



**Gemeinschaftskraftwerk  
Schweinfurt GmbH**

GKS • Hafenstraße 30 • 97424 Schweinfurt

---

# **Brennstoff und Anlagenverfügbarkeit - Ein ewiges Thema**

Dr.-Ing. Ragnar Warnecke ,  
GKS-Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt GmbH

## **Inhalt**

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Brennstoffeigenschaften</b> .....	<b>3</b>
2.1	Chemische Brennstoffeigenschaften .....	4
2.1.1	Heizwert .....	4
2.1.2	Kurzanalyse .....	7
2.1.3	Elementaranalyse.....	8
2.1.4	Minoritätsanalyse .....	10
2.2	Physikalische Brennstoffeigenschaften.....	12
<b>3</b>	<b>Wechselwirkung von Brennstoff, Anlage und Betrieb</b> .....	<b>12</b>
3.1	Abbrandverhalten .....	12
3.2	Korrosion und Belagsbildung .....	13
3.3	Betriebseinflüsse .....	13
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>13</b>
	<b>Literatur</b> .....	<b>14</b>

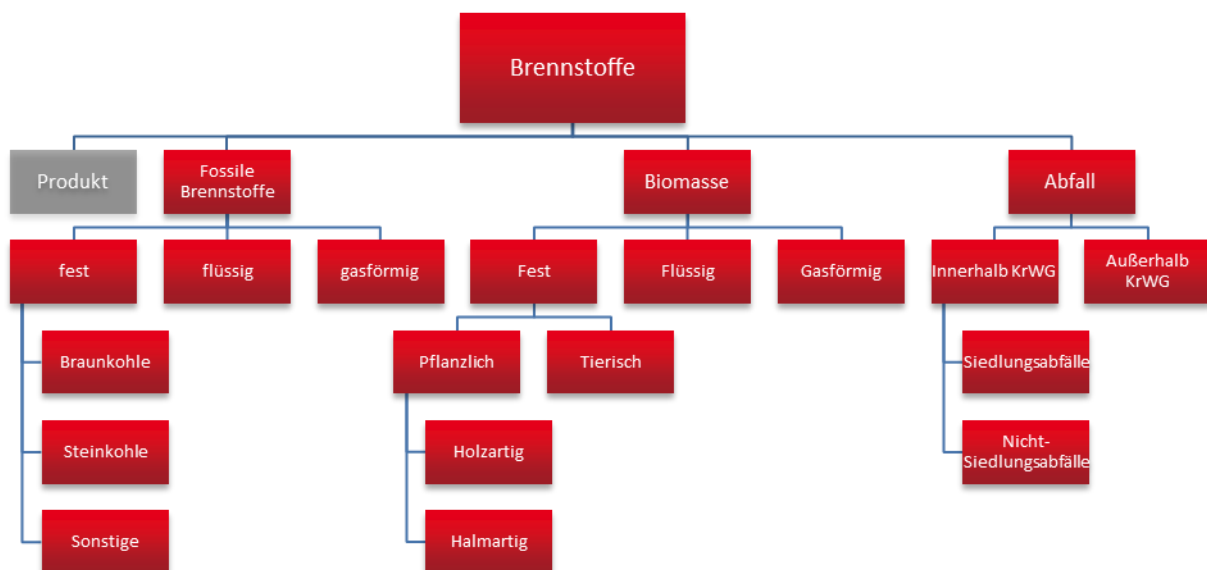
# 1 Einleitung

Die thermo-chemische Umwandlung von Stoffen hat schon von seit Menschengedenken eine besondere Bedeutung (Abbildung 1.1). Dabei stellt die Verbrennung den ganz überwiegenden Anteil an den thermo-chemischen Prozessen und soll hier in der Betrachtung im Vordergrund stehen.



**Abbildung 1.1:** Feuerstelle in der Steinzeit und heute

Während in den Anfängen biogene Brennstoffe die wesentliche Rolle spielten, erlangten zwischenzeitlich insbesondere fossile Brennstoffe eine immer größere Bedeutung, da sie eine hohe Energiedichte mit guter Verfügbarkeit (bei entwickelter Infrastruktur, z.B. Bergwerke, Öl- und Erdgasausbeutung) aufwiesen. Neben diesen beiden Brennstoffarten wurde als dritte Art der Abfall als Brennstoff erkannt (Abbildung 1.2). Zunächst diente die thermische Behandlung von Abfällen in allererster Linie der Hygienisierung der Abfälle (wegen Pest und Cholera, verursacht durch Abfälle bzw. Getier in den Abfällen, wurden Ende des 19. Jahrhunderts die ersten Müllverbrennungsanlagen in England und Deutschland gebaut). Mittlerweile ist Abfall als kostengünstiger Energieträger u.a. ein wichtiger Baustein für den Erhalt ganzer Industriebranchen in Deutschland (z.B. Zementindustrie).



**Abbildung 1.2:** Einteilung der Brennstoffe in Brennstoffarten

Diese drei Brennstoffarten (Biomasse, Fossile Brennstoffe und Abfälle) sind auch heute noch die zur Verfügung stehenden Materialien für die Verbrennung. Produzierte Güter (= Produkte) werden nur in Ausnahmefällen verbrannt und bleiben daher außer Acht.

Die Verbrennung wurde ursprünglich mit einfachen Vorrichtungen durchgeführt (z.B. Lagerfeuer) und diente im Wesentlichen zum Wärmen, Kochen, Volumenreduzieren, Hygienisieren oder für kultische Handlungen. Später wurde immer mehr mit ausgefeilteren Vorrichtungen die Nutzung der verwendeten Brennstoffe optimiert. Dabei wurde früh erkannt, dass die Eigenschaften der Brennstoffe diverse zusätzliche Möglichkeiten eröffnen. Z.B. wurde die ganze metallurgische Entwicklung der Menschheit erst möglich, nachdem die Vorbehandlung von Brennstoffen durch Pyrolyse die notwendigen Eigenschaften der Brennstoffe liefern konnten (Herstellung von Koks durch Köhler und Verhüttung von Bronze und Eisen mittels dieses Kokes). Andererseits konnten bestimmte Prozesse auch erst durch weiterentwickelte technische Vorrichtungen mittels Verbrennung durchgeführt werden (z.B. Schmieden in einer Esse). Gerade die industrielle Revolution im 19. Jahrhundert wurde erst durch die gezielte und abgestimmte Umwandlung von Brennstoffen in komplexen technischen Einheiten möglich (z.B. Dampfmaschine).

