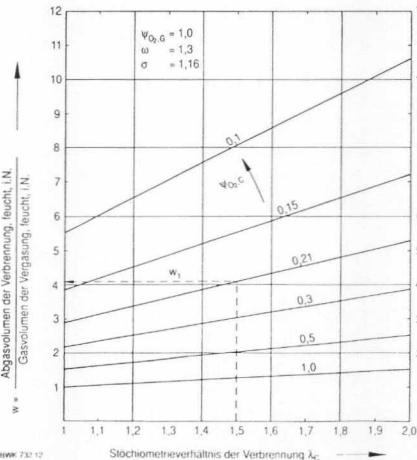


Bild 12: Das Abgasvolumen der Verbrennung bezogen auf das Abgasvolumen der Vergasung in Abhängigkeit von dem Stöchiometrieverhältnis λ_c und von der Sauerstoffkonzentration $\psi_{O_2,C}$ des Reaktionsgases der Verbrennung (Erklärung siehe Text)

Formelverzeichnis

- E Energie
- H Enthalpie
- a Aufwandsgrad
- h spezifische Enthalpie
- m Masse
- v, w Volumenverhältnisse
- ζ Brennstoffkenngröße
- η Wirkungsgrad
- ϑ Temperatur
- λ Stöchiometrieverhältnis
- v, σ Brennstoffkenngrößen
- ψ Konzentration
- ω Brennstoffkenngröße

Indices

- AGR Abgasreinigung
- B Bilanz
- C Verbrennung
- el elektrisch
- G Vergasung
- g gasförmig
- ges gesamt
- GV Gesamtverfahren
- K Kraftwerk
- l flüssig
- Netto Netto
- Nutz Nutz
- O₂ Sauerstoff
- pr primär
- R Rückstand
- s fest
- THV thermisches Hauptverfahren
- th thermisch
- u unterer (Heizwert)

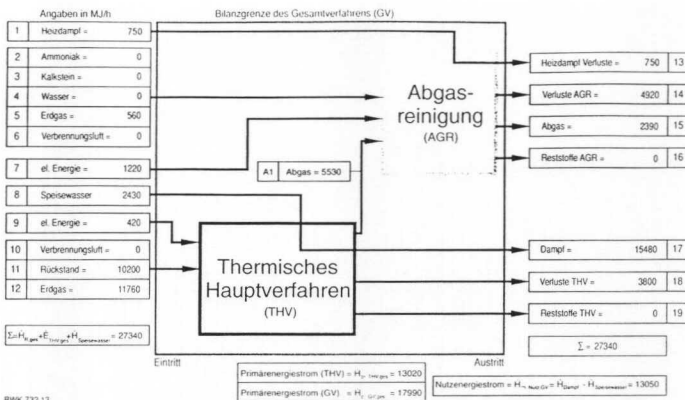


Bild 13: Vereinfachte Energiebilanz für ein Verbrennungs-Nachverbrennungs-Verfahren mit Erdgas als Zusatzbrennstoff (Gesamtverfahren)

- auf die Reststoffe der Abgasreinigung
- auf die den Kamin verlassenden Abgase
- usw.

verteilen. Es sollte z.B. eine Anreicherung an bestimmten Stellen im Prozeß für eine entsprechende Ausschleusung angestrebt werden.

Eine weitere Absicht von Stoffbilanzen ist die Betrachtung der sogenannten Zerstörungseffizienz bei Stoffen, die durch die Prozeßführung beeinflusst werden können (z.B. Dioxine). Dabei interessiert neben dem Verhältnis von aus- zu eingetragenen insbesondere auch die Differenz zwischen ein- und ausgetragenen Frachten.

Energiebilanzen

Im Bild 13 ist für den Bilanzraum nach Bild 10 die Energiebilanz dargestellt. Angelehnt an die Massenbilanz gilt hier eine identische Vorgehensweise. Bei der Bilanzierung sind ebenfalls sämtliche Energieströme,

- die an Masse gebundenen (Enthalpie) wie z.B. Heizwert des Rückstandes Heizwert von Zusatzbrennstoffen (Erdgas, Heizöl usw.) und sensible Enthalpie heißer Ströme (vorgewärmte Luft usw.) (wählt man als Nullpunkt die Umgebungstemperatur, können häufig näherungsweise Enthalpieströme von Verbrennungsluft, Sauerstoff usw. mit dem Wert „Null“ angenommen werden)

und

- die nicht an Masse gebundenen Energien (Prozeßgröße) z.B. elektrischer Strom, Wärmeströme (Verlustwärmeströme, übertragene Nutzwärme) Zusatzenergien (Fremdheizungen usw.)

zu berücksichtigen, so daß erkennbar wird, welcher Aufwand für die gesamte thermische Behandlung des Rückstandes erforderlich ist (Gesamtverfahren), wie sich die Energieströme innerhalb der

Verfahren aufteilen, welche thermische Nutzenergie (hier Dampf) aus den Verfahren ausgekoppelt werden kann und welche Verluste dem gegenüberstehen. Durch die Erweiterung des Bilanzkreises auf das Gesamtverfahren kann der Aufwandsgrad so weit sinken (siehe Beispiel unten), daß das betrachtete Verfahren nicht mehr als thermischer Verwertungssonderer „nur“ noch als thermischer Entsorgungspfad angesehen werden kann.

Zur Ermittlung der benötigten Primärenergien ist eine getrennte Bilanz mit dem gleichen Schema (hier nicht dargestellt) zu erstellen. Die benötigten Primärenergien für die in Bild 13 dargestellten Verhältnisse sind zusammengefaßt als Primärenergistrom für das thermische Hauptverfahren (THV) und das Gesamtverfahren (GV) angegeben.

