

Verhalten von Ersatzbrennstoffen in dafür konzipierten Industriekraftwerken – Verbrennungsverhalten, Emissionen, anlagentechnische Lösungsansätze –

Hans-Peter Aleßio

1.	Einführung	885
2.	Brennstoffcharakterisierung	888
3.	Verbrennungsverhalten	892
4.	Auswirkungen auf den Anlagenbetrieb	896
5.	Mögliche Maßnahmen	897
6.	Fazit.....	898
7.	Literatur.....	898

1. Einführung

Obwohl die Menschheit das Feuer als Segen oder Schrecken seit Jahrtausenden kennt, ist der physikalisch-chemische Vorgang der Verbrennung noch recht wenig wissenschaftlich durchdrungen. (W. Boie, 1901-1978)

Einem alten Sprichwort zufolge gibt es keinen Rauch ohne Feuer. Die Pyromanen unter uns wissen aber auch, dass es kein Feuer ohne Brennstoff gibt. Seit Menschengedenken sind Feuer und damit die Brennstoffe eine Antriebsfeder zur Weiterentwicklung. Dabei standen zunächst Holz und im Zuge der Industrialisierung zunehmend fossile Brennstoffe (Kohle, Öl, Erdgas) im Fokus.

Gemäß der VDI 3459 (Entwurf) ist ein Brennstoff ... *ein Stoff, dessen gespeicherte chemische Energie sich durch Oxidation in Form einer thermo-chemischen Umsetzung in eine andere Energieform umwandeln lässt und für den diese Umwandlung beabsichtigt ist* Das heißt nicht alles was brennt, ist ein Brennstoff im Sinne dieser Richtlinie. Ein Brennstoff ist erst dann ein Brennstoff, wenn der Verwendungszweck die Verbrennung selbst ist. Der Weihnachtsbaum ist somit – zumindest solange er geschmückt ist – kein Brennstoff, auch wenn es immer wieder Wohnungsbrände durch Unachtsamkeit beim Umgang mit seinen Kerzen gibt.

Abfälle, allgemeinsprachlich auch Müll, ...*sind alle Stoffe oder Gegenstände, derer sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss.* ... (KrWG §3, Abs. 1). Es sind zunächst einmal also keine Brennstoffe.

Die Motivation zur Verbrennung von Müll war lange Zeit die Entsorgung. Mit zunehmendem Wohlstand ist der Müll jedoch immer energiereicher geworden, so dass die Erzeugung von elektrischer Energie, Prozesswärme für industrielle Zwecke oder auch Fernwärme aus Abfällen an Bedeutung gewonnen hat. Umweltpolitische Vorgaben (Deponieverbot, Klimaschutz) schafften weitere Anreize zur Steigerung der Attraktivität von abfallbasierten Brennstoffen. Neben der thermischen Nutzung der Abfälle rückte auch zunehmend die stoffliche Nutzung der darin befindlichen Fraktionen in den Blickwinkel (neudeutsches Stichwort: Urban Mining). Aus dem schmutzbehafteten Umgang mit Unrat ist ein technologisch und wirtschaftlich bedeutsamer Kreislaufprozess mit dem Wirtschaftsgut Abfall geworden. Dem Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) vom 24.02.2012 ist Nachstehendes zu entnehmen:

Zweck des [Kreislaufwirtschafts-]Gesetzes ist es, die Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen zu fördern und den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen sicherzustellen. (KrWG §1)

Verwertung im Sinne dieses Gesetzes ist jedes Verfahren, als dessen Hauptergebnis die Abfälle innerhalb der Anlage oder in der weiteren Wirtschaft einem sinnvollen Zweck zugeführt werden, indem sie entweder andere Materialien ersetzen, die sonst zur Erfüllung einer bestimmten Funktion verwendet worden wären, oder indem die Abfälle so vorbereitet werden, dass sie diese Funktion erfüllen. (KrWG §3, Abs. 23)

Die Abfalleigenschaft eines Stoffes oder Gegenstandes endet, wenn dieser ein Verwertungsverfahren durchlaufen hat und so beschaffen ist, dass

- 1. er üblicherweise für bestimmte Zwecke verwendet wird,*
 - 2. ein Markt für ihn oder eine Nachfrage nach ihm besteht,*
- ... (KrWG §5, Abs. 1)

Zurückkommend auf das oben genannte Beispiel bedeutet dies, dass der Weihnachtsbaum, wenn er nach Weihnachten nicht mehr benötigt wird – also Abfall ist – direkt in einer Abfallverbrennungsanlage verwertet (verbrannt) und die Energie dort genutzt werden kann (KrWG § 3, Abs. 23) oder so aufbereitet (z.B. zerkleinert) wird, dass er als Ersatzbrennstoff vermarktet werden kann. Der Ersatzbrennstoff „gehäckselter Weihnachtsbaum“ ist dann definitionsgemäß kein Abfall mehr (KrWG § 5), sondern ein handelbares Wirtschaftsgut.

Die bei der Verbrennung von Müll gesammelten Erfahrungen standen zunächst im Zeichen der Entsorgungssicherheit und in der Vermeidung von Emissionen. Damit verbunden begann der Kampf gegen Korrosion und Belagsbildung, damit die Anlagen(bestandteile) über eine möglichst hohe Verfügbarkeit und eine möglichst lange Lebensdauer verfügten. Dies betraf sowohl die Entwicklung von Schutzmaterialien (Keramik, Cladding) als auch die von Betriebsweisen (Temperaturen, Drücke, Geschwindigkeiten, Verweilzeiten, Luftüberschusszahlen).

Durch Aufbereitung (Sortierung, Zerkleinerung, Trocknung, Ausschleusung von Störstoffen) entstanden zunächst Brennstoffe wie BRAM (BRennstoff Aus Müll), RDF (Refuse Derived Fuel) und schließlich die Ersatzbrennstoffe (EBS). Der Name ist Programm: Ersatzbrennstoffe sollen fossile Brennstoffe ersetzen. Dies kann zum Beispiel durch Mitverbrennung in bestehenden Kohlekraftwerken, bei der Zementherstellung und bei der Erzeugung von Metallen geschehen. Dieser Beitrag konzentriert sich jedoch auf die Verbrennung von Ersatzbrennstoffen in eigens dafür konzipierten Kraftwerken.

