

Energetische Verwertung von Ersatzbrennstoffen mit hohem Chlorgehalt

Michael Beckmann, Weimar

Reinhard Scholz, Clausthal-Zellerfeld

Martin Horeni, Weimar

1	Einleitung.....	1
2	Chlor im Brennstoff – Wechselwirkungen bei thermischen Prozessen.....	2
3	Schlussfolgerungen für die Anlagentechnik	11
4	Energetische Bewertung von Konzepten mit Ersatzbrennstoffeinsatz.....	13
4.1	Einsatz von Ersatzbrennstoff aus Restmüll in Industriekraftwerken	14
4.2	Einsatz von aufbereitetem Restmüll zur Energieerzeugung.....	16
5	Ausblick	19
6	Schrifttum	20

Zusammenfassung

In dem vorliegenden Beitrag werden zunächst zusammenfassend einige wesentliche Aspekte bezüglich des Chlorgehaltes und weiteren brennstofftechnischen Eigenschaften im Zusammenhang mit den Haupteinflussgrößen bei thermischen Behandlungsprozessen dargestellt. Im Vordergrund stehen die Einflüsse im Zusammenhang mit der Verschmutzung und Korrosion, auf Schadstoffverbindungen wie z.B. chlorierte Kohlenwasserstoffe wird hier nicht eingegangen. Die sich daraus ableitenden Anforderungen an die Prozessführung werden danach im Zusammenhang mit der Energieeffizienz diskutiert. Abschließend wird auf Maßnahmen zur Optimierung der Prozessführung und auf verbleibenden Entwicklungsbedarf eingegangen.

1 Einleitung

Die Herkunft von Abfällen mit hohen Chlorgehalten ist vielfältig, es können aufbereitete Fraktionen aus Hausmüll, daraus erzeugte Ersatzbrennstoffe, Produktionsabfälle oder auch bestimmte Althölzer, Reste aus der Biomasseaufbereitung usw. gemeint sein. Dementsprechend muss bei der Diskussion der Verbrennungsführung differenziert werden. Nicht nur die Bindungsform des Chlors – organisch oder anorganisch – variiert von Brennstoff zu Brennstoff, sondern auch die brennstofftechnischen Eigenschaften sind brennstoff- (und hier abfall-) spezifisch und können sehr verschieden sein. Der Chlorgehalt wird im Allgemeinen im Zusammenhang mit der Korrosionsgefahr im Dampferzeuger betrachtet. Chlor und Chloride können aufgrund ihrer Reaktionsfähigkeit mit den unterschiedlichsten

Brennstoffbestandteilen reagieren, wobei die Reaktionen durch die jeweiligen Betriebsbedingungen (Hauptinflussgrößen wie z.B. Brennstoffzusammensetzung, Temperatur, Sauerstoffkonzentration, Verweilzeit) beeinflusst werden. Die sehr komplexen stofflichen Wechselwirkungen bedingen, dass die Prozessführung von Feststoffumsatz z.B. auf dem Rost oder in der Wirbelschicht und Nachverbrennung nur auf empirische Weise mit den Ansätzen der Schadstoffminderung, Korrosionsoptimierung und Verschmutzungsoptimierung verknüpft werden kann. Die Frage nach der optimalen Feuerung enthält jedoch die Teilaufgaben der emissionsarmen und verschmutzungsoptimierten bzw. der korrosionsoptimierten Feuerung. Ein diesbezügliches Zusammenwirken von bereits verfügbaren Primärmaßnahmen als Zielvorgabe oder Führungsgröße in einer Feuerungsleistungsregelung ist daher noch als Entwicklungsziel einzustufen.

2 Chlor im Brennstoff – Wechselwirkungen bei thermischen Prozessen

Chlor und Chloride weisen eine hohe Reaktionsfähigkeit auf und können mit den unterschiedlichsten Brennstoffbestandteilen reagieren, wobei die Reaktionen durch die jeweiligen Betriebsbedingungen (Hauptinflussgrößen wie z.B. Brennstoffzusammensetzung, Temperatur, Sauerstoffkonzentration, Verweilzeit) beeinflusst werden. Die Reaktionsmechanismen sind komplex, so dass die Analyse der Einflussgrößen entsprechend schwierig ist. Im engeren Zusammenhang mit dem Verhalten von Chlor aus Brennstoffen sind als Hauptinflussgrößen bei thermischen Prozessen zunächst der Einsatzstoff – Abfall, Ersatzbrennstoff – selbst und darüber hinaus die Sauerstoffkonzentration bzw. das Sauerstoffangebot von außen, die Temperatur und Zusatzstoffe (Additive) zu diskutieren.

Bei dem Einsatzstoff sind zunächst der Chlorgehalt und weiter auch die Bindungsform des Chlors zu betrachten. Zu unterscheiden ist bei der Bindungsform grob in organisch und anorganisch gebundenes Chlor. Bei Ersatzbrennstoffen aus Kunststoffen oder solchen mit

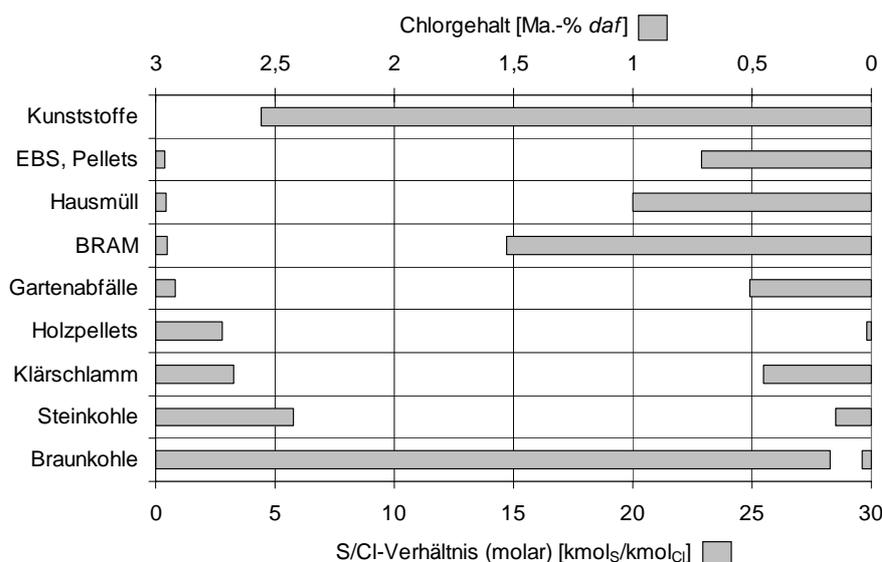


Bild 1. Chlorgehalt und molares Verhältnis Schwefel zu Chlor für ausgewählte Regelbrennstoffe, Biomassebrennstoffe und Ersatzbrennstoffe.

Quellen: Kunststoffe: [4], EBS, Pellets: [33], Hausmüll: [5], BRAM: [32], Gartenabfälle: [33], Holzpellets: [11], Klärschlamm: [4], Steinkohle: [4], Braunkohle: [4].

hohen Kunststoffgehalten überwiegt der Anteil organisch gebundenes Chlor – hier in Form von PVC. Anorganisch gebundenes Chlor ist demgegenüber gering; wie durch Waschversuche ermittelt wurde beträgt der Anteil maximal 2 % [15]. Werden die Ersatzbrennstoffe aus Bioabfallfraktionen hergestellt oder enthalten sie einen hohen Anteil an Bioabfällen, so überwiegt hingegen der Anteil anorganisch gebundenen Chlors. Bei Biomassebriketts die aus Restfraktio-

nen eines Kompostwerkes hergestellt werden beträgt der Anteil anorganischen Chlors am Gesamtchlorgehalt ca. 95 %.

Die Frage, welcher Chlorgehalt nun als hoch und welcher als niedrig einzustufen ist, kann nur schwierig beantwortet werden und ist nicht allein von der Bindungsform sondern auch von weiteren Brennstoffinhaltsstoffen wie z.B. Alkalien, Schwefel, Schwermetalle und vom Aschgehalt sowie dem Ascheschmelzverhalten mit abhängig. Vor diesem Hintergrund müssen Erfahrungen aus der Verbrennung von fossilen Brennstoffen mit hohen Chlorgehalten (z.B. [18]) und mit hohen Salzgehalten (z.B. [8]) ebenso wie aus der Abfallverbrennung (z.B. [19]) auch im Zusammenhang mit dem Einsatz von Ersatzbrennstoffen in thermischen Prozessen berücksichtigt werden. Gemessen an Regelbrennstoffen, die Chlorgehalte deutlich kleiner 0,3 Ma.-% *daf* aufweisen, müssen Ersatzbrennstoffe, die deutlich höhere Chlorgehalte als 0,5 Ma.-% *daf* aufweisen als Ersatzbrennstoffe mit hohem Chlorgehalt bezeichnet werden (Bild 1). Regelbrennstoffe mit Chlorgehalten im Bereich von 0,3 Ma.-% *daf* werden bereits als *high chlorine coals* bezeichnet [18]. Im Hinblick auf das Korrosionsrisiko muss weiter darauf hingewiesen werden, dass bei den meisten Ersatzbrennstoffen aus Abfällen das Verhältnis Schwefel zu Chlor deutlich niedriger ist als bei Regelbrennstoffen wie Braun- und Steinkohlen (ebenfalls Bild 1).

Aus Untersuchungen zur thermischen Zersetzung von PVC unter Heliumatmosphäre und einer Aufheizrate von 20 K/min ist bekannt, dass bei ca. 300 °C die Abspaltung von Chlor nahezu quantitativ erfolgt und sich HCl bildet [16].

Es ist davon auszugehen, dass HCl in Konzentrationen, wie sie bei der Abfallverbrennung üblich sind, die Korrosion an Wärmeübertragerflächen unmittelbar nur wenig beeinflusst. Bei hohen Temperaturen ist das Gleichgewicht der Chlor-Deacon-Reaktion zum HCl hin verschoben, die HCl-Bildung wird zudem durch hohe Wassergehalte begünstigt. Bei Temperaturen unterhalb 600 °C, wie sie bei den Verbrennungsteilschritten Trocknung, Entgasung, Vergasung vorliegen, tritt überwiegend Cl₂ und Cl⁻ auf, wodurch bei Anwesenheit von Alkali- und Schwermetallspezies die Bildung von Alkalichloriden und Schwermetallchloriden einsetzt. So wird beispielsweise in [35] über diese chlorinduzierte Schwermetallfreisetzung berichtet.