Auch heute ist die Verbrennung von Brennstoffen ein wesentlicher Bestandteil unserer Wirtschaft. Immer noch erfolgt der weit überwiegende Anteil der Energiebereitstellung durch Verbrennungsprozesse (z.B. Stromerzeugung, Heizung, Mobilität, Herstellung metallischer und mineralischer Produkte). Immer ist dabei die optimale Abstimmung von Brennstoff und technischer Anlage ganz elementar für den effizienten Prozess. So ist die Verbrennung von Gasen (z.B. Erdgas) oder Flüssigkeiten (z.B. Heizöl) technisch in der Regel mit geringerem technischen Aufwand möglich als die Verbrennung von Feststoffen. Und je heterogener ein Brennstoff ist, desto schwieriger ist die effiziente, emissionsarme Verbrennung. Es ist leicht vorstellbar, dass eine Verbrennungsanlage für chlor- und schwefelarmes Erdgas einfacher und kostengünstiger zu bauen und zu betreiben ist, als ein komplexes Kraftwerk für die Verbrennung von Kohle oder schadstoffbelastetem festen Abfall. Es ergibt sich im Allgemeinen ein Konflikt zwischen:

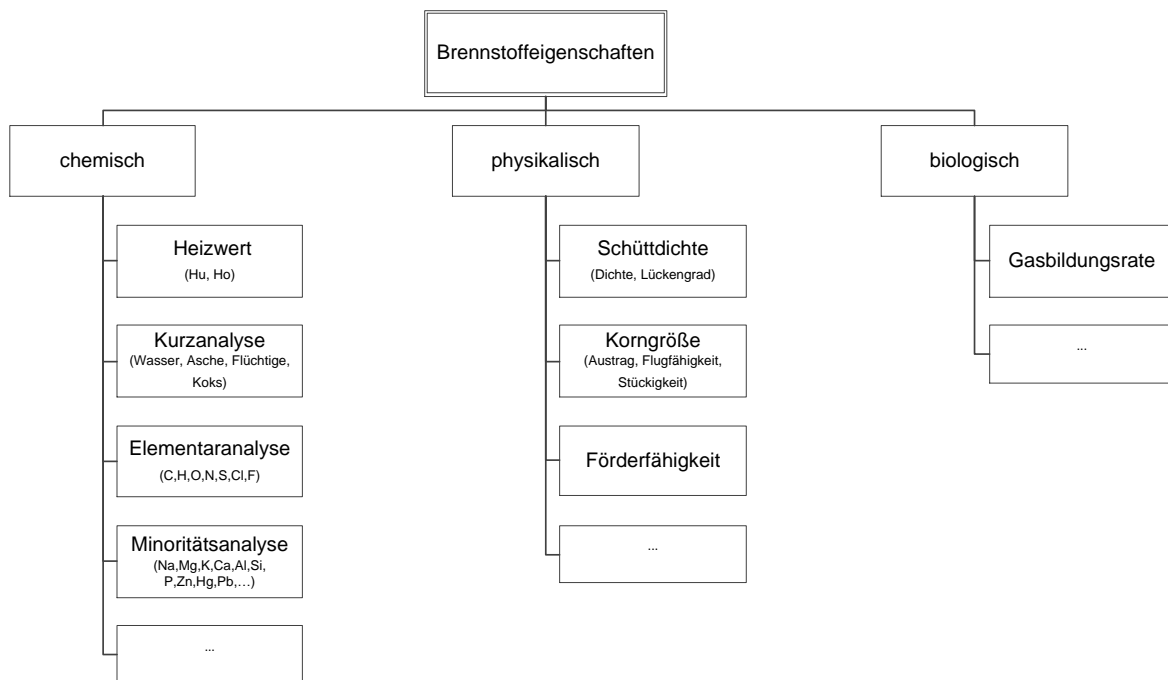
- Teurer Brennstoff und preiswerte Verbrennungsanlage sowie
- Preiswerter Brennstoff und teure Verbrennungsanlage.

Dies führt zu einer Abwägung von Auswahl/Aufbereitung der Brennstoffe zu einem weniger heterogenen Einsatzstoff und der technischen Optimierung des Verbrennungsprozesses mit der Verbrennungsanlage. In jedem Falle ist es hilfreich so viel wie möglich über Brennstoff, Verbrennungsanlage und die Wechselwirkung von beidem zu wissen. Im Rahmen dieses Beitrages soll der Schwerpunkt auf den Biomassen und vor allem den Abfällen liegen.

## 2 Brennstoffeigenschaften

Die Eigenschaften der Brennstoffe lassen sich entsprechend den verfahrenstechnischen Grundoperationen unterteilen (Abbildung 2.1). Eine vollständige Beschreibung aller vorstellbaren Eigenschaften ist kaum möglich. Daher werden nur die für die Verbrennung

wichtigsten Eigenschaften im Folgenden angesprochen. Biologische Eigenschaften werden hier nur thematisch gestreift.



**Abbildung 2.1:** Einteilung der Brennstoffeigenschaften

Zahlreiche Eigenschaften von diversen Brennstoffen sind in der Literatur gelistet. Für den schnellen Zugriff auf diese Informationen sind natürlich Datenbanken hilfreich. Wichtig ist es dabei, dass zu einem Brennstoff möglichst alle Daten aus ein und derselben Analyseprozedur ermittelt wurden, damit sich ein in sich schlüssiges Bild des Brennstoffes ergibt. Beispielsweise findet man unter <http://www.gks-sw.de/index.php/de/online-anwendungen.html> eine entsprechende Datenbank mit über 200 Brennstoffen.

Auf die genaue Bestimmung der jeweiligen Stoffeigenschaften soll hier nicht eingegangen werden (siehe dazu z.B. [Danz, 2012] und andere). Vielmehr stehen deren Auswirkungen auf den Verbrennungs- und Energieübertragungsprozess im Vordergrund.