Wie schon das *ursprüngliche* Material *Abfall* zeichnet sich das daraus gewonnene Wirtschaftsgut *Ersatzbrennstoff* durch eine enorme Bandbreite aus. Hinzu kommt, dass der Begriff Ersatzbrennstoff nicht geschützt oder wenigstens allgemeingültig definiert ist und daher jeder aufbereitete, brennbare Abfall unabhängig von seinem Heizwert und seiner Zusammensetzung als Ersatzbrennstoff bezeichnet werden kann. Der Mindestheizwert von 11 MJ/kg gilt zumindest bis 2016 nur für die energetische Verwertung von Abfällen, die aber Ersatzbrennstoffe definitionsgemäß nicht mehr sind.

Die Aufbereitungsschritte und damit die Abfallqualität unterscheiden sich hinsichtlich des technologischen Aufwandes und daher auch hinsichtlich der Aufbereitungskosten. Manchmal handelt es sich lediglich um zerkleinerten Abfall, manchmal um die Fraktionen aus einer mechanisch-biologischen Aufbereitungsanlage und zum Teil wird ein eigenständiger aufwändiger Sortier- und Aufbereitungsprozess vorgeschaltet.

In diesen Aufbereitungsprozessen können Störstoffe hinsichtlich ihrer

- mechanischen Eigenschaften (zum Beispiel Übergrößen),
- Verbrennungseigenschaften (zum Beispiel explosionsfähige Güter) oder
- anderweitigen Verwertung (Metalle, Kompost, ...)

ausgeschleust werden. Ziel eines solchen Aufbereitungsprozesses ist häufig auch eine Homogenisierung der Abfälle zumindest hinsichtlich Heizwert, Asche- und Wassergehalten. Auch Schadstoffpotentiale (wie auch immer definiert) können durch eine Aufbereitung *eingestellt* werden, indem entsprechende Anteile aussortiert oder mit anderen Abfällen verschnitten werden.



Bild 1: Grobkornfraktion eines Ersatzbrennstoffes



Bild 2: Feinkornfraktion eines Ersatzbrennstoffes

Häufig ist ein Trocknungsprozess Bestandteil der Aufbereitung, um die Abfälle besser zerkleinern und sortieren zu können.

Die Erwartungen an die Brennstoffe und an die Kraftwerksanlagentechnik waren gewaltig. So wurden die Ersatzbrennstoffe als eine Art Braunkohle betrachtet. Es war beispielsweise die Rede davon, dass *in dieser Anlage nicht irgendein Abfall verbrannt wird, sondern hochwertige Ersatzbrennstoffe*. Dementsprechend sah die Anlagenkonzeption häufig höhere Frischdampfparameter oder auch längere Reisezeiten vor. Effizienzsteigerung und die (vermeintliche) Erhöhung der Wirtschaftlichkeit des Anlagenbetriebs verdrängten die langjährigen Erfahrungen aus der Abfallverbrennung.

Mittlerweile ist die Ersatzbrennstoffeuphorie durch die Realität eingeholt und teilweise leider auch ernüchtert worden. Aber auch selbst die Anlagen, die konservativ (= wie Müllverbrennungsanlagen) konzipiert wurden und bei denen auch der Ersatzbrennstoff weiterhin als Abfall gesehen wurde, zeigen ungeahnte Probleme. Daher erscheint es angebracht, sich sowohl mit dem Brennstoff als auch mit seinem Verbrennungsverhalten zu beschäftigen.

2. Brennstoffcharakterisierung

Üblicherweise wird das Brennstoffband, gleich ob Abfall- oder EBS-Verbrennungsanlage, im Feuerungsleistungsdiagramm definiert.

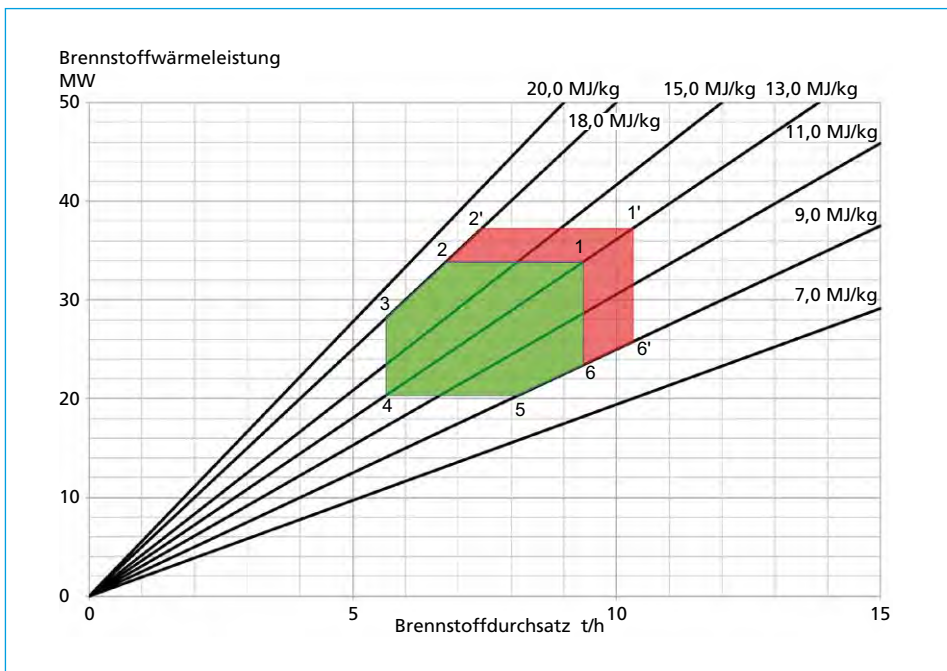


Bild 3: Feuerungsleistungsdiagramm

Desweiteren werden häufig auch Angaben zu den Wasser- und Aschegehalten gemacht. Diese können in dem Abfalldreieck nach Hämmerli anschaulich dargestellt werden.