Wirkungsgrad

Mit Hilfe der Sachbilanzen besteht nun die Möglichkeit, für die einzelnen o.g. Bilanzräume Bewertungskriterien in Form von Wirkungsgraden zu bilden.

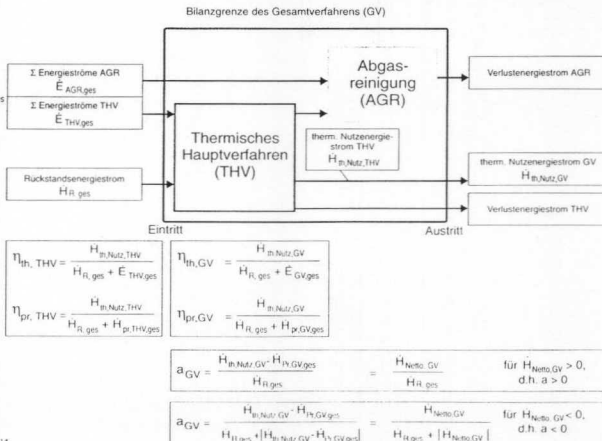
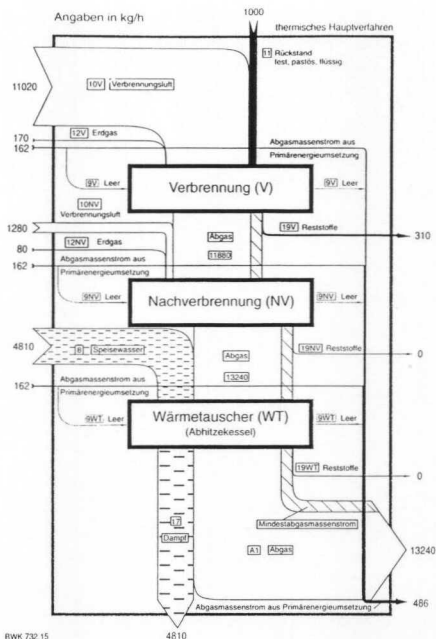
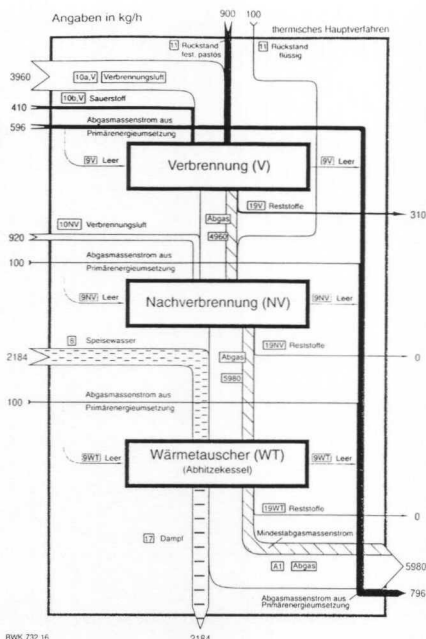


Bild 14: Verschiedene Bewertungsmöglichkeiten für ein thermisches Behandlungsverfahren



BWK 732 15

Bild 15: Massenflußdiagramm für ein Verbrennungs-Nachverbrennungs-Verfahren mit Erdgas als Zusatzbrennstoff (thermisches Hauptverfahren)



BWK 732 16

Bild 16: Massendurchflußdiagramm für ein Verbrennungs-Nachverbrennungs-Verfahren mit Sauerstoffanreicherung (thermisches Hauptverfahren)

Allgemein versteht man unter einem Wirkungsgrad η das Verhältnis

$$\eta = \frac{\text{Erfolg}}{\text{Aufwand}}$$

Je nachdem, was als „Erfolg“ und als „Aufwand“ angesehen wird, ergeben sich für die genannten Bilanzräume ganz unterschiedliche Wirkungsgrade (Bild 14).

Betrachtet man als erstes den Bilanzraum um das thermische Hauptverfahren, so kann als „Erfolg“ der aus dem Abgasstrom ausgekoppelte thermische Nutzenergiestrom, z.B. in Form von hochgespanntem Dampf, gewertet werden. „Aufwand“ sind der mit dem Rückstand zugeführte Energiestrom und die benötigten Zusatzenergieströme zum Betreiben der Anlage. In diesem Fall ist der Wirkungsgrad der thermische Wirkungsgrad für das thermische Hauptverfahren $\eta_{th, THV}$ bzw. für das Gesamtverfahren $\eta_{th, GV}$ (Bild 14).

Zählt man neben den zusätzlich zum Betrieb der Anlage zuzuführenden Energien noch Verlustenergieströme bei der zugehörigen Primärenergieumwandlung (z.B. Verlustströme bei elektrischer Stromerzeugung im Kraftwerk) als Aufwand hinzu, d.h. wertet man die für den Betrieb der Anlage erforderlichen Primärenergieströme insgesamt jeweils als Aufwand, d.h. z.B.:

- Primärenergie für den elektrischen Strom ($H_{pr} = E_{el} \cdot (1/\eta_{K,el})$)

- Primärenergiebedarf für eine eventuelle Sauerstoffzerzeugung,
- Primärenergie zur Erzeugung von anderen Betriebs- und Hilfsstoffen
- usw.,

dann ist in diesem Fall der Wirkungsgrad der sogenannte Primärwirkungsgrad für das thermische Hauptverfahren $\eta_{pr, THV}$ bzw. für das Gesamtverfahren $\eta_{pr, GV}$ (Bild 14).