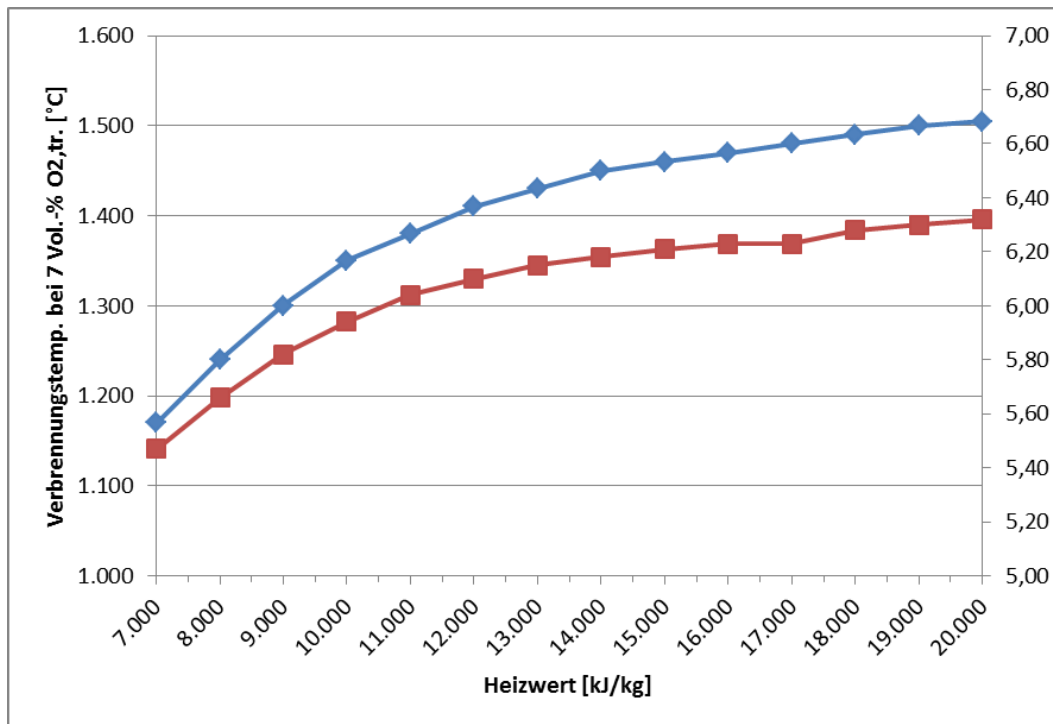
## 2.1 Chemische Brennstoffeigenschaften

Die chemischen Brennstoffeigenschaften werden weitgehend durch den Heizwert und die Zusammensetzung des Brennstoffs bestimmt.

### 2.1.1 Heizwert

Die Höhe der Verbrennungstemperatur ist ganz wesentlich vom Heizwert bzw. Brennwert abhängig. Der Heizwert kann einerseits vermessen werden oder aber mittels Formeln aus der Elementaranalyse näherungsweise berechnet werden (bewährt haben sich außer der rein stöchiometrischen Gleichung auch die nach Boje, Dulong oder der Methode nach FDBR). Mit steigendem Heizwert erhöht sich auch die quasi-adiabate Verbrennungstemperatur. Bei konstanten Randbedingungen (Luftfeucht von 10 g/kg, Sauerstoffgehalt von 7 Vol.-% am Kesselende, ohne Rezi, Feuerungswärmeverlust von 3,5 %) erhöht sich die Temperatur von rund 1.150 bis 1.500 °C (Abbildung 2.2). Das hätte natürlich zur Folge, dass die Wände des Feuerraumes mit steigendem Heizwert erheblich höher thermisch

belastet werden und z.B. Feuerfestmaterial überbeansprucht werden kann. Werden also überhöhte Heizwerte festgestellt, so sollte dieser Entwicklung mit einer höheren Reizgasmenge und/oder einer höheren Luftmenge (höherem O<sub>2</sub>-Kesselende) begegnet werden, ggf. auch durch Einspritzen von Kühlmedien wie z.B. Wasser auf den Brennstoff oder in den Feuerraum. Schwierig ist allerdings die exakte Bestimmung des Heizwertes im Betrieb, wenn der Brennstoff recht heterogen ist. Üblicherweise kann eine Energiebilanz im Rahmen der Feuerungsregelung (ggf. auch in der Leittechnik) den Nachweis von gemittelten Heizwerten erbringen. Da in den Energiebilanzen die Energie des Dampfes in Relation zur Energie des Brennstoffes gesetzt wird und letztere aus dem Produkt von Brennstoffmasse zu Brennstoffheizwert besteht, sollte zur Bestimmung des Brennstoffheizwertes der Brennstoffmassenstrom bekannt sein. Dieser wird üblicherweise über die Wiegung des Krangreifers bestimmt und kann so nur als Mittelwert über mehrere Stunden sinnvoll sein, woraus kurzfristige Heizwert-Schwankungen nicht ableitbar sind. Man kann die Bilanz auch über die Differenz zwischen zugeführten Gasmengen (im Wesentlichen Luft und Rezi) und der Rauchgasmenge am Kesselende sowie den Gaskonzentrationen dort bestimmen. Allerdings ist dies sehr sensitiv auf Messschwankungen und – ungenauigkeiten. Die Berechnung des Massenstromes über die Bewegung der Brennstoffaufgabe ist im Allgemeinen zu ungenau.



**Abbildung 2.2:** Näherungsweise quasi-adiabate Verbrennungstemperaturen in Abhängigkeit des Heizwertes

Wird, wie auch immer nachgewiesen, ein erhöhter Heizwert festgestellt, so sollte der Betreiber unbedingt darauf reagieren, um Schäden in Feuerraum und Kessel zu vermeiden. Andererseits hat der Anlagenlieferant alles zu tun, um die im Vertrag (meist dokumentiert im Feuerungsleistungsdiagramm (FLD)) zugesagten Heizwerte auch behandeln zu können (**Abbildung 2.3**).

Bei hohen Heizwerten hat sich der frühzeitige Wärmeabbau im Feuerraum und unteren 1. Zug mittels Inconel-Cladding an Stelle von Feuerfest bewährt. Grundsätzlich sind allerdings Temperaturspitzen in kleineren Kesseln (z.B. Querschnittsfläche des 1. Zuges bis etwa 10 m<sup>2</sup>) durch das geringere Volumen-zu-Oberflächen-Verhältnis kritischer zu sehen als in großen Kesseln (Tabelle 2.1).