Das Dreieck basiert auf einem einfachen Brennstoffmodell bestehend aus Wasser (blaue Linien), Asche (schwarze Linien) und den restlichen Bestandteilen zusammengefasst als Brennbare*^{*}. Es gilt also

$$\text{Asche} + \text{Wasser} + \text{Brennbare}^* = 1$$

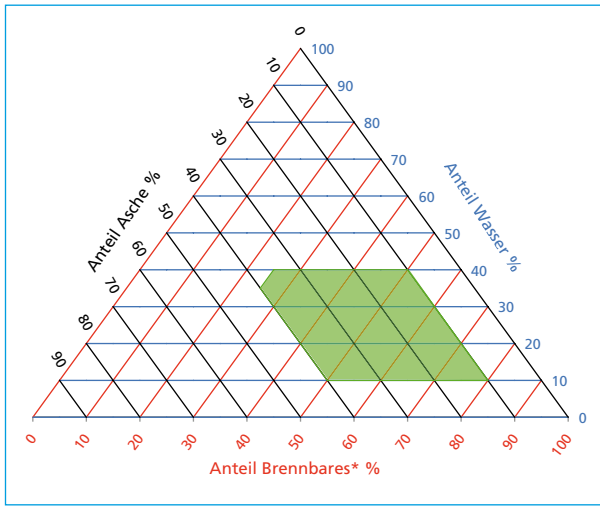


Bild 4:

Abfalldreieck nach Hämmerli

Im nebenstehenden Beispiel sind der Asche- und der Wassergehalt auf eine Bandbreite von 10 bis 40 % beschränkt. Darüber hinaus dürfen die Asche- und Wasseranteile in Summe 75 % nicht überschreiten (→ Anteil Brennbare* \geq 25 %)

Es gibt zwar keine unmittelbare Beziehung zwischen den Größen im Feuerungsleistungsdiagramm und im Abfalldreieck, für Hausmüll existieren jedoch empirische Beziehungen zwischen der elementaren Zusammensetzung und dem Heizwert im asche- und wasserfreien Zustand.

Das folgende Beispiel veranschaulicht, dass alleine die Angabe von Heizwerten und der Asche- und Wassergehalte nicht ausreicht, um den Brennstoff hinsichtlich seines Verbrennungsverhaltens oder gar der Effizienz des Verbrennungsprozesses (Ausbrandqualität, Feuerungsverluste, ...) zu beurteilen:

Hausmüll mit einem Heizwert von 10 MJ/kg gilt als unbedenklich hinsichtlich seines Verbrennungs- und Ausbrandverhaltens. Hochkalorische Kunststoffe zeigen hingegen ein anderes Verhalten. Verpackungsfolien bestehen zum Beispiel häufig aus Polyethylen (PE, Summenformel: $[-\text{H}_2\text{C}-\text{CH}_2-]_n$). Definitionsgemäß ist Polyethylen sowohl wasser- als auch aschefrei (waf). Dieses Material zeichnet sich durch seine nahezu vollständige Umsetzung zu CO_2 und H_2O bei der Verbrennung aus und bildet – im Gegensatz zu vielen anderen Kunststoffen wie etwa PVC – keine giftigen Stoffe bei der Verbrennung. Aus diesem Grunde wurden diese Folien auch eine Zeit lang als umweltfreundlich beworben. Durch Zumischungen von Inertmaterialien (Erhöhung des Ascheanteiles a) und Wasser (Anteil w) kann der Mischheizwert H_i beeinflusst werden.

$$H_i = (1 - a - w) H_{i,waf} - wr$$

Im Extremfall könnten dann aus 1 kg Kunststofffolien aus Polyethylen mit einem Heizwert von etwa 40 MJ/kg mit 3 kg *Asche* (z.B. Kieselsteine) oder mit 2,4 kg Wasser oder einer Mischung von beiden ein Mischbrennstoff mit einem Heizwert von 10 MJ/kg hergestellt werden. Der Wasseranteil ist etwas kleiner, weil die Verdampfungswärme $r = 2.500 \text{ kJ/kg}$ berücksichtigt werden muss. Diese Brennstoffherstellung wäre zwar ökonomisch, ökologisch und wie nachstehend gezeigt auch verbrennungstechnisch mehr als grober Unfug, aber der Brennstoff passt durchaus in die im Abfalldreieck definierten Grenzen. Lediglich die Berechnung der elementaren Zusammensetzung mit den für Hausmüll definierten Formeln ist wegen des hohen asche- und wasserfreien Heizwertes (40 MJ/kg) nicht mehr zulässig. Da aber die Zusammensetzung von Polyethylen bekannt ist, wäre dies verschmerzbar.

Aber ändert sich das Verbrennungsverhalten von hochkalorischen Kunststoffen, nur weil ein Stein nebenan liegt? Oder kann die Kunststoffolie überhaupt genug Wasser aufnehmen, damit Wasser und Kunststoff auch gemeinsam in die Brennkammer gelangen? Diese Fragen sind eindeutig mit NEIN zu beantworten.

Es müssen daher weitere Kenngrößen zur Prognostizierung des Verbrennungsverhaltens herangezogen werden. Naheliegend ist die Immediatanalyse, welche auch bei fossilen Brennstoffen bekannt ist. Hierbei wird der brennbare Anteil in die Flüchtigen und den festen Kohlenstoff (C_{Fix}) unterteilt.