Flüchtige dampfförmige Alkali- und Schwermetallchloride können an vergleichsweise kalten Wärmetauscherflächen kondensieren. Bei lokaler Abkühlung des Gases am Wärmetauscher (Quencheffekte; Kältefalle) entwickelt sich dieser Vorgang gerade dort, wo die Wege zum Kesselrohr kurz sind und damit die Belagsbildung mit der Wirkung von Verschmutzung bzw. Korrosion begünstigt ist. Jede Salzespezies (Bleichlorid, Kalium-Blei-Chlorid usw.) tritt in Abhängigkeit von seiner Fracht im Gas bei einer spezifischen Temperatur in Sättigung. Dadurch wird der Wärmetauscher zu einem Destillationsapparat für Aerosole im Zuge der generellen oder lokalen Abkühlung des Rohgases. Damit kann es zu lokalen Anreicherungen dieser Stoffe im Belag kommen und aus der angestrebten Entfrachtung der Rostasche wird eine ungewollte, aber gezielte lokale Beladung der Ablagerungen auf den Wärmetauscherflächen mit der möglichen Wirkung von *Verschmutzung* bzw. *Korrosion*. Die Chlorbindungsformen und damit das Korrosionspotenzial werden jedoch weiter durch den Schwefelgehalt im Brennstoff bzw. die SO₂- und SO₃-Anteile im Abgas bestimmt. Die hier relevanten stofflichen und thermodynamischen Zusammenhänge, sowie die Bedeutung der Belagsbildung und Belagsentwicklung für das Ausmaß und die Dynamik von schädigenden Prozessen sind beschrieben in [10], [19], [30].

Aus Gleichgewichtsrechnungen zeigt sich die Abhängigkeit der Sulfatisierungsreaktionen für Chloride von den jeweiligen Gaskonzentrationen und der Temperatur. Bereits bei geringen SO₂/SO₃-Konzentrationen liegt das Gleichgewicht auf der Seite der Sulfate. Mit zu-

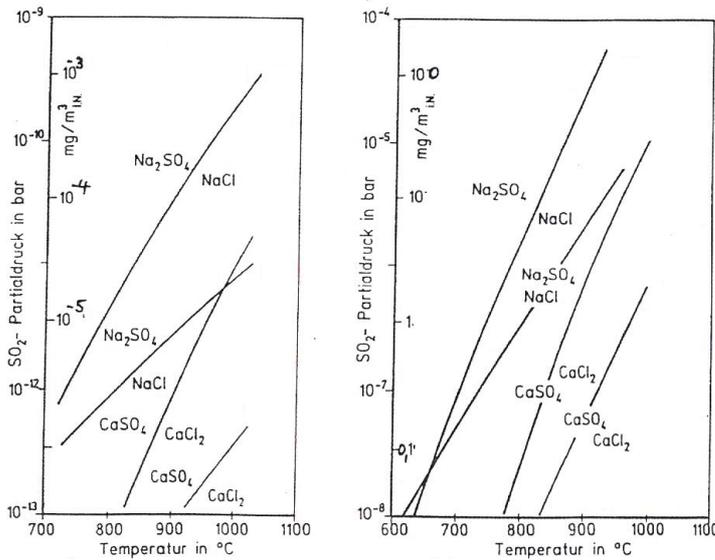


Bild 2. Gleichgewichtskurven für verschiedene SO₂-Partialdrücke in Abhängigkeit von der Temperatur [9].

nehmender Temperatur verschiebt sich das Gleichgewicht jedoch zu den Chloriden (Bild 2) [9].

Gibt man gezielt Calcium als Additiv zum Einsatzstoff, so lassen sich die HCl-Konzentrationen bei entsprechendem Überschuss (molares Ca/Cl – Verhältnis) wirkungsvoll senken. Die Zugabe von Additiven ist insbesondere bei Verbrennungsprozessen in Wirbelschichtsystemen aufgrund der hohen Wärme- und Stoffübertragungskoeffizienten wirkungsvoll. Weniger wirkungsvoll ist der Einsatz von Additiven zur Schwefel- und Chloreinbindung bei Rostsystemen, z.B. [27].

Die Pyrolyse – in der Regel in Drehrohrsystemen – erweist sich im Zusammenhang mit dem Ersatzbrennstoffeinsatz als eine weitere, thermische Brennstoffaufbereitung. Untersuchungen an einem Batchdrehrohr im Labormaßstab und an einem kontinuierlichen Drehrohr im Pilotmaßstab haben gezeigt, dass durch die Zugabe von hydriertem Kalk aus Klärschlamm (molares Verhältnis Ca/Cl 2:1) 85 % des eingetragenen Chlors als Calciumchlorid (CaCl₂) aus dem Pyrolyserückstand auswaschbar sind. Ohne Zugabe des Additivs zu einer Holz-PVC-Mischung ließen sich nur 1,6 Ma.-% des Chlors aus dem Pyrolyserückstand auswaschen; der größere Anteil des Chlors wurde am Holz adsorbiert. Weiter wurde bei diesen Untersuchungen festgestellt, dass bei einem hohen Ligningehalt im Einsatzstoff Chlor bevorzugt im Pyrolyserückstand angereichert wird und bei hohen Zellulosegehalten eine bevorzugte Freisetzung von Chlor in das Pyrolysegas erfolgt.

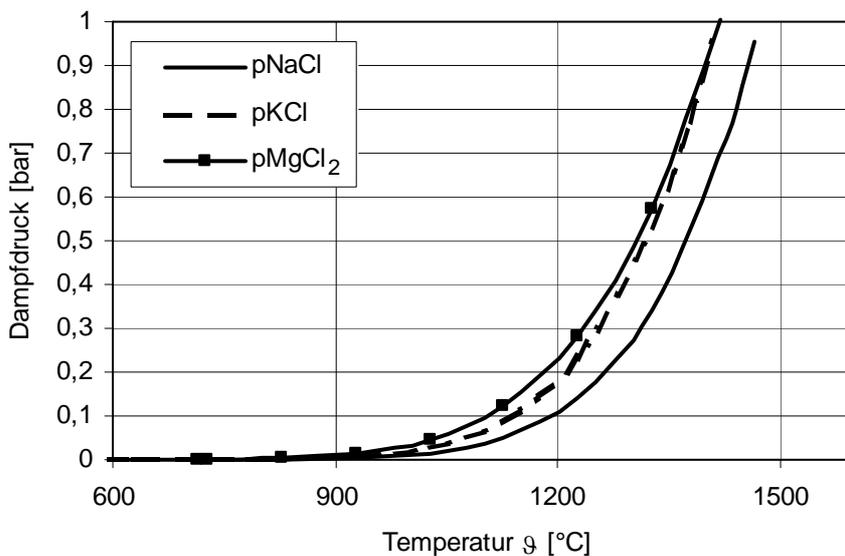


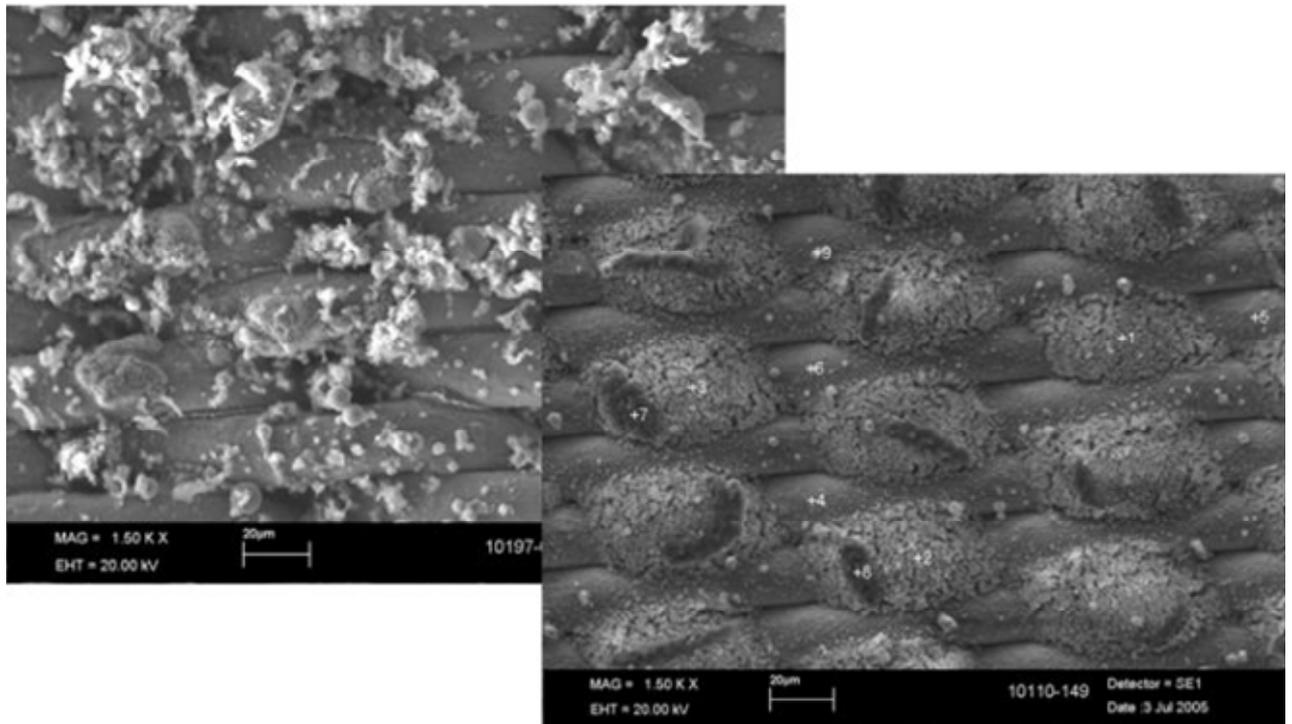
Bild 3. Dampfdruckkurven für NaCl, KCl und MgCl₂.

Bisher wurde von einer organischen Bindungsform des Chlors (z.B. in Form von PVC) im Einsatzstoff ausgegangen. Wie erwähnt kann Chlor auch in anorganischer Form in den Ersatzbrennstoffen vorliegen. Das ist insbesondere bei Ersatzbrennstoffen aus Bioabfällen der Fall. Wie vorstehend beschrieben, sind Sulfatisierungsreaktionen mit der Folge der Freisetzung von Chlor (HCl

und Cl_2) besonders bei niedrigen Temperaturen wahrscheinlich (vgl. Bild 2). Bei hohen Temperaturen hingegen nimmt die Verflüchtigung der Salze entsprechend zu. Das Bild 3 zeigt die Dampfdruckkurven für Natrium-, Kalium- und Magnesiumchlorid. Werden diese Chloride bei hohen Temperaturen flüchtig – gleiches trifft sinngemäß auf die Schwermetallchloride, z.B. Blei- und Zinkchlorid zu – so besteht die Gefahr einer Kondensation dieser Verbindungen an den vergleichsweise kalten Wärmetauscherflächen des Dampferzeugers, was wie voran stehend erwähnt zu erheblichen Verschmutzungs- und Korrosionsproblemen führen kann.

Mit *Verschmutzung* sind hier vor allem die Ablagerungen auf den ungeschützten Wärmetauscherflächen im Strahlungs- und Berührungsteil gemeint und weniger die *Verschlackung* im heißen Teil auf Feuerfest.

Die bei der Verbrennung entstehenden Vorläuferstoffe und Zwischenstufen der gelösten Salzfracht des Rohgases sind weitgehend unbekannt und entziehen sich völlig jeglicher (neugierigen) Annäherung, sei es durch Messung oder Modellierung. Zudem erzeugt die Variation von Art, Bindung, Menge und Masse der Salz- und Schwermetallfrachten in den Brennstoffen (die ebenfalls durch Messung nicht sinnvoll erfasst werden kann) zusätzliche Unstetigkeiten.