Wird der thermische Nutzenergiestrom (z.B. hochgespannter Dampf) zur Stromerzeugung genutzt, so ergibt sich aus den thermischen Wirkungsgraden η_{th} und den Primärwirkungsgraden η_{pr} unter Berücksichtigung der Umwandlungsverluste im Kraftwerk der jeweilige elektrische Wirkungsgrad $\eta_{el, th}$ oder $\eta_{el, pr}$.

Aufwandsgrad

Bei der Definition wird gedanklich davon ausgegangen, daß der benötigte Primärenergiestrom letztlich nur aufzuwenden ist, um den Rückstand thermisch zu behandeln. Der wirkliche Erfolg aus dem Gesamtverfahren ergibt sich somit, wenn von dem thermischen Nutzenergiestrom des Gesamtverfahrens noch der benötigte Primärenergiestrom des Gesamtverfahrens abgezogen wird (Bild 14). Ist diese Differenz positiv ($\alpha > 0$; Bild 14), so

erhält man den Aufwandsgrad, wenn man sie auf den Energiestrom, der mit dem Rückstand eingetragen wird, bezieht. Die für den Erfolg zu bildende Differenz kann im Fall eines hohen Primärenergieaufwandes einen negativen Wert annehmen, d.h., daß mehr Energie benötigt wird, als durch den Rückstand in das System eingekoppelt wird. Im Gegensatz zu einem Wirkungsgrad kann der Aufwandsgrad somit negative Werte annehmen. Damit entsteht ein Aufwand, der neben dem Rückstandstrom insgesamt zuzuführen ist. Dieser Aufwand wird daher auch im Nenner (Bezugswert) des Aufwandsgrades berücksichtigt ($\alpha < 0$; Bild 14). Der Aufwandsgrad läßt sich für das thermische Hauptverfahren und das Gesamtverfahren bilden. In Bild 14 ist er nur für das Gesamtverfahren dargestellt.

Mit den hier dargestellten Wirkungs- und Aufwandsgraden wird deutlich, daß je nach Interpretation und Absicht für die Bewertung eines thermischen Behandlungsverfahrens ganz unterschiedliche Größen herangezogen werden können. Es wird damit bei der Diskussion zum Energieeinsatz erklärlich, daß je nachdem, welche Bilanzgrenzen gezogen werden und was als „Erfolg“ und „Aufwand“ zugrunde gelegt wird, bei ein und demselben thermischen Behandlungsverfahren „Wirkungsgrade“ in einer Spanne von z.B. 7% bis 70% genannt werden.

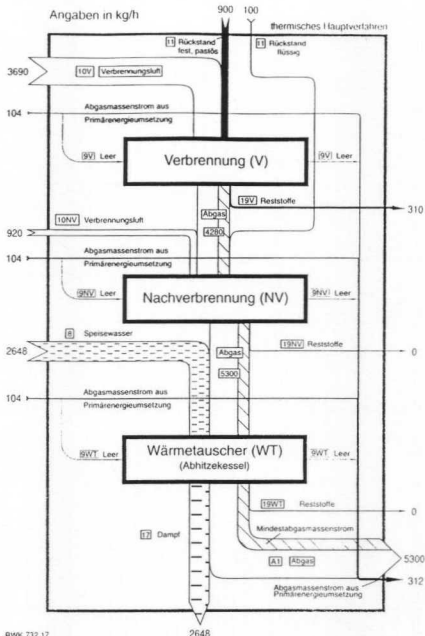


Bild 17: Massenflußdiagramm für ein Verbrennungs-Nachverbrennungs-Verfahren bei kleiner Gesamtluftzahl (thermisches Hauptverfahren)

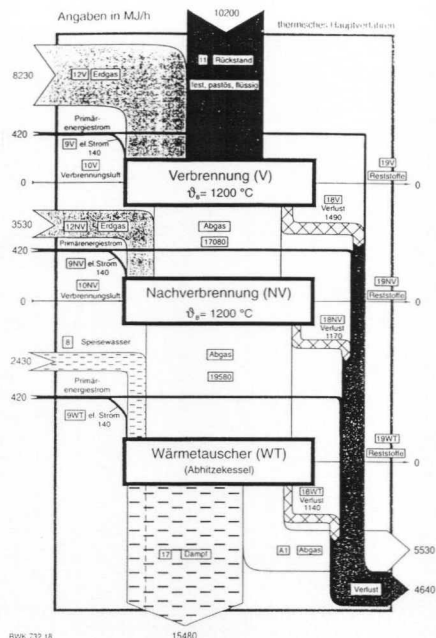


Bild 18: Energielußdiagramm für ein Verbrennungs-Nachverbrennungs-Verfahren mit Erdgas als Zusatzbrennstoff (thermisches Hauptverfahren)

Beispiel für die Bewertung eines thermischen Behandlungsverfahrens anhand von Wirkungs- und Aufwandsgraden

Im weiteren soll anhand eines Beispiels die Aufstellung von Massen- und Energiebilanzen sowie die Bildung von Wirkungs- und Aufwandsgraden dargestellt werden, wobei die Dampferzeugung das Ziel ist. Grundlage für die Betrachtung ist das klassische Verbrennungs-Nachverbrennungs-Verfahren (z.B. Bild 1; jedoch ohne Stromerzeugung).

Für das Beispiel sind die berechneten Werte auf einen Rückstandsmassenstrom von $m_{R,ges} = 1000 \text{ kg/h}$ bezogen ($h_{s,ges} = 10200 \text{ kJ/kg}$). Dieser teilt sich dabei zu 90 Ma-% auf feste und pastöse ($h_{s,1} = 9000 \text{ kJ/kg}$) und zu 10 Ma-% auf flüssige Rückstände ($h_{s,2} = 21000 \text{ kJ/kg}$) auf.