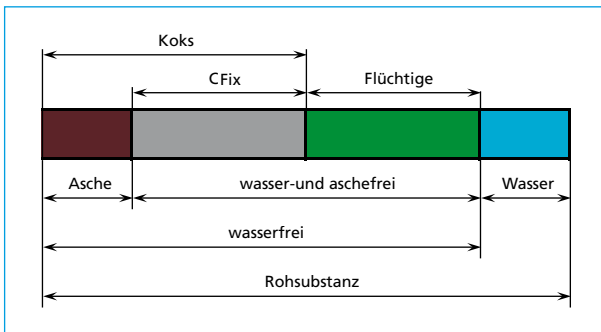


Bild 5:

Immediatanalyse

Bild neu erstellt auf Basis von:
 Klasen, T.: Erstellung und Validierung eines mathematischen Modells für die heterogene Verbrennung auf dem Müllrost, Dissertation 2003

Bei den Flüchtigen handelt es sich um die brennbaren Bestandteile, die bei der Erwärmung aus dem festen Brennstoff ausgasen und insofern den Verbrennungsvorgang stark beeinflussen (siehe Kapitel (3.)). Diese werden ermittelt, in dem eine Brennstoffprobe unter Sauerstoffausschluss schrittweise auf 900 °C erwärmt wird und die dabei freigesetzten gasförmigen Produkte erfasst und analysiert werden. Vom Gesamtheizwert (asche- und wasserfrei) her betrachtet ist der Vergleich von Ersatzbrennstoffen mit einer Braunkohle durchaus zulässig. Betrachtet man jedoch die Verteilung der Brennstoffenergie auf Flüchtige und den fixen Kohlenstoff, zeigt sich, dass etwa 80 % der Brennstoffenergie des Ersatzbrennstoffes in den Flüchtigen enthalten sind. Bei der Kohle beträgt der energetische Anteil der Flüchtigen etwa 50 %. Untersuchungen von Marzi [1] haben zudem gezeigt, dass 95 % der Flüchtigen eines Ersatzbrennstoffes

bereits bei 400 °C ausgegast sind, bei der Braunkohle sind es nur 60 % und das bei dem ohnehin geringeren Gesamtgehalt. Dies bedeutet, dass bei dem untersuchten Ersatzbrennstoff $0,8 \cdot 0,95 = 76 \%$ des Energiegehaltes bei 400 °C bereits ausgegast sind, bei Braunkohle sind es nur $0,5 \cdot 0,6 = 30 \%$. Entsprechend schneller (spontaner) läuft der Verbrennungsprozess mit Ersatzbrennstoffen ab.

Neben dem Verbrennungsverhalten an sich, ist auch das Bildungspotential von Schadstoffen, die sich hinsichtlich der Emission in die Umwelt, der Neigung zur Verschlackung und unerwünschten Belagsbildung sowie der Korrosion und damit der Lebensdauer der Anlage mehr oder weniger negativ auswirken können, von Interesse. Häufig wird daher der Gehalt von bestimmten Komponenten (z.B. Chlor) zur Charakterisierung des Brennstoffes herangezogen. Hierbei wird jedoch vernachlässigt, dass die Anwesenheit eines bestimmten Elements weniger über sein Verhalten aussagt, als zum Beispiel dessen chemischer Einbindung. Beim Durchlaufen des Abgasweges von der Feuerung durch den Kessel kühlt das Abgas und dessen Bestandteile ab und es ergeben sich immer wieder neue Randbedingungen unter denen die einzelnen im Abgas enthaltenen Stoffe beziehungsweise Elemente neue Verbindungen, welche dann ebenfalls ein unterschiedliches „Schadstoffpotential“ haben, eingehen können. Man könnte dies als instationäres Ungleichgewicht bezeichnen, während vielfach fälschlicherweise vereinfachend von Gleichgewichtszuständen ausgegangen wird. So sind auch die Angaben einzelner Inhaltsstoffe wie z.B. Schwer-, Alkali- oder Erdalkalimetallen oder auch das Chlor-Schwefelverhältnis ein Indiz für ein mögliches Korrosionspotenzial – aber leider nicht mehr. Es können daraus alleine keine definitiven Aussagen über das Verhalten im Anlagenbetrieb gezogen werden.

In den vorherigen Abschnitten wurde versucht den Brennstoff durch seinen Energieinhalt und seine chemische Zusammensetzung zu charakterisieren. Nicht mindermäßig sind auch rein physische Eigenschaften wie die Abmessungen und die Dichte oder auch Porosität von Bedeutung. Unter Dichte wird in diesem Zusammenhang ein Maß der reaktiven Oberfläche verstanden. Erfahrungsgemäß brennen Holzscheite besser als (dickere) Äste oder gar Baumstämme. Auch von Telefonbüchern (zumindestens denen von Großstädten) ist bekannt, dass sie in einer Abfallverbrennungsanlage nur ein wenig ankokeln, während einzelne Blätter ganz leicht verbrennen. In Abhängigkeit der Ersatzbrennstoffquelle und der vorhergehenden Aufbereitungsschritte ergeben sich mehr oder weniger gleichförmige Abmessungen. Bei einer nur groben Zerkleinerung sind die Abmessungen derart unterschiedlich, dass eine Körnungsverteilung, die sich alleine auf den Durchmesser bezieht, nicht mehr aussagefähig ist. Es versteht sich von selbst, dass würfel- oder kugelförmige Brennstoffe ein anderes Abbrandverhalten besitzen als dünne Partikel mit gleichem Volumen, deren Ausdehnung in einer Richtung sehr gering ist. Es hat sich eingebürgert, die Brennstoffe durch ihre Kantenlängen (Breite, Länge, Höhe) oder durch deren Summe zu charakterisieren. Denkbar wäre auch die Verwendung des aus der Strömungsmechanik bekannten hydraulischen Durchmesser $d = 4 V/A$.