- Belagssonde
- Asche-Salz-Proportionen (ASP)

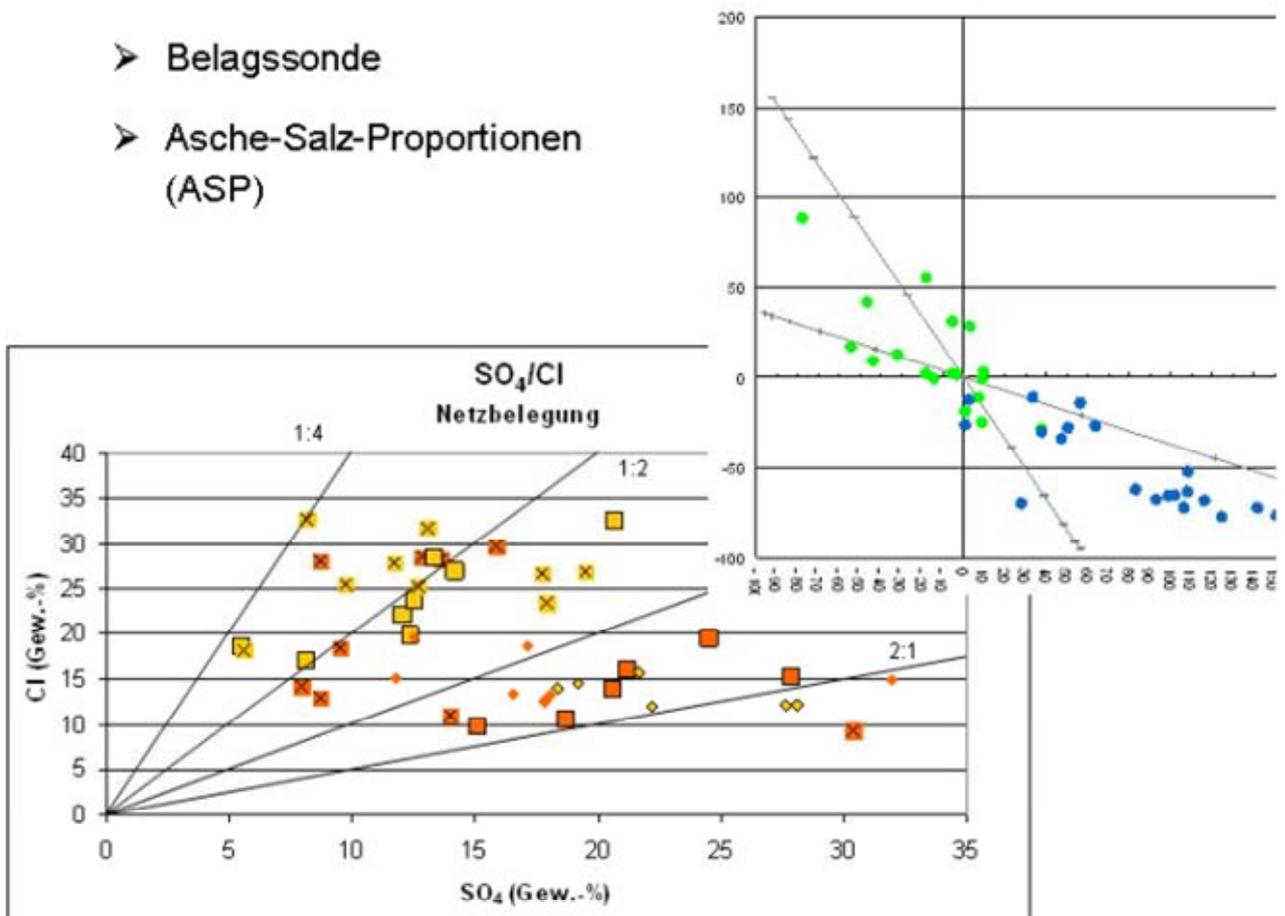


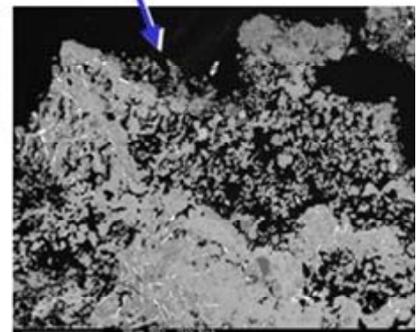
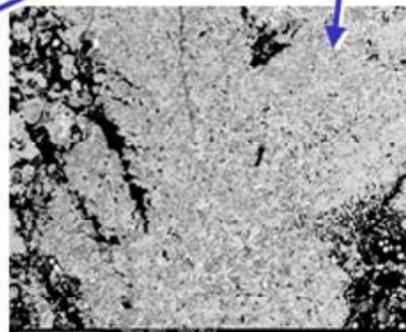
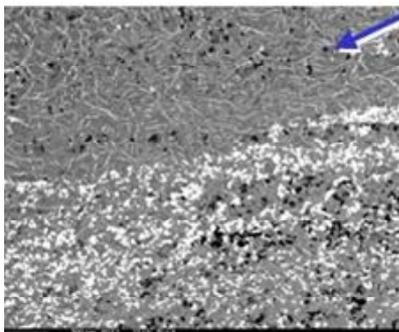
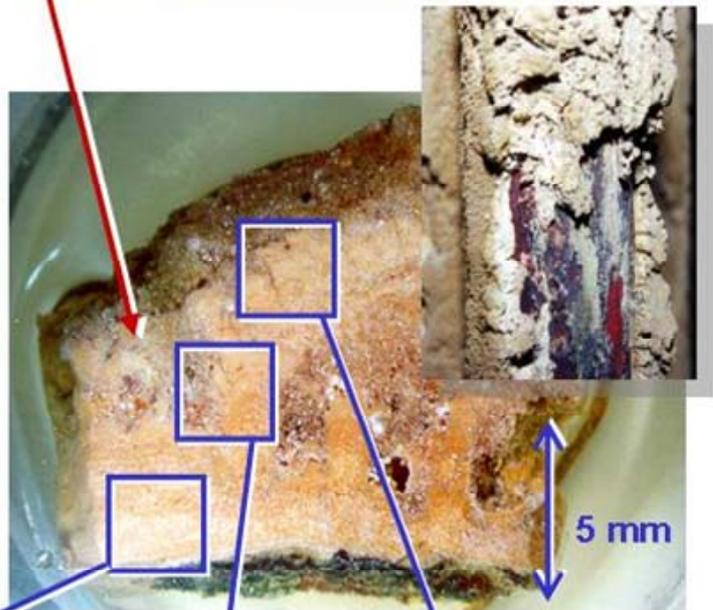
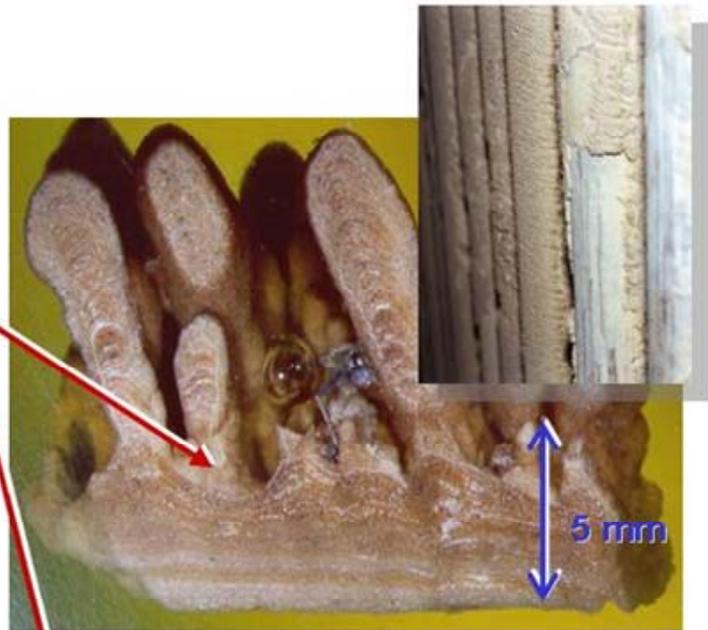
Bild 4. Betriebsweise und Belagsentwicklung (Erläuterung im Text), (aus [19], [30], [31]).

- Zone der Kältefalle
- Dichtes Salzgefüge
- Depot von Chlorsalzen
- Reservoir für Chlorgas
- Barriere für Sauerstoff
- Mischsalzbildung
- Eutektische Schmelzen



Faktoren für die
Dynamik der Korrosion:

- Salzmischung
- Anteil an Bleisalzen
- Wärmefluss
- Rohrtemperatur
- Gefüge der Korrosions-
produkte



0,5 mm

Bild 5. Belagsentwicklung und Korrosion (Erläuterung im Text), (aus [19], [30], [31]).

Diese sehr komplexen stofflichen Wechselwirkungen bedingen, dass die Prozessführung nur auf empirische Weise mit dem Ansatz der Korrosionsoptimierung und Verschmutzungsoptimierung verknüpft werden kann. Ein möglicher Weg dafür ist die Erfassung und Analyse der im Rohgas transportierten Partikel in Abhängigkeit von gegebenen (messtechnisch begleiteten) oder gezielt herbeigeführten Betriebsituationen. Entsprechende Vorgehensweisen wurden im Zuge von Forschungsvorhaben und Betriebsuntersuchungen [19] entwickelt (ASP und Belagssonde, Bild 6). Inzwischen steht eine breite Datenbasis von entnommenen Rohgaspartikelfrachten aus Abfallverbrennungsanlagen zur Verfügung. Die Verknüpfung der Befunde aus diesen Messungen mit den jeweils gegebenen Belastungen der Anlagen durch Verschmutzung oder Korrosion (Befunde aus Stillstandsbegehungen) belegen die Aussagekraft dieser Methoden, ein Potential der Korrosion bzw. der Verschmutzung aus der Betriebsituation zum Zeitpunkt der Messung abzubilden. Typischerweise werden diese Messungen im Rahmen einer Untersuchungskampagne ca. 5- bis 10-mal pro Tag durchgeführt und 2 bis 4 Messtage pro Betriebsvariation zu einem Befund integriert.

In einem nächsten Schritt werden die jeweils gegebenen Betriebsituationen (Betriebsdaten) mit den Befunden aus ASP und Belagssonde verglichen. Zudem sollen durch gezielte Variation von z.B. der Luftzahl, des Primär- zu Sekundärluftverhältnis usw., weitere Varianten der Prozessführung auf ihre Bedeutung für Korrosion und Verschmutzung bewertet werden [10], [19].

Bild 4: Zusammenhang zwischen Betriebsweise und Belagsentwicklung

Die beiden REM-Bilder (Länge des Maßstabsbalken am unteren Bildrand ist 20 µm) zeigen die Belagssonde nach kurzer Verweilzeit (< 60 sec) im Rohgasstrom. Abhängig von der Entnahmeposition (Messöffnung im Kessel) und der damit gegebenen Gastemperatur scheidet sich – isokinetisch – die Fracht der physikalisch (fest, flüssig) und stofflich (Silikate, Oxide, Chloride, Sulfate, Hydroxide usw.) unterschiedlichen Partikel des Rohgases ab. Die verschiedenen Partikeltypen formen signifikante Gefügestrukturen auf der Sonde. Die mineralogische Bewertung dieser *Sedimentationsgefüge* und die chemischen Daten aus Punkt- und Kleinflächenmessungen der abgelagerten Partikel führen zu einer differenzierten Zustandsbewertung der Partikelfracht des Rohgases. Durch Vergleich mehrerer Messpositionen entlang des Gasweges (d.h. Messungen bei unterschiedlichen Gastemperaturen) und/oder durch Vergleich von gezielt unterschiedlichen Betriebsituationen an der gleichen Messposition eröffnet sich die Basis für eine korrosionsmindernde Prozessoptimierung. Das linke REM-Bild zeigt beispielhaft einen Betriebszustand mit hoher Asche- und geringer Salzfracht (geringes Korrosionspotential). Beim rechten REM-Bild ist der gegenteilige Zustand gegeben.