Es werden drei unterschiedliche Prozeßführungen für die thermische Behandlung des Rückstands mit folgenden Randbedingungen gegenübergestellt:

Variante a)

Prozeßführung mit Zusatzbrennstoff (hier: Erdgas). Verbrennung mit Luft (Bilder 15 und 18)

- Aufteilung des Rückstandes: gesamt Rückstand in die 1. Stufe

Massenstrom des Zusatzbrennstoffes ergibt sich aus den folgenden Randbedingungen

- Randbedingung 1. Stufe

$$\vartheta_B = 1200 \text{ }^\circ\text{C}, \quad \lambda_s = 2.0, \quad \lambda_l = 1.3, \quad \lambda_g = 1.2$$

($\lambda_s = 2.0$ für den festen und pastösen Anteil (s) ist eine Vorgabe bei sehr heterogenen Rückständen, bei denen keine Aufbereitung vor der thermischen Behandlung erfolgt; der flüssige Anteil (l) wird mit $\lambda_l = 1.3$, der Zusatzbrennstoff (Erdgas) (g) wird mit $\lambda_g = 1.2$ verbrannt, insgesamt ergibt sich $\lambda_{ges} = 1.8$)

- Randbedingung 2. Stufe

$$\vartheta_B = 1200 \text{ }^\circ\text{C}, \quad \lambda_g = 1.2$$

Variante b)

Prozeßführung ohne Zusatzbrennstoff jedoch mit Sauerstoffanreicherung der Verbrennungsluft (Bilder 16 und 19)

- Aufteilung des Rückstandes:

1. Stufe fest, pastös
2. Stufe flüssig

Sauerstoffanreicherung ergibt sich aus folgenden Randbedingungen

- Randbedingung 1. Stufe

$$\vartheta_B = 1200 \text{ }^\circ\text{C}, \quad \lambda_s = 2.0$$

(zu $\lambda_s = 2.0$ siehe Bemerkung zu Variante a))

- Randbedingung 2. Stufe

$$\vartheta_B = 1200 \text{ }^\circ\text{C}, \quad \lambda_l = 1.3$$

(zu $\lambda_l = 1.3$ siehe Bemerkung zu Variante a))

Variante c)

Prozeßführung ohne Zusatzbrennstoff jedoch mit kleiner Gesamtluftzahl ($\lambda_{ges} = 1.3$). Verbrennung mit Luft (Bild 17 und 20)

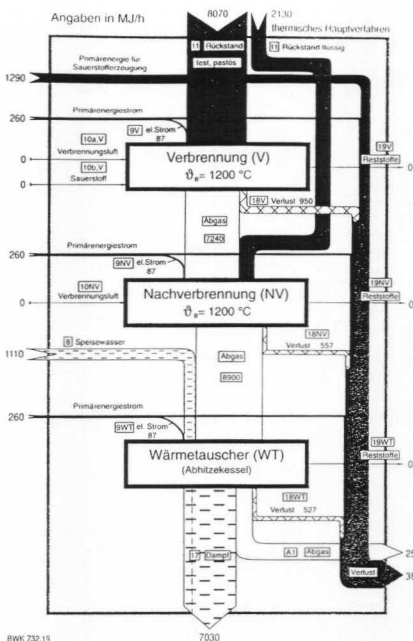
- Aufteilung des Rückstandes:

1. Stufe fest, pastös
2. Stufe flüssig

- Randbedingung 1. Stufe $\lambda_s = 1.3$
- Randbedingung 2. Stufe $\lambda_l = 1.3$

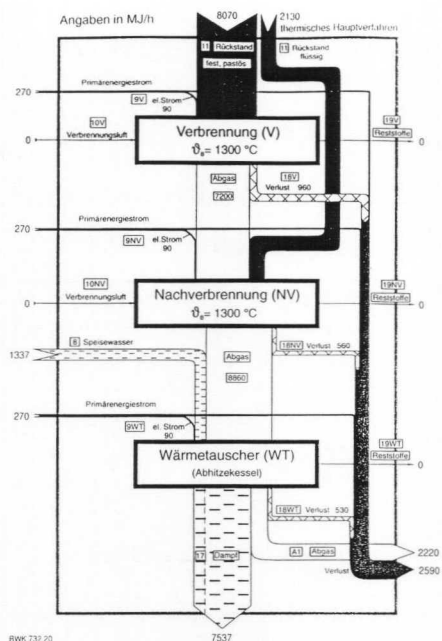
Bei diesem Beispiel wurde eine Stöchiometriezahl (Luftzahl) von $\lambda_{s,ges} = 1.3$ gewählt. Dies erscheint möglich, wenn eine entsprechende Aufbereitung der festen und pastösen Rückstände vor die thermische Behandlung geschaltet wird. Der flüssige Rückstand wird in der Nachverbrennung umgesetzt. In dem vorliegenden Fall ergeben sich Bilanztemperaturen von $\vartheta_B = 1300 \text{ }^\circ\text{C}$. Das Temperaturniveau ist damit noch höher als in den Varianten a) und b) gefordert.