Aber nicht nur alleine die Körnung des Brennstoffes (wie auch immer definiert) beeinflusst den Staubeintrag und infolgedessen das Verbrennungsverhalten sowie das Betriebsverhalten einer Anlage. Kunststoffe, die beispielsweise zu Dekorationszwecken

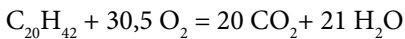
eingesetzt werden, PVC-Ummantelungen von Kabeln und auch Baumaterialien auf Kunststoffbasis enthalten häufig gipsartige Füllstoffe, die als Brandhemmer dienen oder auch nur als preiswerter Materialeinsatz (häufig Calciumcarbonat). Papier enthält ebenfalls große Mengen an Füllstoffen (z.B. Calciumcarbonat, Kaolin oder auch Titandioxid) damit es weißer, glatter und leichter bedruckbar wird. Diese Füllstoffe sind zwar zum Beispiel in die Kunststoffmatrix eingebunden und somit „unsichtbar“. Da die Matrix bei der Verbrennung zerstört wird (werden muss), werden diese Füllstoffe als feine Partikel freigesetzt und gelangen mit den Schwel- und Abgasen in die dem Feuerraum nachgeschalteten Kesselzüge.

3. Verbrennungsverhalten

Wie bereits geschildert hat das Verbrennungsverhalten eines Brennstoffes maßgeblichen Anteil an der Bildung von Schadstoffpotentialen. Um diese charakterisieren zu können, muss zunächst einmal der Verbrennungsprozess detaillierter betrachtet werden.

Auch wenn offenes Feuer weitestgehend aus unserem Alltag verschwunden ist, gehen wir davon aus, dass uns der Verbrennungsvorgang vertraut ist. Aber alleine schon bei der Betrachtung einer brennenden Kerze stellt sich heraus, dass die Abläufe vielleicht doch komplexer sind, wie zunächst vermutet.

Kerzenwachs besteht aus Paraffin ($C_{20}H_{42}$) und kann bei der Verbrennung unter Sauerstoffzufuhr vollständig zu CO_2 und H_2O verbrannt werden. Die Bruttoreaktionsgleichung bei der stöchiometrischen Oxidation von Paraffin



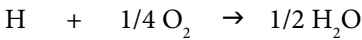
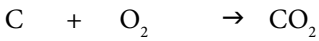
sagt aber nichts über den Reaktionsweg aus. Dieser ist wesentlich komplexer und besteht aus zahlreichen hier nicht weiter erläuterten Einzelreaktionen.

Der Heizwert von Paraffin beträgt 45 MJ/kg und ist somit höher wie der von Heizöl. Aber dennoch lässt sich Wachs nicht einfach so entzünden oder verbrennen, wie man es mit ein paar Kerzenresten leicht ausprobieren kann. Damit das Wachs verbrannt werden kann, muss es zuerst in den flüssigen (Schmelze) und dann in den gasförmigen Zustand gebracht werden. Die langkettigen Paraffine zerlegen sich dabei in kürzere Kohlenwasserstoffketten, welche dann leichter oxidiert werden können.

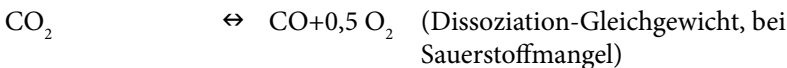
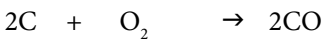
Das uns geläufige Flammenbild ist somit stark durch die Flüchtigen geprägt. Die eigentliche Feststoffverbrennung kann aber auch bei der Kerzenflamme beobachtet werden: Die glühende Dochtspitze. Auch die orange-gelbe Flammenfärbung wird durch die Feststoffverbrennung feinsten, allerdings fluidisierter Rußpartikel hervorgerufen. Eine weitere Feststoffverbrennung, die wir im Alltag beobachten können, ist die weitestgehende flammenlose Verbrennung von Holzkohle beim sommerlichen Grillen. Feststoffverbrennung kann daher häufig auch mit der Glut in Verbindung gebracht werden.

Als Ingenieur (also Vertreter einer nicht exakten Wissenschaft) ist man gewohnt die komplexe reale Welt in einfachere Modelle zu übertragen. In der Statik kennen wir masselose Stäbe und von Wärmetechnikern wird gerne das *Gemischt-gleich-verbrannt*-Modell

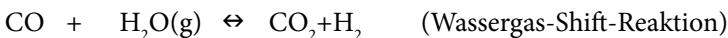
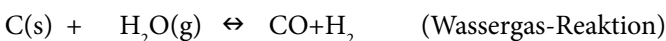
zur Beschreibung des Verbrennungsprozesses verwendet. Dabei wird bei genügend vorhandenem Sauerstoff von einer unmittelbaren und vollständigen Umsetzung (=Oxidation) der Brennstoffkomponenten ausgegangen:



Für wärmetechnische Zwecke ist dieses Modell zur Bestimmung von Abgasmengen und der Ermittlung der wesentlichen Abgasbestandteile vollkommen ausreichend. Bei näherer Betrachtung des Verbrennungsvorganges zeigt sich jedoch, dass alleine die Reaktionen unter ausschließlicher Beteiligung von Kohlenstoff und Sauerstoff schon vielfältiger sind:



Bei Anwesenheit von Wasser(stoff) ergeben sich zusätzlich



Kommt Stickstoff als Reaktionspartner hinzu, entstehen NO_x -Verbindungen.

Durch Zufuhr von Ammoniak (NH_3) beziehungsweise Ammoniakwasser (NH_4OH) oder Harnstoff ($(\text{NH}_2)_2\text{CO}$) bei geeigneten Temperaturen und Lokalisationen lässt sich der NO_x -Gehalt reduzieren.

Die Chlorbestandteile im Brennstoff reagieren nicht nur zu Salzsäure (HCl), sondern bilden mit Metallen und anderen Stoffen Salze, die ihrerseits weitere Reaktionen eingehen.

Schwefel kann neben SO_2 auch zu SO_3 oxidieren. SO_3 bildet mit Wasser Schwefelsäure, welche an Niedertemperaturheizflächen ($< 130 \text{ °C}$ bei üblichen SO_3 -Konzentrationen im Abgas) gefürchtete Korrosionen hervorrufen kann (z.B. als Schwefelsäure H_2SO_4 oder als Ammoniumsulfat $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$). Bei höheren Temperaturen kann das SO_3 die chlorhaltigen Beläge sulfatieren und somit zur Entspannung an der Hochtemperaturkorrosionsfront beitragen.