Ergänzend dazu zeigt das linke Variationsdiagramm einen chemischen Datensatz von Punktmessungen auf der Belagssonde (hier Chloridanteil und Sulfatanteil). Die Symbole bezeichnen verschiedene Entnahmepositionen an zwei Linien einer Abfallverbrennungsanlage. Es zeigen sich diskrete Lagefelder der verschiedenen Symboltypen. Vorgaben für eine Bewertung der Lagefelder ergeben sich aus den für Abfallverbrennungsanlagen typischen Korrosionsprozessen (Hochtemperatur-Chlorkorrosion), d.h. Betriebsituationen mit einer Dominanz von Sulfaten gegenüber Chloriden sind zu bevorzugen.

Das rechte Variationsdiagramm symbolisiert das ASP-Diagramm. Die Datenpunkte repräsentieren die Proportion an Aschekomponenten zu Salzkomponenten im Rohgas (Messzeit ca. 30 min, Messposition am Kesselende). Die hier exemplarisch gezeigten blauen und grünen Punkte beziehen sich auf zwei unterschiedliche Betriebsweisen eines Kessels einer Abfallverbrennungsanlage (blau: höhere Dampflast, grün: geringere Dampflast). Ent-

sprechend den Lagefeldern des ASP-Diagramms [19] ist für den Betriebszustand der blauen Punkte ein geringeres Korrosionspotential gegeben als für den der grünen Punkte.

Bild 5: Zusammenhang zwischen Belagsentwicklung und Korrosion

Die beiden Fotos zeigen anhand von eingebetteten und polierten Schnittflächen typische Gefügestände von Belägen (hier: Berührungsheizflächen einer Abfallverbrennungsanlage, Maßstabsbalken 5 mm). In der rechten oberen Ecke des jeweiligen Bildes ist die Vor-Ort-Situation im Kessel gezeigt. Am unteren Bildrand befindet sich die Kontaktfläche zum Kesselrohr, am oberen Bildrand die Kontaktfläche zum Rohgas (Belagsoberfläche). Ausgehend von den ersten Ablagerungen auf dem Kesselrohr bilden sich signifikante Gefügestrukturen aus, die mit zunehmender Belagsdicke in typischer Weise variieren (zuerst schichtweise, dann zapfenförmig). Dabei entstehen zunächst sehr salzreiche, dichte Gefüge (Wirkung der Kältefalle). Später werden zwischen die Zapfen lockere *Schüttungen* aus aschereichen, gröberen Partikeln eingebunden. Die drei REM-Bilder am unteren Rand der Abbildung sollen diese Gefügeunterschiede verdeutlichen (rohrnah sehr geringe Porosität; rohrfern hohe Porosität). Je heißer die Mediumstemperaturen sind (Rohgas und/oder Wasser bzw. Dampf), desto heftiger werden diese primären Gefügestrukturen durch daran anschließende Prozesse der Belagsentwicklung überprägt, bis hin zu einer völligen Umorganisation der beteiligten Phasen und Gefügestände. Im Zuge dieser Belagsentwicklung kann es auch zur Ausbildung von kleinen *Magmenkammern* aus erschmolzenen Salzen kommen oder zu monomineralischen Horizonten durch Stoffmigration. Durch diese Prozesse können sich im Zusammenwirken der Temperaturmilieus und der stofflichen Milieus (Salzanteil, Salzarten) im Belag die Voraussetzungen für dynamische Korrosionsprozesse entwickeln. Die Abbildung listet die diesbezüglich relevanten Stichworte auf.

Bild 6: Zusammenhang zwischen Korrosion und Verfügbarkeit

In jüngster Vergangenheit sind die lokal invasiven (mulden- und wannenförmigen), besonders dynamisch verlaufenden Korrosionsprozesse an Kesselrohren gehäuft zu beobachten [31]. Für die Betreiber von Abfallverbrennungsanlagen und auch von mit Altholz gefeuerten Biomasseanlagen ergeben sich schlagartig Betroffenheiten, die meist unmittelbar die Verfügbarkeit der Anlage eingrenzen (ungeplante Stillstände, verlängerte Revisionszeiten). Die beiden Fotos rechts oben sollen die lokal begrenzte, aber sehr tief greifende Ausprägung der Korrosion veranschaulichen. Die darunter angeordneten REM- und Mikrosondenbilder belegen am Beispiel eines Verdampferrohres einer mit Altholz gefeuerten Biomasseanlage die extreme Destillationswirkung von spezifischen Gefügeständen in Belägen bzw. in Korrosionsprodukten. Das Zusammenwirken von Gefügeeigenschaften des Belags, von Temperaturmilieus (Kältefallen, Temperatur-Gradienten in Abhängigkeit vom Wärmefluss) im Belag und Stoffspezies im vorbeiströmenden Gas kann dazu führen, dass – im hier gezeigten Beispiel – monomineralisches Kalium-Blei-Chlorid die Hohlräume im schichtweise aufgebauten Korrosionsprodukt füllt und als Quelle eines Chlorpartialdruckes wirkt, wodurch das Kesselrohr in dampfförmiges Eisenchlorid aufgelöst wird (mit Abzehraten in der Größenordnung von bis zu 1 mm pro 1000 Betriebsstunden; in einem Fall konnten sogar 1,9 mm pro 1000 h nachgewiesen werden).

- Abhängig von Belagsentwicklung
- Abzehrung bis 1 mm / 1000 h
- Cl-Depot in Korrosionsschichten
- Verdampfung von Eisenchlorid
- Lokal invasive Abzehrung
- Lebenszeit < Soll-Reisezeit
- Meist Überhitzer betroffen

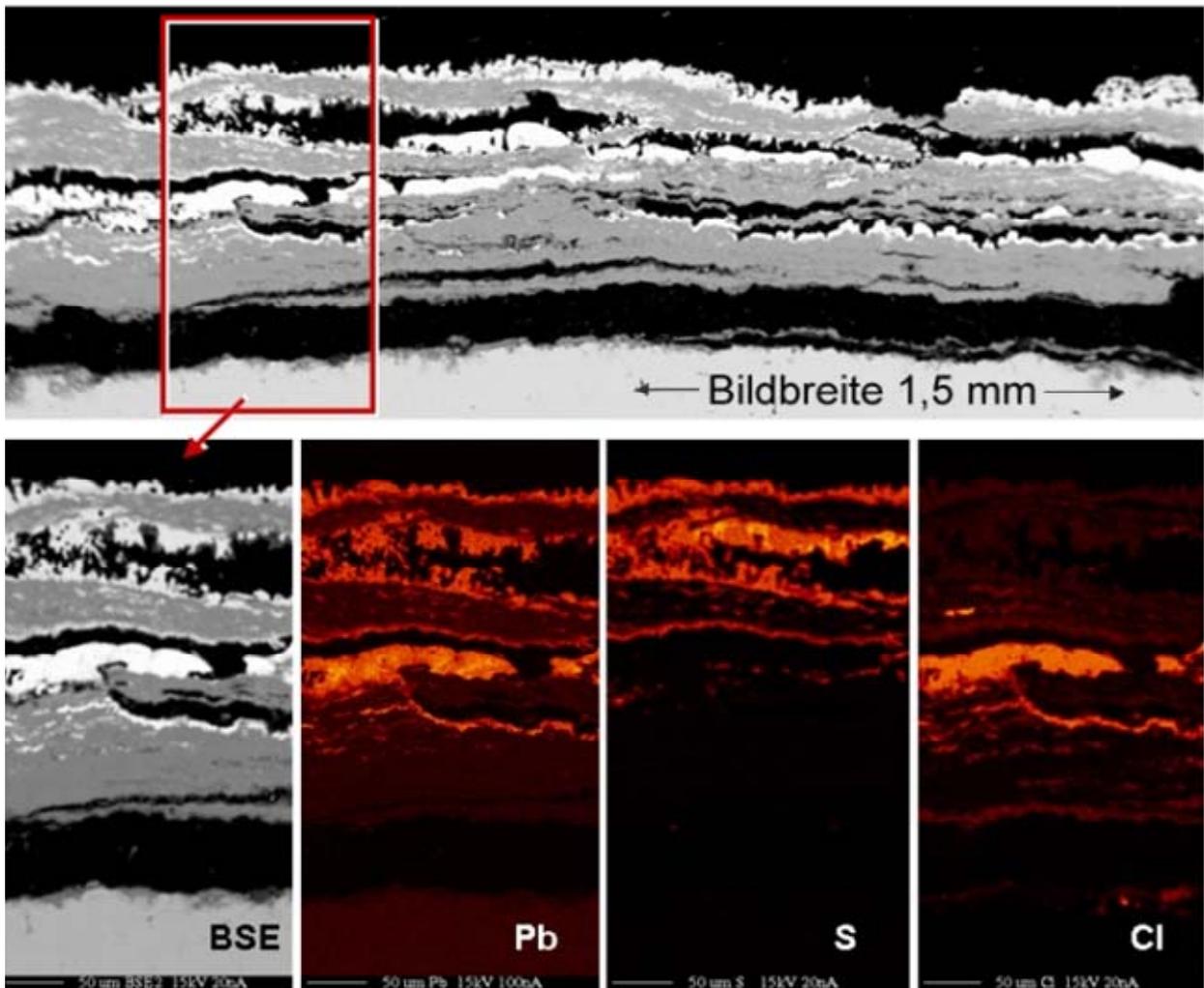
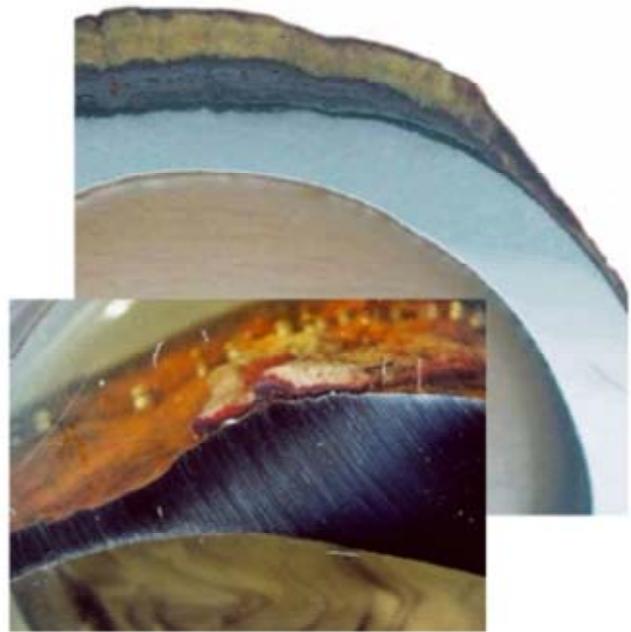


Bild 6. Korrosion und Verfügbarkeit (Erläuterung im Text), (aus [19], [30], [31]).