In den Bildern 15, 16 und 17 sind die verschiedenen Prozeßführungen für den Bilanzraum des thermischen Hauptverfahrens in Form von Massenflußdiagrammen vergleicht gegenüberge-



BWK 732.19

Bild 19: Energieflußdiagramm für ein Verbrennungs-Nachverbrennungs-Verfahren mit Sauerstoffanreicherung (thermisches Hauptverfahren)



BWK 732.20

Bild 20: Energieflußdiagramm für ein Verbrennungs-Nachverbrennungs-Verfahren bei kleiner Gesamtluftzahl (thermisches Hauptverfahren)

stellt. In den jeweils dargestellten Abgasmassenströmen ist der Mindestabgasmassenstrom als gedachter Teilstrom eingezeichnet. Er ergibt sich für stöchiometrische Verhältnisse bei Umsatz der brennbaren Anteile mit reinem Sauerstoff. Dieser Mindestabgasmassenstrom ist von Interesse, weil er auch bei kalten (biologischen) Verfahren für Vergleichszwecke herangezogen werden kann. Beispielfhaft sind die bei der Primärenergieumsetzung anfallenden Abgasmassenströme für die elektrische Stromerzeugung im Kraftwerk mit berücksichtigt. Sie sind an den Verfahrensbauweisen vorbeigeführt und am Ende, wie dargestellt, dem austretenden Abgasmassenstrom gedanklich zuzuführen. Das gleiche gilt für die Sauerstoffherzeugung in der Verfahrensvariante b). Ein Vergleich der Bilder 15 bis 17 zeigt, daß das Verfahren mit Zusatzbrennstoff den weitaus größten Abgasmassenstrom im Vergleich zu den beiden anderen hat, deren Abgasmassenströme etwa in der gleichen Größenordnung liegen. Die gleichen Verhältnisse gelten auch für den ausgekoppelten absoluten Dampfstrom als Nutzstrom.

In den Bildern 18 bis 20 sind für das betrachtete Beispiel jeweils die Energieflußdiagramme dargestellt. Wie bereits in den Massenflußdiagrammen gezeigt, werden auch hier die Primärenergieströme zur elektrischen Strom- und zur Sauerstoffherzeugung beispielhaft mit be-

rücksichtigt. Je nach Kraftwerkswirkungsgrad ($\eta_{K,el} = 0,33$ bei älteren Anlagen bis $\eta_{K,el} = 0,55$ bei GUD Anlagen) werden die entsprechenden Primärenergieverlustströme analog zum Massenflußdiagramm an den einzelnen Verfahrensbauweisen vorbeigeführt und als Verlustströme am Ende zusammengefaßt (hier $\eta_{K,el} = 0,33$ angenommen). Der Vergleich der unterschiedlichen Prozeßführungen in den Bildern 18 bis 20 zeigt entsprechend dem ausgekoppelten Dampfmassenstrom, daß der Prozeß mit Erdgaszusatzfeuerung den größten absoluten ausgekoppelten Nutzenergiestrom hat.

Einen Überblick über die drei Prozeßführungen (Varianten a), b) und c)) für die thermischen Hauptverfahren und die Gesamtverfahren mit den relevanten Massenströmen, Abgasmassenstromverhältnissen, Energieströmen und den daraus entwickelten Wirkungs- und Aufwandsgraden zeigt Tabelle 3. In den ersten drei Zeilen sind die wichtigsten Massenströme zusammengefaßt. In Zeile 2 ist der feuchte Abgasmassenstrom aus dem thermischen Hauptverfahren und in Zeile 3 der feuchte Abgasmassenstrom aus dem Gesamtverfahren eingetragen. In den Zeilen 4 und 5 sind die Abgasmassenströme aus den Hauptverfahren und den Gesamtverfahren mit dem Mindestabgasmassenstrom ins Verhältnis gesetzt.

In den Zeilen 6 bis 14 sind die relevanten zu- und abgeführten Enthalpie- und Energieströme aufgeführt.

- $\dot{H}_{R,ges}$ Mit dem Rückstand zugeführter Enthalpiestrom
- $\dot{H}_{th,Nutz,THV}$ Aus dem thermischen Hauptverfahren abgeführter thermischer Nutzenergiestrom
- $\dot{E}_{THV,ges}$ Neben dem Rückstand zusätzlich erforderlicher gesamter erforderlicher gesamter Energiestrom zum Betrieb des thermischen Hauptverfahrens (sämtliche Enthalpieströme und nicht an Masse gebundene Energieströme)
- $\dot{H}_{pr,THV,ges}$ Erforderlicher gesamter Primärenergiestrom zur Erzeugung von Energie und Betriebsstoffen, die für den Betrieb des thermischen Hauptverfahrens erforderlich sind.
- $\dot{H}_{th,Nutz,GV}$ Aus dem Gesamtverfahren abgeführter thermischer Nutzenergiestrom
- $\dot{E}_{GV,ges}$ Neben dem Rückstand zusätzlich erforderlicher gesamter erforderlicher gesamter Energiestrom zum Betrieb des Gesamtverfahrens (sämtliche Enthalpieströme und nicht an Masse gebundene Energieströme).

Tabelle 3: Massenströme, Massenstromverhältnisse, Enthalpie- und Energieströme, Wirkungs- und Aufwandsgrade für ein Verbrennungs-Nachverbrennungs-Verfahren bei einer Prozeßführung mit Zusatzbrennstoff, mit Sauerstoffanreicherung und kleiner Gesamtluftzahl