## Feuerleistungsdiagramm

GKS Schweinfurt

GKS-08-001-"2006"

Rev. 1

19.08.2008

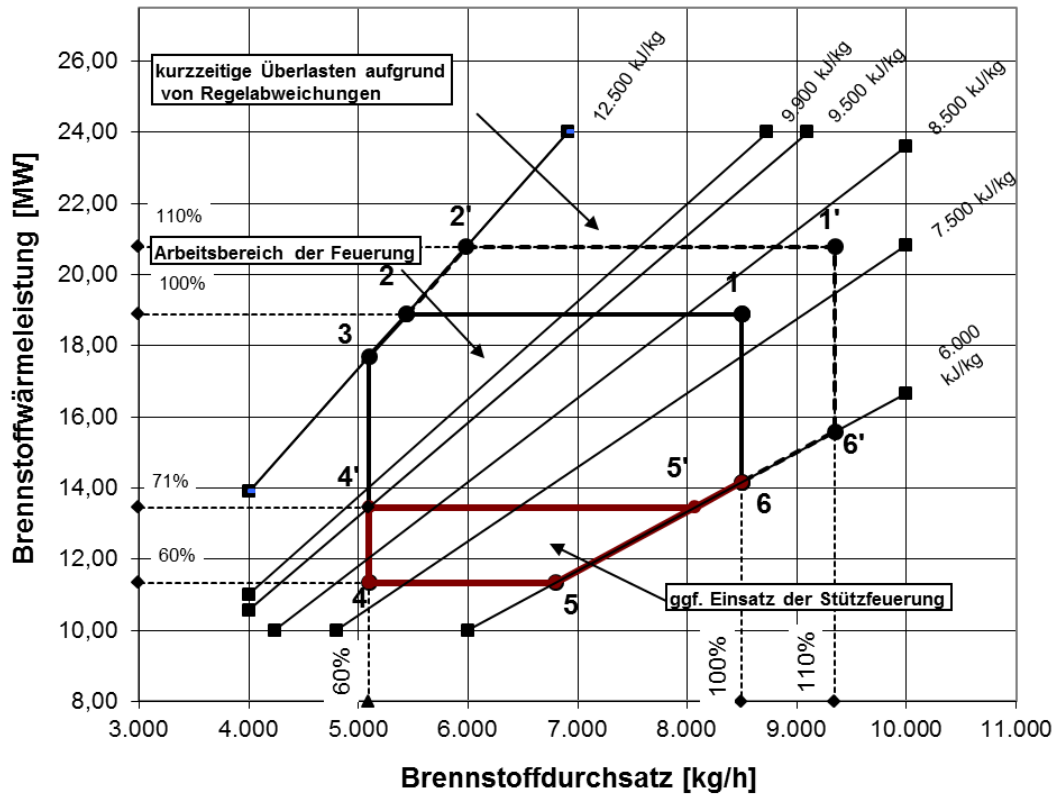


Abbildung 2.3: Feuerungsleistungsdiagramm für den Müllteil des GKS

Tabelle 2.1: Bestimmung des Volumen/Oberflächen-Verhältnisses

		kl. Kessel	gr. Kessel	Verhältnis
RG-Normdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	1,3	1,3	
RG-Wärmekapazität	[kJ/(kg*K)]	1,1	1,1	
RG-Temperatur	[°C]	1.000	1.000	
Energieinhalt im Kontrollvol.	[kW]	2.009	8.930	4,444
Breite 1. Zug	[m]	3,0	8,0	
Tiefe 1. Zug	[m]	3,0	5,0	
Höhe Bezug	[m]	1,0	1,0	
Bezugs-Oberfläche 1. Zug	[m <sup>2</sup> ]	12,0	26,0	
Bezugs-Volumen 1. Zug	[m <sup>3</sup> ]	9,0	40,0	
<b>Volumen/Oberfläche</b>	<b>[m]</b>	<b>0,75</b>	<b>1,54</b>	<b>2,051</b>



## 2.1.2 Kurzanalyse

Die für eine Kurzanalyse anzugebenden Größen ist in Tabelle 2.2 beschrieben.

**Tabelle 2.2:** Anteile der Kurzanalyse

<b>Kurzanalyse:</b>
Wasser
Asche
Flüchtige
Koks

Ein erhöhter Wassergehalt verzögert wegen des Wärmebedarfs für die Verdampfungsenthalpie des Wassers das Einsetzen des Pyrolyseprozesses und damit den Verbrennungsprozess als Ganzes. Insgesamt wird auch der Heizwert als spezifische Größe verringert. Durch einen höheren Wassergehalt setzt also auf dem Rost die Verbrennung später ein und der Ausbrand kann so reduziert werden, so dass ein höherer Glühverlust (bzw. TOC) in der Schlacke messbar wird.

Demgegenüber führt eine Erhöhung des Aschegehaltes im Allgemeinen zu einer Reduzierung des Glühverlustes, da rein mathematisch der Anteil des Glühverlustes bei hohen Aschegehalten relativ gesehen kleiner wird. Umgekehrt führen aus den gleichen Gründen sehr kleine Aschegehalte zu hohen Glühverlustwerten. Dies kann insbesondere bei der Verbrennung eines hohen Anteils von Kunststoffen ein Problem werden.

Der Koksgehalt wird in der Regel durch eine vergleichsweise langsame heterogene Verbrennungsreaktion abgebaut. Da der Koks mehr oder weniger reiner Kohlenstoff ist, kann er als Bestandteil des C-Anteils in der Elementaranalyse (siehe nächster Abschnitt) angegeben werden. Für den Abbrand des Kokes ist die zuverlässige direkte Umspülung des Koks-Brennstoffes mit Sauerstoff notwendig. Der Gehalt an Koks und dessen Zugänglichkeit (d.h. als Folge der Größe und Oberflächenfaktoren der Brennstoffpartikel) ist entscheidend für den Glühverlust des Prozesses. Selbstverständlich kann der Koksabbrand durch eine gezielte Beaufschlagung mit Luft, durch Schürung (d.h. mechanische Beseitigung von Diffusionssperren z.B. durch „Zerkleinerung“) und durch Verweilzeitverlängerung verbessert werden. Üblicherweise wird der Vorschub der letzten Rostzone verlangsamt und mit mehr Luft beaufschlagt, wenn ein schlechter Feststoffausbrand detektiert wird.

Demgegenüber können die Flüchtigen grundsätzlich vollkommen ohne die Zugabe von Sauerstoff freigesetzt werden; dazu genügt die thermische Strahlung schon aus. Beispielsweise wurde eine Schweizer Kehrrichtverbrennungsanlage über mehrere Jahre mit einer Unterwindmenge von rund 38% gefahren (Heizwert rund 13 MJ/kg), ohne dass der Ausbrand schlechter war als in anderen Anlagen, da der Unterwind im Wesentlichen nur zum Ausbrand des Kokes benötigt wurde.