In analoger Weise lässt sich auch eine Kausalkette bezüglich der Verschmutzung von Dampferzeugern von Abfallverbrennungsanlagen aufbauen. Hierfür werden zurzeit an mehreren Abfallverbrennungsanlagen in Deutschland und Österreich im Auftrag der jeweiligen Betreiber (die von einer die Verfügbarkeit beeinträchtigenden Verschmutzung betroffen sind) Untersuchungen mittels ASP, Belagssonde und Stillstandsbeprobung durchgeführt.

Die aktuelle Tendenz der Konditionierung von Abfällen zu Brennstoffen bzw. von Abfallbehandlungsanlagen zu Kraftwerken bestärkt die Bedeutung dieser Optimierungsansätze durch die Prozessführung. Aus den aufgezeigten Beispielen soll bezüglich Korrosion zudem deutlich werden, dass die selektierend wirkenden stofflichen Prozesse im Zusammenspiel von Feuerung, Nachverbrennung und Wärmeabbau aufgrund des Potentials einer lokal begrenzten korrosiven Einwirkung (wenn Gefüge, Wärmefluss und Chemie im Belag *passen*) weitgehend von den Frachten im Brennstoff entkoppelt sind, d.h. die Festlegung von Grenzwerten im Brennstoff muss hier nicht zielführend sein. Dieser Fall trifft auch für das gezeigte Beispiel der mit Altholz gefeuerten Biomasseanlage und deren Brennstoff-Bleifrachten zu.

3 Schlussfolgerungen für die Anlagentechnik

Mit den Problemen der Verschmutzung und Korrosion haben sich auch abwehrende (sekundäre) Maßnahmen entwickelt [10]. Für den Bereich der Verschmutzung ist u.a. zu nennen: Online-Reinigung, Sprengreinigung, Additive und bezüglich Korrosion werden vor allem Nickelbasiswerkstoffe eingesetzt (auftragsgeschweißt oder thermisch gespritzt).

Weiterhin ist zu erwähnen, dass es im Bereich der konstruktiven Merkmale von Wärmetauschern (Gasführung, Wärmeauskopplung, Klopfung/Rußbläser, Mediumtemperaturen usw.) erhebliches Beeinflussungspotential zur Minderung bzw. Meidung von Verschmutzung und Korrosion gibt.

Für den direkten Einsatz von Ersatzbrennstoffen in Kraftwerksfeuerungen – Braun- und Steinkohlefeuerungen – werden Chlorgehalte des Brennstoffes von maximal ca. 0,75 bis 1,0 Ma.-% (TS) gefordert [7], [12], wobei dieser Wert bedingt durch Erfahrungen in der Praxis sehr wahrscheinlich noch herabgesetzt werden muss. Für den direkten Einsatz von Ersatzbrennstoffen in Kraftwerksfeuerungen kommen Ersatzbrennstoffe mit geringem Korrosionsrisiko in Frage, Ersatzbrennstoffe mit hohen Chlorgehalten scheiden somit aus. Ersatzbrennstoffe mit hohen Chlorgehalten (> 1 Ma.%) sind in der Grundstoffindustrie (z.B. Zement, *Chlorbypass*) im Hinblick auf die Einhaltung der Produktqualität und von Emissionen ebenfalls nicht erwünscht.

Aufgrund der komplexen Reaktionsmechanismen und der hohen Reaktionsbereitschaft von Chlor und seinen Verbindungen insbesondere mit Alkalien und Schwermetallen und dem sich daraus ergebenden Korrosionsrisiko kommen für die Nutzung von Ersatzbrennstoffen mit hohen Chlorgehalten – anorganisch wie organisch – im Wesentlichen nur

- Industrieheizkraftwerke, mit ähnlichen Dampfparametern und Korrosionsschutzmaßnahmen wie Abfallverbrennungsanlagen, ggf. mit Additiveinsatz und
- die weitere thermische Ersatzbrennstoffaufbereitung durch Pyrolyse, vorgeschaltet einem Kraftwerk

in Frage.

Mögliche Verfahrenskonzepte für Industrieheizkraftwerke sind z.B. [7]:

- Vergasungs-Nachverbrennungsverfahren
- Verbrennungs-Nachverbrennungsverfahren

jeweils mit

- Rostsystemen in der ersten Einheit und Brennkammersystem in der zweiten Einheit

oder

- Wirbelschichtsystemen in der ersten Einheit und Brennkammersystem in der zweiten Einheit.

Je nach Anlagentyp – Rost- oder Wirbelschichtsystem – sind selbstverständlich die Stückigkeit bzw. die Korngröße und die Korngrößenverteilung des Ersatzbrennstoffes anzupassen.

In diesem Beitrag sei beispielhaft auf die zirkulierende Wirbelschichtverbrennungsanlage Neumünster kurz eingegangen. Wirbelschichtsysteme sind auf einen aufbereiteten Brennstoff mit einer engen Kornverteilung und möglichst gleichmäßigem Fluidisierungsverhalten angewiesen, hinsichtlich des Heizwertes und der Elementarzusammensetzung besteht hingegen eine große Bandbreite, ebenso in Bezug auf das Lastverhalten von Wirbelschichtsystemen. Die Abmessungen der Einsatzstoffe hängen von der Größe der jeweiligen Anlage ab. In der Anlage in Neumünster können Ersatzbrennstoffen mit Abmessungen bis zu 250 mm und mit Heizwerten von 10 bis 20 MJ/kg bei einem Durchsatz von 10 bis 30 t/h eingesetzt werden. Weitere Angaben zu den Anforderungen an die Ersatzbrennstoffe sind in dem Bild 7 enthalten. Der Anteil an Störstoffen darf maximal 5 bis 6 Ma.-% betragen. In dieser Größenordnung können Störstoffe mit Abmessungen kleiner 250 mm über den Düsenboden abgezogen werden. Die Anlage erzeugt Dampf mit Dampftemperaturen von 470 °C bei einem Dampfdruck von 66 bar. Die Abgastemperaturen liegen bei Eintritt in den konvektiven Teil des Dampferzeugers unterhalb 580 °C [1]. Die Überhitzung des Dampfes in den abgasberührten Konvektionsheizflächen erfolgt nur bis etwa 400 °C, um das Korrosionspotenzial gering zu halten. Die Anlage ist mit einer Abgasreinigung gemäß der 17. BImSchV ausgerüstet.

Parameter	Einheit	Durchschnitt	Minimum	Maximum
Feuchte	Ma.-%	17,00	7,00	38,00
Kohlenstoff	Ma.-%	35,80	25,20	47,00
Wasserstoff	Ma.-%	5,10	3,60	6,50
Stickstoff	Ma.-%	0,80		1,00
Schwefel	Ma.-%	0,30		0,70
Chlor	Ma.-%	0,70		0,90
Sauerstoff	Ma.-%	22,10	15,50	28,00
Asche	Ma.-%	18,20	10,00	24,00
Heizwert	MJ/kg	14,50	10,00	20,00
Schüttdichte	kg/m ³	150,00	100,00	350,00
Korngröße	mm			250,00
Störstoffe	Ma.-%			6,00

Bild 7. Anforderungen an den Ersatzbrennstoff zum Einsatz für die zirkulierende Wirbelschicht-Beispiel Neumünster [2].

Weniger hohe Anforderungen an die Ersatzbrennstoffe werden beim Einsatz in eine Pyrolyse-Vorschaltanlage mit einem Drehrohr gestellt. Üblicherweise können dem Drehrohr stückige Einsatzstoffe mit Abmessungen bis zu 200 mm zugeführt werden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit durch Zugabe von Kalkadditiven Schadstoffe wie Chlor, Fluor und Schwefel einzubinden, weshalb für diese Komponenten im Vergleich zu dem direkten Einsatz (siehe oben) auch höhere Konzentrationen in den Ersatzbrennstoffen akzeptiert werden (siehe oben) [13], [17], [28]. Bei der Pyrolyse ist davon auszugehen, dass die Freisetzung mittel- bis schwerflüchtiger Schwermetalle in die Gasphase geringer ist als bei dem direkten Verbrennungsprozess, daher können die Ersatzbrennstoffe für die Pyrolyse-Vorschaltanlage auch einen höheren Gehalt an Schwermetallen im Vergleich zur direkten Mitverbrennung aufweisen. Das setzt allerdings voraus, dass nur das Pyrolysegas und nicht der nach der Pyrolyse verbleibende Restkoks dem Dampfererzeuger zugeführt wird. Damit ist in diesem Fall eine weitere, getrennte Behandlung des Restkokes erforderlich.

4 Energetische Bewertung von Konzepten mit Ersatzbrennstoffeinsatz

Die voran stehend genannten prinzipiellen Möglichkeiten, die für den Einsatz von Ersatzbrennstoffen mit hohem Chlorgehalt in Frage kommen:

- Industrieheizkraftwerke, mit ähnlichen Dampfparametern und Korrosionsschutzmaßnahmen wie Abfallverbrennungsanlagen, ggf. mit Additiveinsatz und
- die weitere thermische Ersatzbrennstoffaufbereitung durch Pyrolyse, vorgeschaltet einem Kraftwerk

werden nun beispielhaft im Hinblick auf die energetische Bewertung betrachtet.

Bewerten kann man technische Konzepte nur, wenn sie an einem Konzept, das als Referenz dient, gemessen werden (sog. *benchmarking*), wenn also ein Bewertungsmaßstab (sog. *benchmark*) als Vergleichsbasis vorliegt. Häufig muss für eine tragfähige Bewertung bzw. einen tragfähigen Vergleich erst ein geeignetes Referenzkonzept bzw. eine geeignete Referenzsituation (RS) definiert werden. Es ist dabei wichtig, dass man sowohl bei der Referenzsituation als auch bei der zu beurteilenden neuen bzw. veränderten Situation (allgemein Ersatzsituation (ES)) von der jeweils gleichen Menge und Art von Stoffen ausgeht und deren Wirkung anschließend vergleicht¹. Da man hier vom Eintritt zum Austritt geht, wird diese Betrachtung auch als so genannte Vorwärtsbetrachtung bezeichnet². 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 [26].

¹ 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.

² Es ist auch möglich den Vergleich mit einer so genannten Rückwärtsbetrachtung durchzuführen, d.h. mit einer Betrachtung die vom Austritt zum Eintritt führt.

4.1 Einsatz von Ersatzbrennstoff aus Restmüll in Industriekraftwerken

Die prinzipielle Vorgehensweise bei der energetischen Bewertung von Brennstoffsubstitutionen ist ausführlicher z.B. in [6], [25] und [26] dargestellt. In dem hier gesteckten Rahmen wird die Bewertung des Einsatzes von Ersatzbrennstoffen für die Erzeugung elektrischer und thermischer Energie, hier beispielhaft für ein Industriekraftwerk, zusammenfassend dargestellt (Bild 8 bis Bild 11).

Bild 8 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 nicht genutzt werden kann (z. B. bei sehr ungünstigem Standort, in Stadtrandlage, ohne Anbindung an industrielle Verbraucher, vgl. hierzu auch [24], [25]). In Bild 8 ist diese Energie daher als Verlust „über Dach“ gekennzeichnet. Der Anlagenverlust beträgt 4.000 MJ.