Nr.	Bezeichnung	Einheit	Zusatzbrennstoffe	Sauerstoffanreicherung	kleine Luftzahl $\lambda = 1,3$	Formel/Bemerkung
Massenströme						
1	$\dot{m}_{AS, \text{min}}$	[kg _{AB} /h]	1 520	1 520	1 520	z.B. Bild 15
2	$\dot{m}_{AS, \text{THV}}$	[kg _{AB} /h]	13 240	5 980	5 300	z.B. Bild 10
3	$\dot{m}_{AS, \text{GV}}$	[kg _{AB} /h]	15 010	6 780	6 010	z.B. Bild 10
Abgasmassenstromverhältnisse						
4	$\frac{Ab_{\text{THV}}}{Ab_{\text{GV}}}$	[-]	8,7	3,9	3,5	$\frac{Ab_{\text{THV}} = \dot{m}_{AS, \text{THV}} / \dot{m}_{AS, \text{min}}}{Ab_{\text{GV}} = \dot{m}_{AS, \text{GV}} / \dot{m}_{AS, \text{min}}}$
5						
Enthalpie- und Energieströme						
6	$\dot{H}_{R, \text{ges}}$	[MJ/h]	10 200	10 200	10 200	z.B. Bild 13
7	$\dot{H}_{\text{th, Nour, THV}}$	[MJ/h]	13 050	5 920	6 200	z.B. Bild 14
8	$\dot{E}_{\text{THV, ges}}$	[MJ/h]	12 180	260	270	z.B. Bild 14
9	$\dot{H}_{\text{th, THV, ges}}$	[MJ/h]	13 020	2 070	810	z.B. Bild 14
10	$\dot{H}_{\text{th, Nour, GV}}$	[MJ/h]	13 050	5 920	6 200	z.B. Bild 14
11	$\dot{E}_{\text{GV, ges}}$	[MJ/h]	14 710	1 710	1 600	z.B. Bild 14
12	$\dot{H}_{\text{th, GV, ges}}$	[MJ/h]	17 990	5 080	3 720	z.B. Bild 14
13	$\dot{H}_{\text{Sauer, THV}}$	[MJ/h]	30	3 850	5 390	$\dot{H}_{\text{Sauer, THV}} = \dot{H}_{\text{th, Nour, THV}} - \dot{H}_{\text{pr, THV, ges}}$
14	$\dot{H}_{\text{Sauer, GV}}$	[MJ/h]	-4 940	840	2 480	z.B. Bild 14
Wirkungsgrade						
15	$\eta_{\text{th, THV}}$	[-]	0,58	0,56	0,59	z.B. Bild 14
16	$\eta_{\text{pr, THV}}$	[-]	0,56	0,48	0,56	z.B. Bild 14
17	$\eta_{\text{th, GV}}$	[-]	0,52	0,50	0,53	z.B. Bild 14
18	$\eta_{\text{pr, GV}}$	[-]	0,46	0,39	0,45	z.B. Bild 14
Aufwandsgrade						
19	a_{GV}	[-]	-0,33	0,08	0,24	z.B. Bild 14

$\dot{H}_{\text{pr, GV, ges}}$ Erforderlicher gesamer Primärenergiestrom zur Erzeugung von Energie und Betriebsstoffen, die für den Betrieb des Gesamtverfahrens erforderlich sind

Die Zeilen 15 bis 19 zeigen die berechneten thermischen Wirkungs- und Aufwandsgrade.

Der Vergleich der unterschiedlichen Prozeßführungen in Tabelle 3 zeigt folgende Ergebnisse:

- Insgesamt besitzt die Prozeßführung mit kleiner Luftzahl das geringste Abgasmassenstromverhältnis und damit auch die kleinste Abgasreinigungsanlage.
- Die höchsten thermischen Wirkungsgrade hat das Verfahren mit abgenetzter Gesamtluftzahl. Insgesamt bestehen im Vergleich der unterschiedlichen Prozeßführungen nur relativ geringe Unterschiede. Hier wird deutlich, daß der thermische Wirkungsgrad für die Bewertung eines Verfahrens keine ausreichende Aussagekraft besitzt.
- Die Aufwandsgrade für die verschiedenen Prozeßführungen zeigen dagegen ganz erhebliche Unterschiede, insbesondere wenn man den Aufwand für die Abgasreinigungsanlage noch berücksichtigt. Für die Prozeßführung mit Zusatzbrennstoff (Variante a)) wird im vorliegenden Beispiel der Aufwandsgrad für das Gesamtverfahren negativ, d.h., es handelt sich nur noch um eine thermische Entsorgung des Rückstandes. Bei der Prozeßva-

riante b) (Sauerstoffanreicherung) ergibt sich ein kleiner positiver Aufwandsgrad ($a_{\text{GV}} = 8\%$), d.h. das Verfahren ist energieautark. Bei der Prozeßvariante c) (mit kleiner Gesamtluftzahl) ergibt sich ein deutlich positiver Aufwandsgrad. Bei einer elektrischen Stromerzeugung mit einem niedrig angenommenen Wirkungsgrad $\eta_{\text{K, el}} = 0,33$ erhält man für die Variante c) einen elektrischen Wirkungsgrad

$$\eta_{\text{el, pr}} = a_{\text{GV}} \cdot \eta_{\text{K, el}} = 0,24 \cdot 0,33 = 8\%$$

Die beispielhaft durchgeführte Betrachtung für verschiedene Prozeßführungen eines klassischen Verbrennungs-Nachverbrennungs-Verfahrens zeigt deutlich, daß trotz langjährig erprobter Technik noch ein erhebliches Entwicklungspotential vorhanden ist. Die herkömmliche Methode mit dem Einsatz von Zusatzbrennstoffen setzt nicht nur große Abgasreinigungsanlagen voraus, sondern auch einen hohen Aufwand an wertvoller Primärenergie. Mit einem ersten Optimierungsschritt z.B. in Form einer Sauerstoffanreicherung der Verbrennungsluft ergeben sich sowohl für den Abgasmassenstrom als auch für die Aufwandsgrade günstigere Verhältnisse. Läßt das Verfahren eine Aufbereitung der eingesetzten Rückstände vor der thermischen Behandlung zu, kann in einem weiteren Schritt ohne Sauerstoffanreicherung nur durch Verringerung des Verbrennungsluftmassenstroms ($\lambda_{\text{ges}} = 1,3$) das Ziel erreicht werden. Allerdings stellt sich bei einer Stöchiometriezahl von $\lambda = 1,3$ (Variante c)) im Abgas nicht mehr eine bislang gesetzlich geforderte Mindestsauerstoffkonzentra-

tion von 6 Vol.-% ein. Bei einer entsprechenden Aufbereitung des Rückstandes, d.h. einer entsprechend gleichmäßigen Zufuhr im Hinblick auf Rückstandskonsistenz und -massenstrom, erscheint eine Forderung nach einer so hohen Sauerstoffkonzentration im Abgas auch nicht notwendig.