Im Bezug auf den Heizwert reduzieren ein steigender Wasser- und Aschegehalt den Heizwert, während die Steigerung von Flüchtigen- und Koksgehalt ihn erhöhen. Für Abfälle und Biomassen kommt im Gegensatz zu den Kohlen der größere Anteil des Heizwertes aus den Flüchtigen (Tabelle 2.3).

**Tabelle 2.3:** Anteil der Heizwerte von Flüchtigen und Koks in verschiedenen Brennstoffen

Stoffname	Heizwert	Heizwert-Anteil der Flüchtigen	Heizwert-Anteil des Kokes	C/H-Verhältnis (gerundete Mittelwerte)
Steinkohle	27.840	24,7%	75,3%	30,0%
Rohbraunkohle	8.830	44,7%	55,3%	15,0%
Torf	20700	76,7%	23,3%	10,0%
Kompost - Rotteendprodukt	5.696	64,3%	35,7%	8,0%
Holz hackschnitzel	17.600	77,4%	22,6%	8,5%
Buche	16.600	76,2%	23,8%	8,0%
Restmüll-Fraktion - Kunststoffe	28.400	98,5%	1,5%	6,6%
Restmüll-Fraktion - Verbunde	19.300	86,6%	13,4%	6,6%
Restmüll-Fraktion - Mittelmüll	6.935	82,6%	17,4%	6,1%
Restmüll-Fraktion - Feinmüll	3.065	74,4%	25,6%	5,9%
Restmüll	10.200	79,8%	20,2%	6,0%

## 2.1.3 Elementaranalyse

Die Elementaranalyse beschränkt sich in der Regel auf die in Tabelle 2.4 angegebenen Elemente und umfasst damit nur die üblichen Majoritätskomponenten des Brennstoffes. Sinnvollerweise wird die Elementaranalyse so angegeben, dass die Summe der Elemente **nicht 100 %** ergibt, sondern nur die Summe der Flüchtigen und des Kokes. Berücksichtigt man nämlich noch die Minoritätskomponenten (die eigentlich Bestandteil der Asche sind), so würde sich dann ergebende Elementaranalyse regelmäßig über 100 % ergeben.

**Tabelle 2.4:** Bei der Elementaranalyse berücksichtigte Elemente

C	Kohlenstoff
H	Wasserstoff
O	Sauerstoff
N	Stickstoff
S	Schwefel
Cl	Chlor
F	Fluor

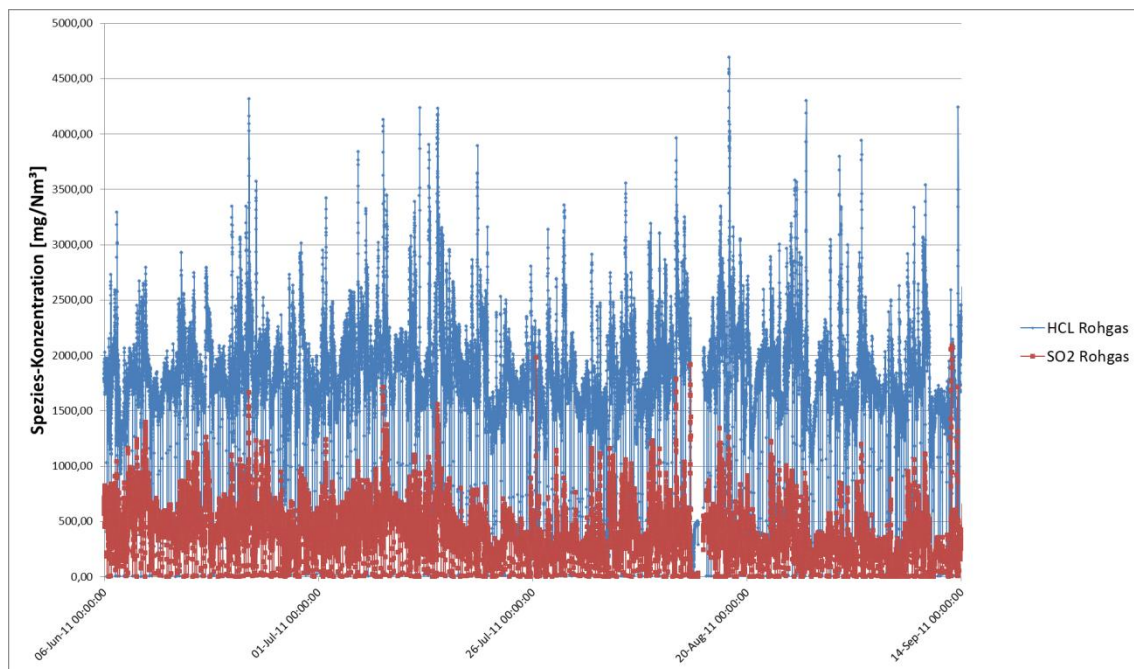
Für den Heizwert eines wasser-asche-freien Brennstoffes (waf) sind die Elemente C, H (beide Heizwert steigernd) und O (Heizwert senkend) entscheidend. Ist ein Heizwert für einen Brennstoff gegeben, sind quasi unendlich viele Kombinationen von Kurz- und Elementaranalyse vorstellbar, die den gleichen Heizwert charakterisieren. Damit ist die Kenntnis des Heizwertes nur begrenzt hilfreich und so sollte eigentlich zur Charakterisierung eines Brennstoffes neben der Heizwertbestimmung auch eine Kurz- und Elementaranalyse erfolgen. Meist wird im Rahmen der Elementaranalyse allerdings der Sauerstoffwert rechnerisch als Differenz bestimmt. Hilfreich ist aber zumindest das Verhältnis von C/H (siehe Tabelle 2.3).



Besonders spannend ist gerade bei Müll- und Biomasse-Anlagen der Gehalt an Chlor im Brennstoff, da Chlor für die Hauptkorrosionsmechanismen in diesen Anlagen verantwortlich ist.

Natürlich kann man den Brennstoff analysieren, um den Chlor und Schwefelgehalt zu bestimmen (bei dieser Gelegenheit sollte man die übrigen Stoffe der Elementar- und Kurzanalyse mit analysieren lassen, da kostenmäßig meist nicht viel teurer). Aufgrund der oft schwierig repräsentativ gestaltbaren Probenahme ist dies einerseits teuer und mit gewissen Fehlern behaftet. Diese Methode macht aber insbesondere dann Sinn, wenn man einzelne Brennstofflieferanten detektieren möchte, die möglicherweise nicht vertragskonformen Brennstoff liefern.