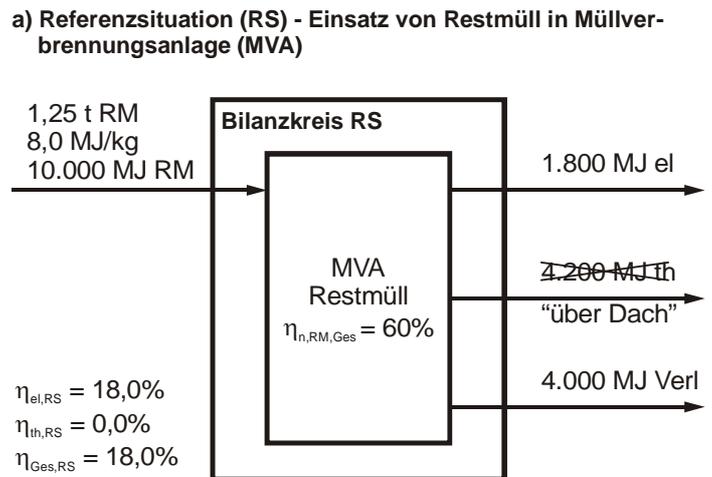


Bild 8. Einsatz von Ersatzbrennstoff aus Restmüll in Industriekraftwerken – Referenzsituation, vereinfachte Darstellung.

b) Ersatzsituation 1 (ES1) - Einsatz von Ersatzbrennstoffen in Industriekraftwerk (IKW)

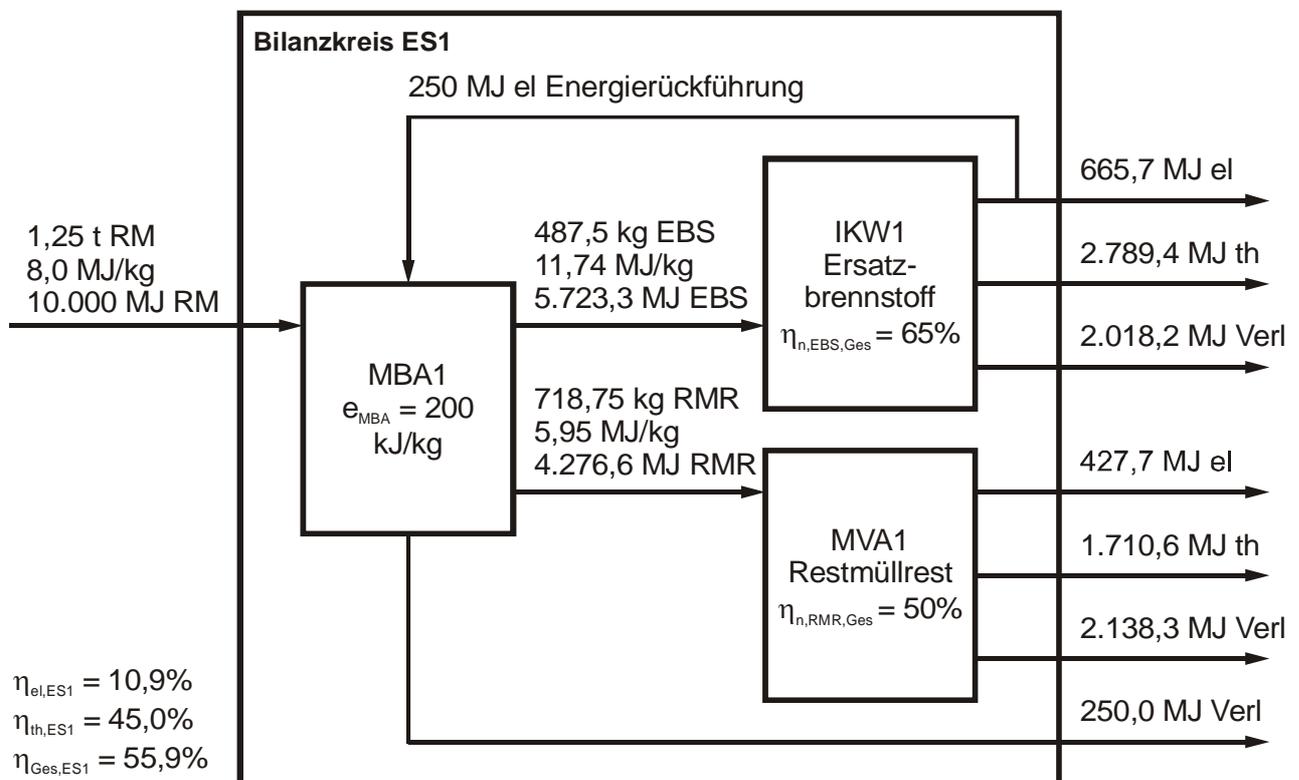


Bild 9. Einsatz von Ersatzbrennstoff aus Restmüll in Industriekraftwerken – Ersatzsituation 1 (ES1), vereinfachte Darstellung.

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 9 und Ersatzsituation 2 in Bild 10. In Abhängigkeit von dem jeweiligen Aufbereitungsverfahren entstehen dann neben den Ersatzbrennstoffen Reststoffe, die einer zusätzlichen thermischen Behandlung zugeführt werden müssen sowie Verluste³. Für die Industriekraftwerke IKW1 und IKW2 wurde hierbei ein unterschiedlicher (Netto-) Brennstoffnutzungsgrad ω bei gleicher Stromkennzahl σ gewählt [3], [20], [21]. Für das Gesamtverfahren, bestehend aus MBA, Industrieheizkraftwerk und MVA können dann für das hier dargestellte Beispiel Gesamtwirkungsgrade⁴ von

$$\eta_{Ges,ES1} = \eta_{el,ES1} + \eta_{th,ES1} = 55,9 \% \text{ bzw.}$$

$$\eta_{Ges,ES2} = \eta_{el,ES2} + \eta_{th,ES2} = 45,8 \% \text{ ermittelt werden.}$$

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

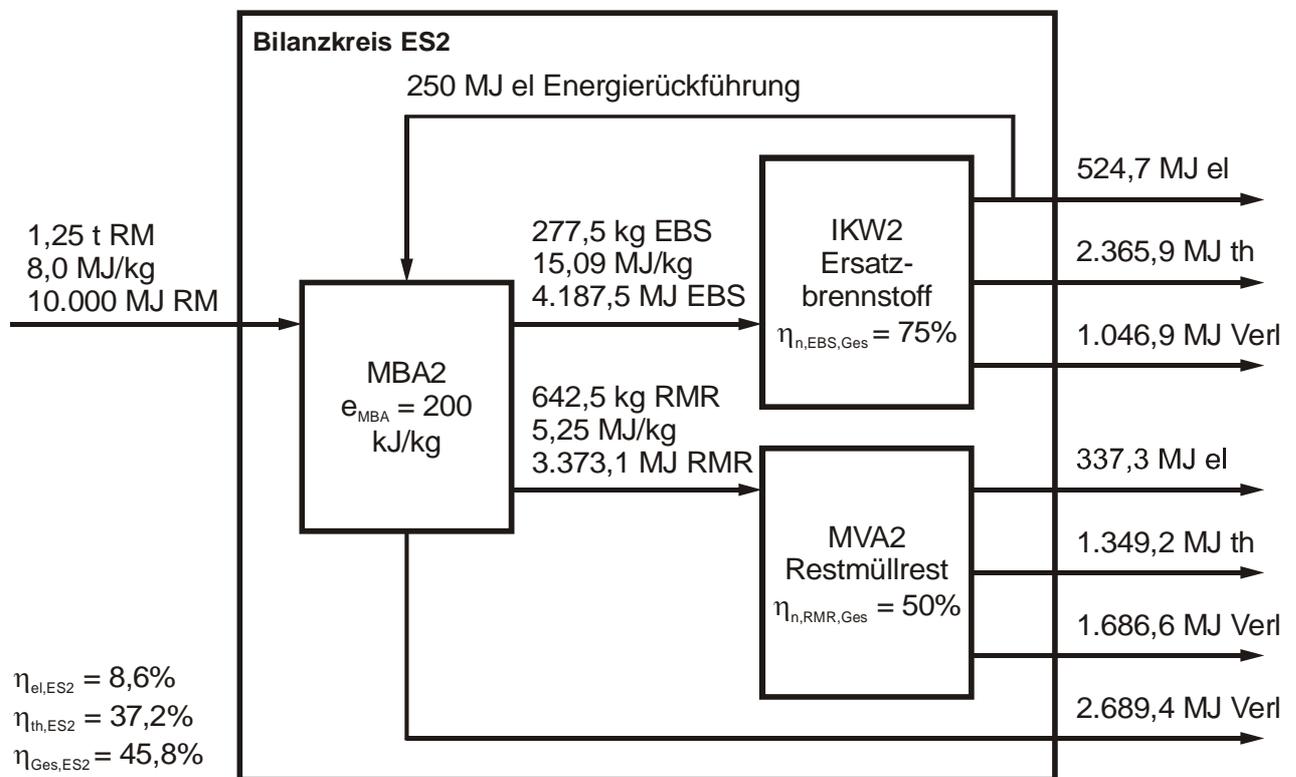


Bild 10. Einsatz von Ersatzbrennstoff aus Restmüll in Industriekraftwerken – Ersatzsituation 2 (ES2), vereinfachte Darstellung.

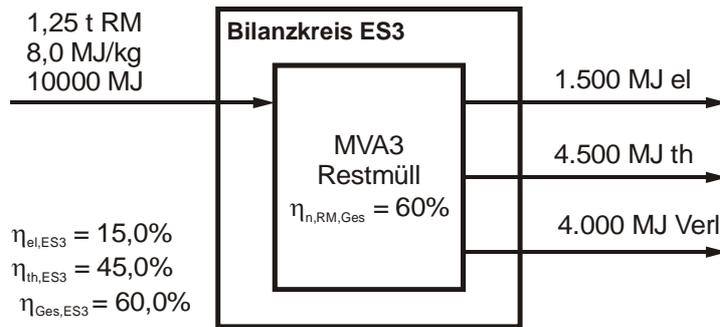
³ Bei der Aufbereitung MBA2 findet eine Langzeitrotte statt, um den Heizwert des Ersatzbrennstoffes weiter steigern zu können. Die Verluste (in die Atmosphäre) sind deshalb sehr viel höher als bei der Aufbereitung MBA1.

⁴ 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. [20], [21]). Dabei wird die Wertigkeit der einzelnen Energieformen nicht berücksichtigt.

Dem gegenüber lässt sich ein weiterer Vergleichsprozess definieren (Ersatzsituation 3, Bild 11), der eine Müllverbrennungsanlage „mit Standortvorteil“ darstellt, d. h., bei der die entstehende (nutzbare) thermische Energie tatsächlich vollständig genutzt wird. Für diese MVA 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 MVA

($\eta_{Ges,ES3} = 60,0\%$) stellt sich in dem Beispiel energetisch günstiger als die Ersatzsituation 1 und 2 dar, wobei

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



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

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

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

Werden mechanische bzw. mechanisch-biologische Aufbereitungsstufen verwendet, ist deshalb sehr genau zu prüfen ob das entstehende Gesamtverfahren energetisch tatsächlich günstiger ist als die jeweilige Referenzsituation.