Die Tendenz in der gemeinsamen Betrachtung der Beispiele zeigt deutlich, daß man – noch einen Schritt weitergehend – bei Kombination von Verkleinerung der Stöchiometriezahl λ (Voraussetzung: entsprechende Rückstandsaufbereitung) und zusätzlicher Sauerstoffanreicherung des Reaktionsgases auch bei noch kleineren Heizwerten als bei den hier angenommenen im Bereich um $h_{\text{u, ges}} = 10\,000$ kJ/kg einen energetisch selbsttragenden Prozeß bzw. auch noch einen Prozeß mit positivem Aufwandsgrad erhalten kann. Die teilweise erho-bene Forderung nach einem Mindestheizwert von $h_{\text{u, ges}} = 10\,000$ kJ/kg ist daher nicht notwendig.

Weitere Bewertungskriterien

Zusätzlich zu den sich aufgrund von Sachbilanzen ergebenden Aussagen sind, wie bereits erwähnt, im Zusammenhang mit der Beurteilung und Bewertung von Verfahren natürlich auch Fragestellungen bezüglich

- der Verfahrenstechnik,
- der Umweltverträglichkeit und
- der Wirtschaftlichkeit

zu beantworten. Bei der Bewertung der Verfahrenstechnik ist die Einschätzung wichtig, ob es sich um ein in der Praxis

bewertetes Verfahren oder B. um ein Verfahren im Pilotmaßstab usw. handelt. Damit sind auch Fragestellungen hinsichtlich der Betriebserfahrung und der Betriebssicherheit, des Entwicklungspotentials bzw. des Entwicklungsbedarfs, der Verfügbarkeit sowie der Flexibilität verbunden. Darüber hinaus sollten auch die bei einer Anwendung des jeweiligen Verfahrens erforderlichen Baumaßnahmen berücksichtigt werden. Die Beurteilung der Umweltverträglichkeit greift u.a. auf die erstellten Sachbilanzen zurück. Dabei können z.B. Emissionsfrachten, Schadstoffverteilungen usw. und deren Auswirkungen betrachtet werden. Im Rahmen der Untersuchung wirtschaftlicher Aspekte sind, wie allgemein bei einem Verfahrenvergleich üblich, die Investitionskosten, Betriebskosten, Erlöse usw. zu ermitteln. Auf diese weiteren Bewertungskriterien kann hier nur der Vollständigkeit halber hingewiesen, jedoch nicht näher eingegangen werden.

Literaturangaben

- [1] Scholz, R.; Schlenburg, F.; Beckmann, M.: Kriterien zur Beurteilung thermischer Behandlungsverfahren für Rückstände. VDI Berichte Nr. 1033, 1993
- [2] Beckmann, M.; Scholz, R.: Zum Feststoffumsatz bei Rückständen in Rostsystemen. BWK 46 (1994) Nr. 5, S. 218–229
- [3] Scholz, R.; Jeschar, R.; Schopf, N.; Klöpffer, G.: Prozeßführung und Verfahrenstechnik zur schadstoffarmen Verbrennung von Abfällen Chem.-Ing.-Tech. 62 (1990) Nr. 11, S. 877–887

- [4] Scholz, R.; Beckmann, M.; Horn, J.; Busch, M.: Thermische Behandlung von stückigen Rückständen – Möglichkeiten der Prozeßführung im Hinblick auf Entsorgung oder Wertstoffrückgewinnung. BWK/TU/Umwelt-Special Oktober 1992, S. M22–M37
- [5] Markus, E.; Daimer, P.; Schäfer, W.: Das Steinmüll-Konzept zur Hausmüllverbrennung sowie Betriebsergebnisse der MVA Hamburg-Stapelhof. In: Reimann, D.O. (Hrsg.): Rostfeuerung zur Abfallverbrennung. EF-Verlag, Berlin 1991
- [6] Horn, J.; Martin, J.; Busch, M.; Schäfer, R.: Umweltschonende durch synthetische Verbrennung in Hausmüllverbrennungsanlagen mit dem Rückschubrost. In: Thome-Kozminski, K.J. (Hrsg.): Reaktoren zur thermischen Abfallbehandlung. EF-Verlag, Berlin, 1993
- [7] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schlenburg, F.: Möglichkeiten der Verbrennungsführung bei Restmüll in Rostfeuerungen. BWK/TU/Umwelt-Special Oktober 1991, S. V22–V39
- [8] Dorn, I.H.: Entwicklung der thermischen Entsorgung in der Rückstandsverbrennung der BASF AG. BASF-Symposium „25 Jahre Drehrohren“ (9/89), WLB 11–12/89
- [9] Erbach, G.; Schöner, P.: Thermische Behandlung von Sonderabfällen. Abfallwirtschaftsjournal 2 (1990) Nr. 10, S. 638–645
- [10] Brinker, W.: Umweltverträglichkeitsuntersuchung für die Sonderabfallverbrennungsanlage Dörpen, Zentrum für Abfallforschung, Heft 7, TU Braunschweig, Sept. 1992, S. 193–210
- [11] Siemens AG, Bereich Energieerzeugung (KWU): Die Schwel-Brenn-Anlage, eine Verfahrensbeschreibung (1991)
- [12] Erlecke, J.: Das SIEMENS Schwel-Brenn-Verfahren Thermische Restmüllbehandlung mit optimaler Verwertung der Verfahrensprodukte. Kolloquium „Thermische Abfallbehandlung quo vadis? 30.09.–01.10.1993, TU Bergakademie Freiberg
- [13] Angerer, G.; Bätcher, K.; Bars, P.: Verwertung von Elektronikschröten, Erich Schmidt Verlag, Berlin (1993), S. 77–81
- [14] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schlenburg, F.: Experimental research on gasification of coarse waste on a stocker system and separate after burning as well as optimization with the aid of a process model. The 1994 Incineration Conference, May 9–13, Houston, Texas