Einfacher und genauer ist demgegenüber die Installation einer Rohgas-HCl-SO<sub>2</sub>-Messung (Abbildung 2.4).



**Abbildung 2.4:** HCl- und SO<sub>2</sub>-Rohgas-Betriebswerte

Über vergleichsweise einfache Berechnungen kann aus dem HCl-Rohgas-Messwert der HCl-bedingte Chlorgehalt im Brennstoff zuverlässig rückgerechnet werden. Neben dem HCl im Rohgas müssen für eine vollständige Betrachtung dann noch die Mengen an Chlor in den Flugstäuben und Schlacken berücksichtigt werden. Diese können entweder messtechnisch bestimmt werden oder, da deren Schwankungen in der Regel sehr klein sind, aus allgemeinen Transferkoeffizienten berechnet werden. In erster Näherung kommen in MVA beim Chlor noch mindestens etwa 30 Mas.-% und beim Schwefel etwa 50 Mas.-% zu den Chlor- bzw. Schwefelwerten im Brennstoff dazu (Tabelle 2.5).

Erhöhte Chlorgehalte führen nicht nur zu einer erhöhten Korrosionsrate, sondern auch zu einer Absenkungen des Schmelzpunktes des Brennstoffes und insbesondere der getragenen Flugstaubpartikel im Rauchgas (Tabelle 2.6). Durch diese Schmelzpunkterniedrigung wird die „Klebrigkeit“ der Partikel durch die flüssig-pastöse Partikeloberfläche erhöht und das Potential zum Haften an den Rohrwänden steigt. Dadurch kann die Verschmutzung insbesondere des 1. Zuges unter Umständen drastisch steigen und die komplette Wärmeübertragung im Kessel verschieben, das wiederum eine Steigerung der Korrosionsrate zur Folge haben kann.

Es ist also ratsam die vereinbarten Grenzwerte für Chlor (und Schwefel) im Brennstoff einzuhalten.

**Tabelle 2.5:** Berechnungsübersicht zur Bestimmung von Brennstoff-Cl-S

Brennstoff-Massenstrom	15.000	kg/h f.
	12.500	kg/h tr.
Abgas-Massenstrom-Kesselende:	100.000	m <sup>3</sup> /h i.N. f.
HCl (Differenz zw. Roh- und Reingas)	1.400,00	mg/m <sup>3</sup> i.N.f.
SO <sub>2</sub> (Differenz zw. Roh- und Reingas)	400,00	mg/m <sup>3</sup> i.N.f.
<b>Cl aus HCl im Rauchgas (Kesselende):</b>	<b>136,164</b>	<b>kg/h</b>
	<b>3,836</b>	<b>kmol/h</b>
<b>Cl aus HCl im feuchten Brennstoff:</b>	<b>0,908%</b>	
<b>Cl aus HCl im trockenen Brennstoff:</b>	<b>1,089%</b>	
<b>Gesamt-Cl im trockenen Brennstoff:</b>	<b>1,274%</b>	
<b>S aus SO<sub>2</sub> im Rauchgas (Kesselende):</b>	<b>20,000</b>	<b>kg/h</b>
	<b>0,625</b>	<b>kmol/h</b>
<b>S aus SO<sub>2</sub> im feuchten Brennstoff:</b>	<b>0,133%</b>	
<b>S aus SO<sub>2</sub> im trockenen Brennstoff:</b>	<b>0,160%</b>	
<b>Gesamt-S im trockenen Brennstoff:</b>	<b>0,356%</b>	

**Tabelle 2.6:** Schmelz- und Siedepunkte verschiedener Spezies

Spezies	Siedepunkt	Schmelzpunkt
CaCl	1.933°C	722°C
CaO	2.850°C	2.575°C
KCl	1.500°C	790°C
K <sub>2</sub> O	-	dissoziiert bei 350 °C
NaCl	1.413°C	800°C
Na <sub>2</sub> O	-	1.275°C
PbCl <sub>2</sub>	954°C	501°C
PbO	1.470°C	888°C
ZnCl <sub>2</sub>	732°C	365°C
ZnO		1.975°C
FeCl <sub>2</sub>		677°C
FeCl <sub>3</sub>	330°C	304°C
FeO		1.369°C
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>		1.538°C
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		1.565°C

## 2.1.4 Minoritätsanalyse

Die Minoritätskomponenten können prinzipiell das komplette Periodensystem der Elemente enthalten. Sie können sehr vielfältig reagieren und die Verhältnisse in Feuerung und Kessel beeinflussen. Für die Korrosion und Belagsbildung sind als Partner für Chlor und Schwefel bevorzugt einerseits die (Erd-)Alkalien (im Wesentlichen: K, Na, Ca) und die Schwermetalle (im Wesentlichen: Pb, Zn) von Bedeutung. K, Na, Pb und Zn sind auch die Hauptbestandteile der sog. „Salze“ der Flugaschen. Als Säuren/Basen-Bildner für die sog. „Aschen“ spielen besonders Si, Al, Fe, Mg und Ca die mengenmäßig wichtigste Rolle.