Bild 11. Einsatz von Ersatzbrennstoff aus Restmüll in Industriekraftwerken – Ersatzsituation 2 (ES3), vereinfachte Darstellung.

4.2 Einsatz von aufbereitetem Restmüll zur Energieerzeugung

Die prinzipielle Vorgehensweise bei der energetischen Bewertung von Verfahren mit einem Pyrolyseprozess zur Ersatzbrennstoffaufbereitung ist in Bild 12 bis Bild 14 dargestellt. Bild 12 zeigt schematisch die gewählte Referenzsituation für die thermische Behandlung von 1,25 t Restmüll in einer Müllverbrennungsanlage (vgl. Abschnitt 4.1) und von 1,38 t Steinkohle in einem Kraftwerk. Die benötigte Menge Steinkohle ergibt sich aus der hier untersuchten Ersatzsituation 1 in Bild 13.

Bei dem Gesamtverfahren der Ersatzsituation 1 wird der in einer mechanisch-biologischen Aufbereitungsanlage (vgl. Bild 10) 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 Anwendungen wie z. B. [14],

a) Referenzsituation (RS) - Einsatz von Restmüll in einer Müllverbrennungsanlage (MVA) und Einsatz von Steinkohle in einem Kraftwerk (KW)

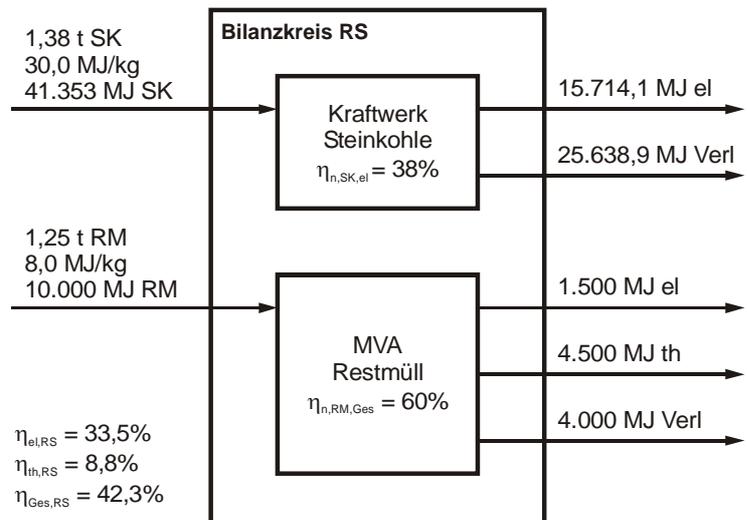
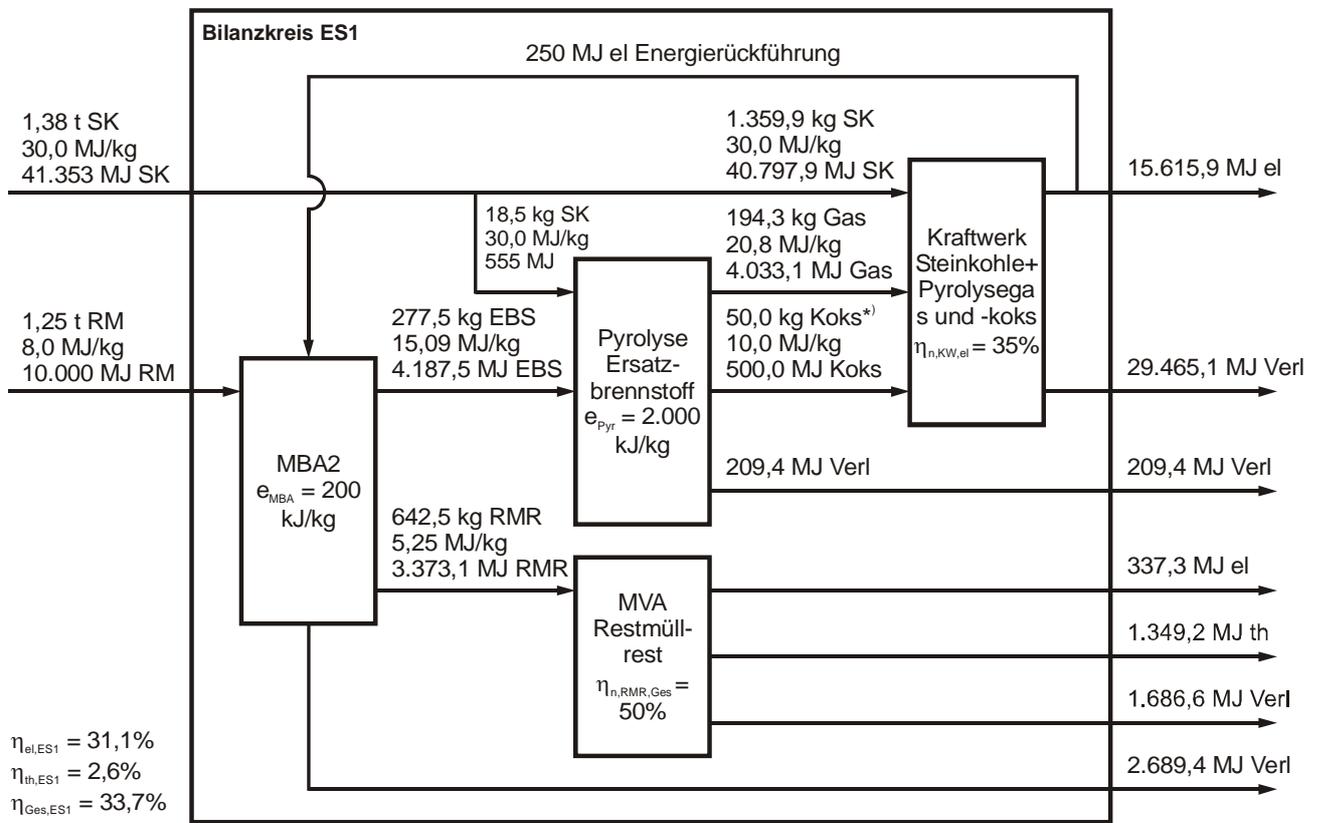


Bild 12. Einsatz von aufbereitetem Restmüll zur Energieerzeugung- Referenzsituation.

[29]). In dem Beispiel ergibt sich dann für das Gesamtverfahren der Ersatzsituation 1 ein Wirkungsgrad (elektrisch und thermisch) von $\eta_{Ges,ES1} = 33,7 \%$.

b) Ersatzsituation 1 (ES1) - Einsatz von aufbereitetem Restmüll zur Energieerzeugung



*) Koks nach mechanischer Aufbereitung, ca. 33 kg Inertstoffe hier nicht mit dargestellt

Bild 13. Einsatz von aufbereitetem Restmüll für die Energieerzeugung (Ersatzsituation 1, nach Pyrolyse), vereinfachte Darstellung.

Eine weitere Ersatzsituation 2 kann wie in Bild 14 dargestellt gebildet werden (für Daten zur Pyrolyse siehe konkrete Anwendungen wie z. B. [22]). 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 [26]) 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

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

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

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

Es ist jedoch wiederholt darauf hinzuweisen, dass die Bewertung von den jeweiligen Randbedingungen abhängig ist (hier insbesondere der Wirkungsgrad des Steinkohlekraftwerkes) 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 ein technisches *Benchmarking*. Dieses methodische Vorgehen ist unabhängig von den jeweils konkret vorliegenden Randbedingungen bzw. zu untersuchenden Verhältnissen.

c) Ersatzsituation 2 (ES2) - Einsatz von aufbereitetem Restmüll zur Energieerzeugung

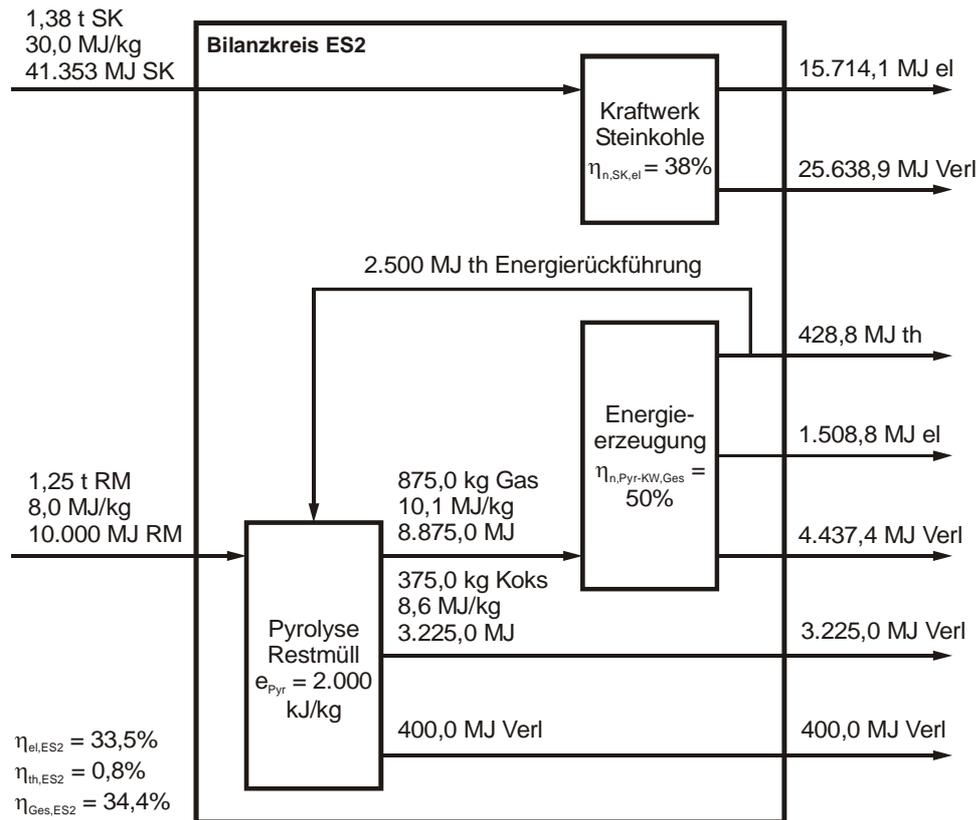


Bild 14. Einsatz von aufbereitetem Restmüll für die Energieerzeugung (Ersatzsituation 2, nach Pyrolyse), vereinfachte Darstellung.

5 Ausblick

Im Zusammenhang mit der Herstellung und Nutzung von Ersatzbrennstoffen sind noch eine Reihe von Entwicklungsaufgaben zu lösen.

Zunächst betrifft dies die brennstofftechnische Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen und die Wechselwirkung der Brennstoffeigenschaften mit den Haupteinflussgrößen des thermischen Prozesses insbesondere im Hinblick auf die Vermeidung von Verschmutzungen und Korrosionen. Hierfür sind geeignete Methoden zu entwickeln.

Weiter besteht die Aufgabe, durch die mechanische und mechanisch-biologische Abfallbehandlung mit nachfolgender Ersatzbrennstoffherstellung einen auf den jeweiligen Einsatzfall zugeschnittenen Ersatzbrennstoff zu erzeugen. Wichtig dabei ist die Durchführung von Massen-, Stoff- und Energiebilanzen für die Ersatzbrennstoffherstellung, da diese eine wesentliche Grundlage für die Optimierung darstellen.