Die Verbrennung von festen Brennstoffen lässt sich analog zum Modell *Kerzenflamme* allgemein in verschiedene Abschnitte unterteilen. Für Rostfeuerungen gilt typischerweise:

1. Trocknungsphase

(Verdampfung/Verdunstung des Wasseranteils $< = 100\text{ °C}$)

2. Entgasung ($> 100\text{ °C}$)

Austreibung der flüchtigen Komponenten (C_xH_y, H_2, H_2S, \dots)

3. Zündung und Verbrennung der gasförmigen Bestandteile ($250\text{ °C} - 600\text{ °C}$)

Die Wärmefreisetzung (Strahlung) bewirkt dabei die

4. Vergasung

Umsetzung des fixen Kohlenstoffs zu gasförmigen Produkten, die dann wiederum verbrennen.

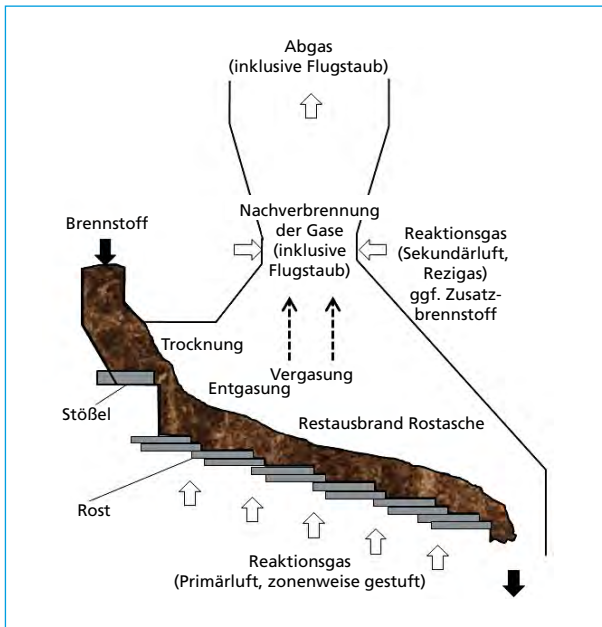


Bild 6:

Darstellung der Rostfeuerung

Quelle: Beckmann M.; Scholz, R.: Zum Feststoffumsatz bei Rückständen in Rostsystemen. Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK) 46 (1994), Nr. 5

5. Restausbrand der Feststoffe

ohne Flamme, nur schwelen, glühen auf dem Rost oder (als mitgerissene Staubpartikel) auf dem weiteren Abgasweg beziehungsweise als Anbackungen.

6. Nachverbrennung der Gase

Verbrennung von Flüchtigem, Schwelgasen, unverbrannten Gas- und Staubpartikeln

Die Feuerung kann im Anlagenbetrieb üblicherweise durch gezielte Eingriffe beeinflusst werden:

- Schürwirkung durch Roststabbewegungen (Geschwindigkeit und Hublänge)
- Transportbewegung durch Roststabbewegungen (Geschwindigkeit und Hublänge)

- Schürwirkung durch Primärluftzufuhr (Menge, Temperatur und Verteilung)
- Nachverbrennung durch Sekundärluftzufuhr (Menge, Pressung)

Herstellerspezifisch lassen sich Kennzahlen bilden, mit denen der Feuerungsrost dimensioniert werden kann. Weit verbreitet sind sowohl die mechanische als auch die thermische Rostflächenbelastung (bezogen auf die Rostfläche) oder die entsprechende Breitenleistung (Rostbreite).

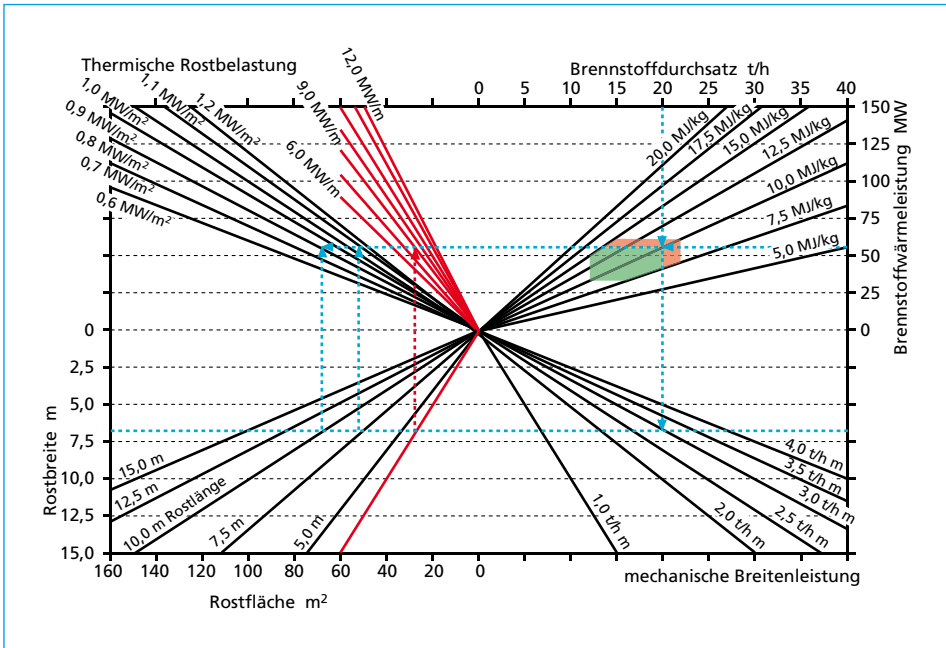


Bild 7: Rostnomogramm zur Ermittlung spezifischer Belastungskennzahlen

Wenn nun davon ausgegangen wird, dass die Ersatzbrennstoffe sich durch geringen Wassergehalt, und gleichzeitig einen hohen energetischen Anteil an Flüchtigen auszeichnen, wirkt sich dies gravierend auf das Verbrennungsverhalten aus. Durch den Entfall der Trocknungsphase werden die Flüchtigen vorzeitig freigesetzt. Die Verbrennung kann zwar durch Reduzierung der Luftzufuhr in den vorderen Rostzonen verzögert werden. Aber die energiereichen Flüchtigen werden schnell aus dem Festbett ausgetragen. Alle in Hausmüllverbrennungsanlagen bewährten Möglichkeiten, das Feuer mit Roststabbewegungen zu beeinflussen, können allenfalls den Restausbrand des Brennbettes verbessern. Selbst wenn die Roststäbe Purzelbäume schlagen können würden, es bliebe ohne nennenswerte Einflüsse auf die Hauptfreisetzung der Brennstoffenergie.