**Tabelle 2.7:** Elemente und ihre Freisetzungsanteile aus dem Brennstoff bei der Verbrennung

Elemente	Freisetzungsanteil aus Brennstoff	Standardabweichung	Angegebene Aussage- Ungenauigkeit (n. Belevi und Morf)	Typische Spezies
g/kg	[% vom Input Element]	[%]	[%-Punkte]	
Si	5,048%	3,077%	1,000%	SiO <sub>2</sub>
Ti	8,684%	7,919%	3,000%	TiO <sub>2</sub>
Al	10,158%	5,749%	2,000%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Fe	8,019%	8,216%	0,300%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Ca	16,375%	5,274%	3,000%	CaO
Mg	7,504%	1,176%	1,500%	MgO
K	34,892%	3,406%	5,000%	K <sub>2</sub> O
Na	27,713%	12,988%	3,000%	Na <sub>2</sub> O
SO3	54,225%	13,576%		SO <sub>3</sub>
Cl	87,074%	10,092%	2,000%	Cl <sub>2</sub>
Zn	54,491%	25,539%	8,500%	ZnO
Pb	52,960%	21,871%	8,500%	PbO
P	9,784%	3,398%	2,000%	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
F	33,867%	12,227%	10,000%	F
Br	86,400%	3,677%	4,000%	Br
Ag	38,452%	#DIV/0!		Ag <sub>2</sub> O
Ar	#DIV/0!	#DIV/0!		Ar
As	25,513%	16,423%	6,000%	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Ba	11,493%	3,013%	3,000%	BaO
Bi	#DIV/0!	#DIV/0!		Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
C	98,973%	0,385%	0,300%	C
Cd	91,841%	7,511%	5,000%	CdO
Ce	#DIV/0!	#DIV/0!		CeO <sub>2</sub>
CO2	#DIV/0!	#DIV/0!		CO <sub>2</sub>
Co	10,967%	3,620%	3,000%	Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
Cr	23,704%	18,866%	3,000%	Cr
Cr	#DIV/0!	#DIV/0!		Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Cs	#DIV/0!	#DIV/0!		Cs <sub>2</sub> O
Cu	8,042%	6,754%	2,000%	CuO
Er	#DIV/0!	#DIV/0!		Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
H2O	100,000%	#DIV/0!		H <sub>2</sub> O
I	92,866%	#DIV/0!		I
La	#DIV/0!	#DIV/0!		La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Li	11,300%	#DIV/0!	2,000%	Li
Mn	13,618%	7,233%	2,000%	MnO
Mo	11,200%	2,594%	4,000%	MoO <sub>3</sub>
Nb	#DIV/0!	#DIV/0!		Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Ni	7,009%	3,570%	0,900%	NiO
Os	#DIV/0!	#DIV/0!		OsO <sub>4</sub>
Pd	15,000%	#DIV/0!		PdO
Pt	0,000%	#DIV/0!		PtO <sub>2</sub>
Re	#DIV/0!	#DIV/0!		Re
Rb	12,179%	13,713%		Rb <sub>2</sub> O
S	59,000%	24,042%	5,000%	S
Sb	74,932%	15,798%	8,000%	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Se	67,658%	28,700%		SeO <sub>2</sub>
Sm	#DIV/0!	#DIV/0!		Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Sn	48,946%	3,928%	10,000%	SnO <sub>2</sub>
Sr	3,261%	4,683%		SrO
Tb	#DIV/0!	#DIV/0!		Tb <sub>4</sub> O <sub>7</sub>
Tm	#DIV/0!	#DIV/0!		Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
V	9,506%	2,129%		V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
W	24,923%	#DIV/0!		WO <sub>3</sub>
Y	#DIV/0!	#DIV/0!		Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Yb	#DIV/0!	#DIV/0!		Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Zr	5,219%	#DIV/0!		ZrO <sub>2</sub>
Hg	91,881%	13,953%	1,500%	Hg
Tl	66,971%	2,516%		Tl
Sc	0,100%	#DIV/0!		Sc
Be	30,383%	#DIV/0!		Be
B	61,646%	#DIV/0!		B
Te	4,000%	#DIV/0!		Te
O	93,024%	#DIV/0!		O
H	100,000%	#DIV/0!		H
N	99,000%	#DIV/0!		N

## 2.2 Physikalische Brennstoffeigenschaften

Zu den wichtigsten feuerungstechnischen Brennstoffeigenschaften zählen die (Schütt-)Dichte und die Korngrößenverteilung. Die Schüttdichte wurde bereits in [Warnecke, 2011] behandelt.

Die Korngrößenverteilung ist insofern besonders relevant, da sie neben der Zusammensetzung des Brennstoffes das Abbrandverhalten bestimmen. Große Partikel, wie z.B. Eisenbahnschwellen, haben kaum eine Chance auf der Länge des Roste (üblicherweise etwa 10 m) und innerhalb der Verweilzeit (üblicherweise rund 1,5 h) auszubrennen, da der schlechte Wärmeübergang in das Material und die Zufuhr von Sauerstoff in bzw. die Diffusion von Flüchtigen aus dem Partikel den Umsatz verlangsamen. Demgegenüber besteht bei sehr feinen Partikeln die Gefahr, dass diese aus dem Brennbett in den Kessel getragen werden bevor sie ausgebrannt sind. Betrachte man das Kräfte-Gleichgewicht aus Gewichtskraft und Auftriebskraft eines fliegenden Partikels, so sind bereits Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser (d.h. bei einer Dichte von 1 kg/l und idealer Kugelform) von 0,5 mm und Rauchgasgeschwindigkeiten von 4,5 m/s wie sie im 1. Zug vorherrschen flugfähig. Im Feuerraum liegen die Rauchgasgeschwindigkeiten im Mittel um 1 m/s, lokal aber teilweise deutlich darüber. Feine Partikel mit einer faserigen Struktur können natürlich deutlich kleiner Dichten als 1 kg/l von bis zu 0,1 kg/l aufweisen. Damit sind auch Partikel über 3 mm bereits in Lage durch den Kessel zu fliegen.

Es ist also durchaus sinnvoll und notwendig die Feinfraktion des Brennstoffes besonders zu beachten und ggf. aufzubereiten oder anderen Verwertungswegen zuzuführen.

## 3 Wechselwirkung von Brennstoff, Anlage und Betrieb

Grundsätzlich soll auf diese Thematik in Teil 2 zu „Brennstoffe und Anlagenverfügbarkeit“ detaillierter eingegangen werden, da die gesamte Behandlung aller relevanten Themen den Rahmen eines einzigen Beitrages sprengen würde.

### 3.1 Abbrandverhalten

Da Abbrandverhalten ist bestimmt durch:

- Wärmeübertragung
- Trocknung
- Freisetzungsverhalten
- Koksumsatz.

Zu diesen Mechanismen hat bereit [Marzi, 2007] berichtet und das sogenannte „Fingerpint“-Verfahren vorgestellt, dass in der Basis von Umsicht, Oberhausen, entwickelt wurde und zusammen mit GKS auf die Verhältnisse heterogener Brennstoffe angepasst wurde. Neuere Ergebnisse von [Warnecke, 2011] zeigen das Freisetzungsverhalten der unterschiedlichen Fraktionen (Abbildung 3.1). Dieses bestimmt ganz entscheidend die Lage des Hauptfeuers auf dem Rost. Die Kenntnis dieser Lage ist elementar, um die richtige Einstellung der Sekundärluft zu erreichen, mit der die aufsteigenden Gase optimal durchmischt werden können. Ohne dies Durchmischung besteht die Gefahr, dass einzelne Strähnen mit unverbranntem Gas bis in den Kessel gelangen und dort durch partiell reduzierende oder wechselnd oxidierend-reduzierend die Korrosion beschleunigen können.