Nicht nur der Ersatzbrennstoff selbst muss für den jeweiligen Prozess geeignet sein, es ist auch die Energiebilanz der gesamten Verfahrenskette dem Referenzfall (z.B. Abfallverbrennung) gegenüber zu stellen (*Benchmark*). Die gesamte Verfahrenskette schließt falls erforderlich auch die Entsorgung von aussortierten Fraktionen mit extrem hohen Schadstoffgehalten (u.a. Chlor, z.B. PVC-Fraktion) mit ein. Der energetische Nutzen ist bei diesen Teilprozessen i.d.R. sehr gering (vgl. Sonderabfallbehandlung, z.B. [23]).

Ein weiteres Entwicklungspotenzial steckt in der Optimierung der Anlagentechnik und dem gezielten Zusammenführen von Primärmaßnahmen (Prozessführung). Hierzu müssen Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienz und Korrosion (Verfügbarkeit, Betriebskosten) untersucht werden. Ein wesentliches Hilfsmittel hierfür stellen wiederum Bilanzen unmittelbar an den Anlagen (möglichst *online*, d.h. für die jeweils aktuellen Betriebszustände) dar.

6 Schrifttum

- [1] Anderl, H.; Offenbacher, E.: Thermische Verwertung von Ersatzbrennstoffen in der zirkulierenden Wirbelschicht. erschienen in: SIDAF, Schriftenreihe 18/2005. ISBN 3-934409-26-1, S. 103-110.
- [2] Anderl, H.; Offenbacher, E.: Verwertung von Sekundärbrennstoffen und Abfällen in der Wirbelschicht am Beispiel Neumünster. erschienen in: Wiemer, K.; Kern, M.: Bio- und Restabfallbehandlung IX – biologisch-mechanisch-thermisch. Witzenhausen 2005. ISBN 3-928673-45-9, S. 261-268.
- [3] Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft AGFW e.V. (Hrsg.): Arbeitsblatt 308 Zertifizierung von KWK-Anlagen – Ermittlung des KWK-Stromes. AGFW-Regelwerk, November 2002.
- [4] Bachhiesl, M.; Tauschitz, J.; Zefferer, H.; Zellinger, G.: Untersuchungen zur thermischen Verwertung von Biomasse und heizwertreichen Abfallfraktionen als Sekundärbrennstoffe in Wärmekraftwerken. Forschung im Verbund Schriftenreihe Band 73, 2001.
- [5] Barin, I.; Igelbüscher, A.; Zenz, F.-R. (ZEUS GmbH): Thermodynamische Analyse der Verfahren zur thermischen Müllentsorgung. Studie im Auftrag des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen, 1995.
- [6] Beckmann, M.; Scholz, R.: Energetische Bewertung der Substitution von Brennstoffen durch Ersatzbrennstoffe aus Abfällen bei Hochtemperaturprozessen zur Stoffbehandlung, Teil 1 und Teil 2, ZKG International, 52 (1999) Nr. 6, S. 287-303 und Nr. 8, S. 411-419.
- [7] Beckmann, M.; Thomé, K.J.: Das Ersatzbrennstoffproblem – Aufkommen, Charakterisierung und Einsatz – erschienen in: Thomé, K.J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe 5 – Herstellung und Verwertung- TK Verlag Thomé-Kozmiensky Neuruppin, 2005. ISBN 3-935317-20-4. S. 3-32.
- [8] Bieber, M.: Untersuchungen zur optimalen Verbrennung von Salzkohle in der stationären Wirbelschichtfeuerung. erschienen: TU Dresden 10.03.1992.
- [9] Born, M.: Rauchgasseitige Dampferzeugerkorrosionen (Erfahrungen bei der Schadensminderung). Freiberg: Verlag SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH 2003, ISBN 3-934409-20-2.
- [10] Born, M. (Hrsg.): Dampferzeugerkorrosion. Freiberg: Verlag SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH 2005, ISBN 3-934409-27-X.
- [11] Clausen, J. Chr.; Schmidt, E. R.: Specifications for Solid Biofuels in Demark. erschienen in: Institut für Energiewirtschaft und rationelle Energieanwendung Universität Stuttgart - IER (Hrsg.): Biomasse als Festbrennstoff. Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe", Landwirtschaftsverlag GmbH Münster, ISBN: 3-7843-2821-0.
- [12] Eckardt, S.: Anforderungen an die Aufbereitung von Siedlungs- und Produktionsabfällen zu Ersatzbrennstoffen für die thermische Nutzung in Kraftwerken und industriellen Feuerungsanlagen. Schriftenreihe des Instituts für Abfallwirtschaft und Altlasten der

- Technischen Universität Dresden. Beiträge zu Abfallwirtschaft/Altlasten, Bd. 41. 2005, ISBN 3-934253-34-2.
- [13] Fontana, A.; Laurant, Ph.; Jung, C.G.; Gehrman, J.; Beckmann, M.: Municipal waste pyrolysis: 2. Chlorine capture by addition of calcium and sodium-based sorbents. Erdöl-Erdgas-Kohle, 117. Jhg., Heft 2001.
- [14] Hauk, R. et al.: ConTherm - Thermische Abfallverwertung im Kraftwerk durch kraftwerksintegrierte Pyrolyse von heizwertreichen Ersatzbrennstoffen. VGB PowerTech 7/2004, S. 66-71.
- [15] Heyde, M.; Thiele, A.; Wiethoff, S.: Qualitätssicherungsmaßnahmen für Vorprodukte aus gemischten Abfallquellen. erschienen in: Thomé-Kozmiensky, K.J. (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe 4 – Optimierung der Herstellung und der Verwertung. TK Verlag Thomé-Kozmiensky Neuruppin 2004, ISBN 3-935317-18-2, S. 255-266.
- [16] Knümann, R.; Schleussner, M.; Bockhorn, H.: Untersuchungen zur Pyrolyse von PVC und anderen Polymeren. VDI Berichte Nr. 922, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf 1991, ISBN 3-18-090922-6, S. 237-246.
- [17] Laurant, Ph.; Jung, C.G.; Gehrman, J.; Beckmann, M.; Fontana, A.: Municipal waste pyrolysis: Chlorine capture by addition of calcium and sodium-based sorbents. Proc. INFUB 2000, 5th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Porto, Portugal, 11.-14. April 2000.
- [18] Liu, K.; Pan, W.-P.; Riley, J. T.: An Atmospheric Pressure Fluidized Bed Combustion System Burning High-Chlorine Coals in the Convection Section. Published in: Corrosion-March 2000, NACE International, Corrosion – Vol. 56, No. 3. Page: 298 – 306.
- [19] Metschke, J.; Spiegel, W.: Systematisierung und Bewertung von verfügbaren Maßnahmen zur Korrosionsminderung in der betrieblichen Praxis von MVA mittels partikel-förmiger Rauchgasbestandteile. Endbericht EU 22, 12/2004, im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz unter Beteiligung des Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE), verfügbar unter www.chemin.de.
- [20] Richtlinie VDI 4660 Blatt 2: Ermittlung zielenergiebezogener Emissionen bei der Energieumwandlung. Beuth-Verlag GmbH Berlin, Mai 2003.
- [21] Richtlinie VDI 4661: Energiekenngrößen – Definitionen – Begriffe – Methodik. Beuth-Verlag GmbH Berlin, September 2003.
- [22] Schmidt, R.: Restmüll-Pyrolyseanlage Burgau. Informationsbroschüre zu der Pyrolyseanlage.
- [23] Scholz, R.; Beckmann, M., Schulenburg, F.; Brinker, W.: Thermische Rückstandsbehandlungsverfahren – Aufteilung in Bausteine und Möglichkeiten der Bilanzierung. Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK), Bd. 46, Nr. 11/12, 1994, S. 469-482.
- [24] Scholz, R.; Beckmann, M.; Harnaut, T.; Horeni, M.: Zur systematischen Bewertung der Energieumwandlung bei der thermischen Abfallbehandlung. erschienen in: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 1. TK Verlag Thomé-Kozmiensky Neuruppin 2004, ISBN: 3-935317-16-6. S. 203-235.
- [25] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren. B.G. Teubner, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden. 2001. ISBN 3-519-00402-X.

- [26] Scholz, R.; Beckmann, M.; Horeni, M.: Energetische Bewertung von Konzepten zur Substitution von fossilen Brennstoffen. erschienen in: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 3. TK Verlag Thomé-Kozmiensky Neuruppin 2006, ISBN: 3-935317-21-2, S. 509-535.
- [27] Scholz, R.; Jeschar, R.; Malek, C.; Faatz, O.: Betriebserfahrungen zur Schwefeleinbindung auf dem Rost eines Müllheizkraftwerkes. Forum Städte-Hygiene 41(1990) Nr. 6, 316-319.
- [28] Schu, R.; Busack, O.: Thermische Ersatzbrennstoffkonditionierung durch Pyrolyse. erschienen in: Thomé-Kozmiensky, K. J.: Ersatzbrennstoffe 4 – Optimierung der Herstellung und der Verwertung. TK Verlag Thomé-Kozmiensky Neuruppin 2004, ISBN 3-935317-18-2, S.427-440.
- [29] 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, ISBN: 3-00-003384-X.
- [30] Spiegel, W.; Herzog, Th.; Magel, G.; Müller, W.; Schmidl, W.: Belagsgeschichten. Vortrag am 2. Diskussionsforum „Rauchgasseitige Dampferzeugerkorrosion“ in Freiberg, 2005, verfügbar unter www.chemin.de.
- [31] Spiegel, W.; Herzog, Th.; Magel, G.; Müller, W.; Schmidl, W.: Dynamische chlorinduzierte Hochtemperaturkorrosion von Verdampfer- und Überhitzerbauteilen aufgrund spezieller Belagsentwicklungen: Häufiger Befund in Abfall- und Biomasse-gefeuerten Dampferzeugern. VGB PowerTech, Heft 1/2, 2005, S. 89-97.
- [32] Steinbrecht, D.; Neidel, W.: Verbrennung von BRAM in der stationären Wirbelschicht. 4. Dialog Abfallwirtschaft M-V, 21.06.2001 Rostock.
- [33] Thomé, E.: Energetische Verwertung von Ersatzbrennstoffen in einem umgebauten Kraftwerkskessel. erschienen in: Thomé-Kozmiensky, K.J.: Ersatzbrennstoffe 2 – Verwerter, Qualitätskontrolle, Technik, Wirtschaftlichkeit. TK Verlag Thomé-Kozmiensky Neuruppin 2002, ISBN: 3-935317-08-5, S. 210-211.
- [34] Umweltbundesamt (Hrsg.): Möglichkeiten der Kombination von mechanisch-biologischer und thermischer Behandlung von Restabfällen. im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung BMBF, 1998.
- [35] Vehlow, J.; Hunsinger, H.: Einfluss verschiedener Abfallmenüs auf die Metallfreisetzung bei der Verbrennung auf dem Rost. BAT- und preisorientierte Dioxin-/Gesamtemissionsminimierungstechniken 2000. VDI Bildungswerk Seminar 43-59-12 am 14.09.-15.09.2000 in München.