Bei der Wirbelschichtfeuerung ist prinzipiell von den gleichen Verbrennungsabläufen wie bei der Rostfeuerung (Trocknung, Entgasung, Zünden, Vergasung, Restausbrand/Nachverbrennung) auszugehen. Diese sind aber nicht mehr lokal zu zuordnen, sondern treten überall im Wirbelbett oder darüber auf. Inhomogenitäten im Wirbelbett,

z.B. durch Agglomerationen der Partikel im Wirbelbett, können zur lokalen Defluidisierung und somit zu einem teilweisen Zusammenbruch des Wirbelbettes führen. Dadurch werden die Ausbrandvorgänge verschlechtert. Durch eine mit dem Flüchtigengehalt ansteigende benötigte Anzahl von Brennstoffzuführstellen kann diesen Defluidisierungen entgegen gewirkt werden.

Die Feuerräume von Ersatzbrennstoffverbrennungsanlagen sind üblicherweise großzügiger ausgelegt, als die von konventionellen Abfallverbrennungsanlagen. Dies ist dem höheren Heizwert und der daher erwarteten höheren Wärmebelastung geschuldet.

4. Auswirkungen auf den Anlagenbetrieb

Der Anlagenbetreiber steht somit vor der Wahl zwischen Pest und Cholera:

Entweder wird die Luft dorthin geführt, wo die Flüchtigen freigesetzt werden, was zu einer enormen lokalen Wärmeentwicklung und den damit verbundenen betrieblichen Nachteilen (Verschlackung des Feuerraumes, abgasseitige Schief lagen, verstärkter Austrieb von z.B. Schwermetallen durch hohe Feuerraumtemperaturen aus dem Brennstoffbett, enorme Wärmebelastung des Feuerfestmaterials) führt.

Oder die Primärluft wird gezielt gedrosselt. Damit wird die Hauptenergiefreisetzung in die Sekundärluftebene und darüber verschoben. Schief lagen entstehen ebenfalls, weil die Pyrolyse- und Schwelgase an der Zünddecke und der Vorderwand entlang strömen. Der Feuerraum wird wenig belastet (Die Anlagen weisen häufig eine geringe Verschmutzung dort aus). An der Vorderwand kann eine Aufkonzentration von schwarzen Belägen (Pyrolysekoks) beobachtet werden, der wegen des lokalen Sauerstoffmangels nicht ausbrennen kann. Die Feuerraumwände koppeln relativ wenig Wärme aus, da im Feuerraum wenig Wärme freigesetzt wird. Die Durchmischung der Sekundärluft erfolgt nur unzureichend, da über die Sekundärluft nicht nur der Mischimpuls sondern auch die Hauptverbrennungsluftmenge zugeführt werden müsste.

Auch hinter der Sekundärluftebene ist mit erheblichen Schief lagen zu rechnen, da die relativ kalten Gasströme, die über die Ausbranddecke zur Rückwand des ersten Zuges gelangen, sich nur schwer mit den heißen Abgasen auf der Vorderwand vermischen lassen. Diese Schief lagen verstärken das ohnehin hohe Korrosionspotential, welches durch den brennstoffbedingten Input bedingt ist.

Die feinen Partikel, die in der Feuerung freigesetzt und in die Kesselzüge eingetragen werden, können leicht angeschmolzen werden und bilden somit Keimzellen für Anbackungen im ersten Abgaszug. Dadurch verlagert sich der abgasseitige Temperaturabbau zusätzlich in die nachfolgenden Strahlungszüge bis hin zu den ersten Konvektivheizflächen.

Calciumcarbonat (gelangt als Füllstoff wie ein blinder Passagier mit dem Ersatzbrennstoff in die Feuerung) zerfällt bei den hohen Temperaturen, das Calcium verbindet sich mit dem Chlor zu Calciumchlorid.

Auch die Salze führen neben den Korrosionsschäden zu weiteren Anbackungen in Temperaturbereichen, die eigentlich zu kalt für Ascheaufschmelzung sind. Es können

sich jedoch Gemische mit niedrigen Eutektika bilden. Diese stellen einen *Kleber* für die eigentlich schon erstarrten Partikel dar und bewirken auf diese Weise einen weiteren Anstieg der Verschmutzungen und somit der Abgastemperatur.

So können auch die ersten Konvektivheizflächen binnen weniger Wochen nachdem die Abgastemperaturen dort auf Werte oberhalb 600 – 650 °C angestiegen sind, so verschmutzen, dass sie vom Abgas nicht mehr ausreichend durchströmt werden können. Demzufolge muss die Anlage abgefahren werden. Eine Abreinigung ist dann häufig nur mit bergmännischen Maßnahmen möglich.

5. Mögliche Maßnahmen

Die Quelle all dieses zuvor beschriebenen Übels ist sicherlich der Brennstoff selbst. Aufgrund von langfristigen Lieferverträgen gibt es in der Regel jedoch kaum Möglichkeiten direkt auf die Brennstoffqualität (z.B. auf Zusammensetzung und/oder Korngrößenverteilung) Einfluss zu nehmen. Vor Einsatz eines *neuen* Ersatzbrennstoffes, sollte dieser eingehend unter möglichst realistischen Randbedingungen getestet und untersucht werden. Dies kann zum Beispiel in einer real existierenden Anlage, wenn die Verbrennungsversuche von Online-Beprobungen begleitet werden (siehe z.B. [5]), oder in Versuchsreaktoren (siehe z. B. [6]) geschehen. Höhere Risiken sollten auch in den Entsorgungspreis eingehen, wenn sich schon die Korrosion nicht abstellen lässt, ergibt sich zumindest ein *Schmerzensgeld*, um die höheren Betriebs- und Reparaturkosten auszugleichen.