- [15] MGA-Plasma AG: Das Plasma-Verfahren – Die zeitgemäße Methode zur Verwertung von Sonderabfällen (1991)
- [16] Höller, H.K.: Plasma – Das Plasma-Ultra-hochtemperaturverfahren. Symposium Sonderabfalltechnik '93, Darmstadt, 31.03.1993
- [17] Larson, H.; Schingitz, M.: Konversionsverfahren zur thermischen Verwertung von Rest- und Abfallstoffen. BWK 46 (1994) Nr. 5, S. 214–217
- [18] Stahlberg, R.: Thermoselect – Energie und Rohstoffgewinnung durch thermisch-chemische Stoffwandlung im geschlossenen System. VDI-Bericht 1033 (1993), S. 221–231
- [19] Von Roll AG Umwelttechnik: Duotherm: Mit zwei Schritten in eine neue Ära bei thermischen Verwerten von Hausmüll (1994), Firmenprospekt
- [20] SBW Sonderabfallsorgung Baden-Württemberg GmbH, BC Berlin Consult GmbH: Der Thermo-Cycling-Process, Informationschrift, August 1994
- [21] Demonstration Thermo-Cycling-Process im Technikum der Freiburger NE-Metall GmbH, Freiberg, 25.05.1993
- [22] Scholz, R.; Jeschar, R.; Fuchs, W.; Jenne, R.: Umweltsechsispunkte bei der Herstellung und Anwendung von Kalkprodukten. 8. Internationaler Kalkkongress, 29./30. Juni 1994 in Berlin, Internationaler Kalkverband
- [23] Böse, W.: Vom Brennstoff zum Rauchgas. B.G. Teubner Verlagsgesellschaft Leipzig (1957)
- [24] Traustel, S.: Zur Berechnung von Vergasungsgleichgewichten. Feuerungstechnik 31 (1943) Nr. 7/8
- [25] Guntz, W.; Hardt, L.: Kurzes Handbuch der Brennstoff- und Feuerungstechnik. Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 3. Aufl., 1962
- [26] Meunier, J.: Vergasung fester Brennstoffe und oxidative Umwandlung von Kohlenwasserstoffen Verlag Chemie, Weinheim/Bergstr., 1962
- [27] Belevi, M.: Was können Stoffflußstudien bei der Bewertung der thermischen Abfallbehandlung leisten? VDI-Berichte 1033, 1993
- [28] Beckmann, M.; Scholz, R.: Modellvorstellung zum Feststoffumsatz bei Rückständen in Rostfeuerungen. GVC-Symposium „Abfallwirtschaft“, Würzburg, 17.–19.10.1994

BWK 732

Im Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) wurde kürzlich ein Schwungrad zur Energiespeicherung vorgestellt, das durch supraleitende Lagerung besonders verlustarm läuft. Bei dieser Entwicklung werden magnetische Lager aus Materialien, die den elektrischen Strom verlustfrei transportieren, sogenannte Supraleiter, mit Dauermagneten kombiniert, die das stabile Schweben von rotierenden Körpern, z.B. Schwungrädern, ermöglichen. Energiespeicher auf Schwungradbasis können bei der Spitzenstromerzeugung in Kraftwerken oder in schadstofffreien und energiesparenden Massenverkehrsmitteln eingesetzt werden.

Bisher war vor allem Japan auf diesem Gebiet führend: Die Herstellung von

Reibungsloses Schwungrad speichert Energie

Supraleitern auf der Basis des Yttrium-Barium-Kupfer-Oxids (YBa₂Cu₃O₇) durch Schmelztexturierung brachte den entscheidenden Durchbruch für die Anwendung dieser neuen Hochtemperatursupraleiter für magnetische Lager.

Im Institut für Nukleare Festkörperphysik des KfK gelang es Dr. Hans Bornemann und seiner Arbeitsgruppe in kurzer Zeit, das Funktionsprinzip erfolgreich

weiterzuentwickeln. Der Prototyp dieses Schwungrads (Bild) mit supraleitender und daher abriebfreier Lagerung

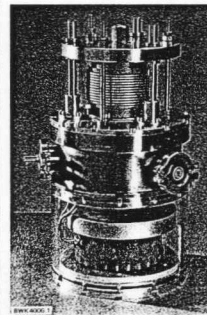


Bild: Supraleitend gelagertes Schwungrad zur Energiespeicherung

funktioniert bereits bei einer Kühlung durch flüssigen Stickstoff (bei –196 °C). Die gespeicherte Energie betrug etwa 5 Wattstunden (Wh). Geplant ist nun die Entwicklung eines neuen Schwungrads für 300 Wh, das entspricht der in einer Autobatterie gespeicherten Energie. Im Gegensatz zur Batterie kann diese Energie jedoch innerhalb von Sekunden gespeichert und bei Bedarf ebenso schnell wieder abgegeben werden.

Supraleitend gelagerte Schwungräder haben gegenüber klassischen Energiespeichern den Vorteil, daß sie ohne Verschleiß und Chemikalien funktionieren, so daß die bei der Entsorgung von Akkumulatoren auftretenden erheblichen Umweltbelastungen entfallen.

BWK 4006