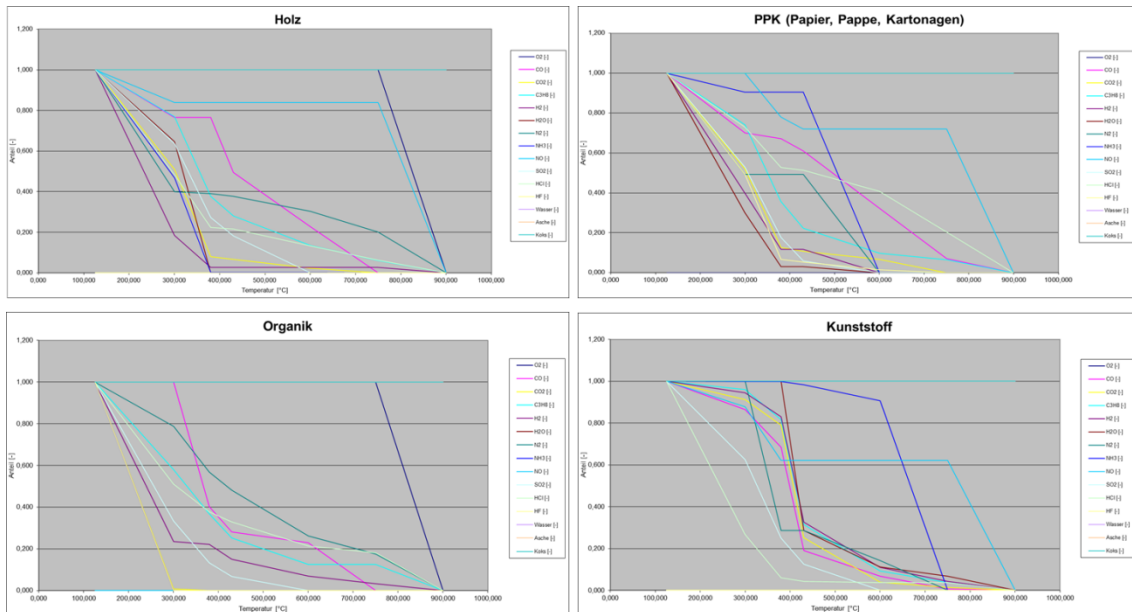


Abbildung 3.1: Freisetzungverhalten von Brennstofffraktionen

## 3.2 Korrosion und Belagsbildung

Auf die Korrosion und Belagsbildung wurde bereits in Abschnitt 2 eingegangen. Die direkte, tiefergehende Wechselwirkung zwischen diesen Prozessen und dem Brennstoff soll in Teil 2 zu „Brennstoff und Anlagenverfügbarkeit“ dargestellt werden.

## 3.3 Betriebseinflüsse

Zu den Betriebseinflüssen zählen außer dem Brennstoff selbst, der hier separat behandelt wurde, insbesondere:

- Regelungskonzept und –umsetzung von Feuerung und Kessel
- Betriebsmannschaft (Ausbildung, Motivation, Verantwortungsgefühl)
- Ordnungsgemäßer Betrieb der Nebengewerke (z.B. Rußbläser, Fördertechnik)
- Wartung und Instandhaltung.

Letztendlich ist immer der Mensch für den guten, zuverlässigen Betrieb einer Anlage verantwortlich und muss daher angehalten sein, alles zu unternehmen, um einen optimalen Betrieb zu gewährleisten.

## 4 Zusammenfassung

Ohne Anspruch auf Vollständigkeit werden hier bestimmte Brennstoffeigenschaften beschrieben. In der betrieblichen Praxis liegen die Probleme der Bestimmung dieser Eigenschaften oft an der starken Heterogenität der Brennstoffe. Somit scheitert die Bestimmung der jeweiligen Größen oft schon an der repräsentativen Probenahme. Für einige Eigenschaften kann jedoch ein „Work-around“ vorgeschlagen werden, um zu verlässlichen Zahlenwerten zu kommen.

Grundsätzlich gilt, dass für einen ordentlichen Betrieb einer Feststoffverbrennung die Abstimmung zwischen Brennstoff und Anlage elementar ist. Einerseits muss die Anlage für den vereinbarten Brennstoff ausgelegt sein, andererseits kann eine Anlage bei nicht kon-

formen Brennstoffen auch ihre vereinbarten Leistungen nicht erbringen. Wenn hier Hersteller und Betreiber „nicht zusammenkommen“, ist der wirtschaftliche Schaden für einen von Beiden (in der Regel für Beide) enorm. Es ist dringend zu empfehlen, dass hinsichtlich der Abstimmung von Brennstoff und Anlage alle Beteiligten an einem Strang ziehen. Dies gilt insbesondere auch für Brennstoffeinkäufer und Betreiber sowie die Kaufleute. Auch letztere können die Chemie und Physik nicht verbiegen; und sowohl Chemie wie auch Physik sind leider gnadenlos in ihren Konsequenzen.

## Literatur

[Danz, 2012] DANZ, P.; WIRTZ, S.; BEHLING, J.; KRÜGER, B.; BECKER, A.; ARNOLD, W.; MARZI, T.; WARNECKE, R.; WEGHAUS, M.: Optimierung der Feuerungsbedingungen durch Prozessmodellierung. In: VDI-Wissensforum (Hrsg.): *Feuerung und Kessel - Beläge und Korrosion in Großfeuerungsanlagen – Fachkonferenz am 12.-13. Juni 2012 in Bremen*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2012

[Marzi, 2007] MARZI, T.; WARNECKE, R.; WEGHAUS, M.; RIEDEL, H.: Freisetzung von Chlor- und Schwefelverbindungen aus unterschiedlichen Abfallfraktionen – Untersuchungen zur Beschreibung korrosionsrelevanter Vorgänge im Feuerraum. In: Waste-to-Energy (Hrsg.): *2. Jahrestagung - Tagung am 09.-10. Mai 2007 in Bremen*. Bremen: Waste-to-Energy, 2007

[Warnecke, 2011] WARNECKE, R.; DANZ, P.; MÜLLER, V.; WEGHAUS, M.; ZWIELLEHNER, M.: Validierung des Feuerungsprogramms „CombAte“ zur Prognose des Feuerungsverhaltens. In: VDI-Wissensforum (Hrsg.): *Feuerung und Kessel - Beläge und Korrosion in Großfeuerungsanlagen – Fachkonferenz am 07.-08. Juni 2011 in Kassel*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2011