Um die geringe Feuchtigkeit auszugleichen, kann der Ersatzbrennstoff nicht so ohne weiteres angefeuchtet werden. Zum einen sinkt der Brennstoffnutzungsgrad, da das dem Brennstoff zugeführte Wasser in das Abgas verdampft und somit nicht mehr energetisch genutzt werden kann. Zum anderen müssen die Ersatzbrennstoffe über eine entsprechende Saugfähigkeit verfügen, um das Wasser überhaupt aufnehmen zu können. Andernfalls wird das Wasser vor der Brennstoffzufuhr in die Feuerung schon aus dem Brennstoff herausickern. Eine Möglichkeit, die fehlende feuchte Komponente einzubringen, wäre die Zumischung von Klärschlamm. Allerdings muss hier darauf geachtet werden, welche weiteren Komponenten (Stickstoffverbindungen, Phosphate, Schwermetalle, ...) auf diese Weise in die Feuerung und das Abgas gelangen.

Durch Einsatz effektiver Online-Abreinigungseinrichtungen (Wasserkanonen, Shower Cleaning, Sprengreinigung, ...) lässt sich das Verschmutzungsprobleme zumindest reduzieren und damit der Abgastemperaturanstieg und daraus folgend weitere Verschmutzungs- und Korrosionsprobleme reduzieren.

Wegen des anderen Abbrandverhaltens muss die Luftzufuhr gegebenenfalls von der Primär- in die Sekundärluftebene verlagert werden, um den Sauerstoff dort zuzuführen, wo die brennbaren (flüchtigen) Komponenten vorhanden sind.

Wenn die Flüchtigen insbesondere an der Vorderwand emporsteigen, muss versucht werden, diese in die Mitte des ersten Zuges zu treiben, um ein gleichmäßigeres Temperatur- und Konzentrationsprofil über dem Abgasquerschnitt zu erreichen. Wenn der

Mischimpuls mit Luft erfolgt, besteht die Gefahr, dass die Flüchtigen bei Luftkontakt spontan abbrennen. Abhilfe könnte hier der Mischimpuls mithilfe von inerten Gasen (rezirkuliertes Abgas mit hoher Pressung oder Dampf aus einer Niederdruckschiene [2]) bieten.

6. Fazit

Ersatzbrennstoffe sind ein Bestandteil der Kreislaufwirtschaft. Allerdings ist die Verbrennung nicht so unproblematisch, wie es ein Vergleich mit Braunkohlen mit ähnlichen Heizwerten nahelegen könnte. Aber auch bei der Verbrennung in herkömmlichen Abfallverbrennungsanlagen können sich durch die andere Zusammensetzung, andere Körnung und damit durch das andere Abbrandverhalten ungeahnte Herausforderungen hinsichtlich Stand- und Reisezeiten ergeben.

Es gibt vielversprechende Lösungsansätze, um diese Probleme in den Griff zu bekommen. Es sind jedoch noch weitere Erfahrungen notwendig, um effiziente und zuverlässig arbeitende Ersatzbrennstoffverbrennungsanlagen mit angemessenem Aufwand betreiben zu können.

Generell kann in der Abfallaufbereitung zu Ersatzbrennstoffen auch eine Chance zur Homogenisierung des Brennstoffes und zur Ausschleusung von *Problemstoffen* vor der Verbrennung gesehen werden. Dadurch kann der Mehraufwand bei der Aufbereitung durch höhere Verfügbarkeiten wettgemacht werden.

Die Kenntnis über das Verhalten des eingesetzten Brennstoffes beziehungsweise seine Charakterisierung hinsichtlich Verbrennungsverhalten, Korrosionspotential wird mit steigenden Ansprüchen an den energetischen Wirkungsgrad und die Betriebssicherheit immer wichtiger werden.

7. Literatur

- [1] Marzi, Th.: Combustion behaviour of refuse derived fuels – development of a characterisation, Sardinia 2007, Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium
- [2] Krüger, J.: Reduktion der Schadstoffemission einer Müllverbrennungsanlage durch Einsatz von Dampf im Überschallbereich in der Feuerung, VGB-Konferenz: Feuerung, 1994
- [3] Klasen, Th.: Erstellung und Validierung eines mathematischen Modells für die heterogene Verbrennung auf dem Müllrost ..., Dissertation 2003
- [4] Beckmann M.; Scholz, R.: Zum Feststoffumsatz bei Rückständen in Rostsystemen. Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK) 46 (1994), Nr. 5
- [5] Magel, G.; Spiegel, W.; Herzog, T.; Müller, W.; Schmidl, W.: Standzeitprognose durch regelmäßige Kesselkontrolle. Born, M. (Hrsg.): Dampferzeugerkorrosion 2011
- [6] Pohl, M.; Bernhardt, D.; Beckmann, M.; Spiegel, W.: Brennstoffcharakterisierung zur vorausschauenden Bewertung des Korrosionsrisikos. Born, M. (Hrsg.): Dampferzeugerkorrosion 2011

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Energie aus Abfall – Band 10

Karl J. Thomé-Kozmiensky, Michael Beckmann.

– Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2013

ISBN 978-3-935317-92-4

ISBN 978-3-935317-92-4 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2013

Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky,

Dr.-Ing. Stephanie Thiel, M.Sc. Elisabeth Thomé-Kozmiensky

Erfassung und Layout: Petra Dittmann, Sandra Peters,

Martina Ringgenberg, Ginette Teske, Ulrike Engelmann, LL. M., Ina Böhme

Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.