

Beckmann, M.; Krüger, S.; Gebauer, K.; Pohl, M.; Spiegel, W.; Müller, W.: Methoden der Korrosionsdiagnose bei der Verbrennung schwieriger Brennstoffe. In: Thomé-Kozmiensky, K.-J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall - Band 6. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2009, S. 443-460. ISBN 978-3-935317-39-9. Erschienen auch in: Bilitewski, B.; Werner, P.; Rotter, S.; Hoffmann, G. (Hrsg.): Tagungsband EBS-Analytik 2, Qualitätssicherung und Inputkontrolle - Band 60. Dresden: Eigenverlag des Instituts für Abfallwirtschaft und Altlasten TU Dresden, 2009, S. 113-131. ISBN 978-3-934253-52-0

Korrosionsdiagnose

Methoden der Korrosionsdiagnose bei der Verbrennung schwieriger Brennstoffe

Michael Beckmann, Sascha Krüger, Kathrin Gebauer, Martin Pohl,
Wolfgang Spiegel und Wolfgang Müller

1.	Schwieriger Brennstoff: Einsatz von Biomasse und Ersatzbrennstoffen (EBS)	443
2.	Korrosionsrelevante Eigenschaften von Brennstoffen	445
3.	Vorgehensweise zur Bestimmung des Belagsbildungs- und Korrosionspotentials von Brennstoffen	447
4.	Diagnose am Brennstoff mit Hilfe eines Batch-Reaktors	450
4.1.	Beschreibung des Batch-Reaktors und der möglichen brennstofftechnischen Untersuchungen	450
4.2.	Erste beispielhafte Ergebnisse	454
5.	Zusammenfassung und Ausblick	457
6.	Literatur	459

1. Schwieriger Brennstoff: Einsatz von Biomasse und Ersatzbrennstoffen (EBS)

Der Einsatz von Biomasse hat in zahlreichen Anwendungsgebieten einen sehr hohen Stellenwert. Im Vordergrund steht die Schonung der Umwelt durch den Einsatz von Biomassen zur Energieerzeugung, um somit einen Beitrag zur Reduzierung der CO₂-Emissionen im Rahmen der Kyoto-Protokolle und Ressourcenschonung zu leisten. Biomasse ist mengenmäßig eine bedeutende regenerative Energiequelle und zeichnet sich durch ihre Speicherbarkeit und planbare Verfügbarkeit aus. Entscheidend für die Nutzung im Hinblick auf eine CO_{2,(fossil)}-Reduzierung und Ressourcenschonung ist die Wahl und Optimierung der zugehörigen Verfahren, was eine detaillierte Kenntnis der eingesetzten Biomasse-Brennstoffe und deren Verhalten im jeweiligen Prozess voraussetzt.

Ersatzbrennstoff weist demgegenüber etwas andere Charakteristika auf, gehört aber aus dem Blickwinkel der Verschmutzung und Korrosion ebenfalls zu den *schwierigen Brennstoffen*.

Die Energieeffizienz und die Verfügbarkeit von Biomasse- und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken werden insbesondere durch verstärkte Belagsbildung auf den Wärmetauscherflächen und durch die daraus resultierende Korrosion an Dampferzeugerrohren eingeschränkt. Die Bewertung der einzusetzenden Brennstoffe im Hinblick auf

das Belagsbildungs- und Korrosionspotential – vor dem Einsatz – in der jeweiligen Verbrennungsanlage stellt eine wichtige Voraussetzung für Anlagenplaner dar, bei der Planung von Neuanlagen, aber auch für Anlagenbetreiber, welche fossile Brennstoffe durch Biomasse-Brennstoffe und/oder Ersatzbrennstoffe substituieren wollen.

Die Substitution von fossilen Brennstoffen durch CO₂-neutrale Brennstoffe wird für die Anlagenbetreiber immer interessanter. Gleichzeitig jedoch ist es aus ökologischer aber auch aus ökonomischer Sicht erforderlich, eine hohe Energieeffizienz und eine hohe Verfügbarkeit zu erreichen, was, wie bereits beschrieben, aufgrund des Korrosionspotentials der schwierigen Brennstoffe nicht ohne weiteres möglich ist. Deswegen ist es notwendig, Korrosionsrisiken im Vorfeld einzugrenzen und abzuschätzen, da durch die Vermeidung/Verminderung von Korrosionen eine Erhöhung der Energieeffizienz und der Anlagenverfügbarkeit erreicht werden kann.

Die Korrosionsrelevanz ergibt sich nicht nur aus der Fracht, sondern aus den stofflichen Bindungen und aus den Proportionen an potentiellen Reaktionspartnern im Brennstoff. Dies kann bei chemischen Brennstoffanalysen nicht ausreichend berücksichtigt werden. Aus diesem Grund ist es notwendig, ausgehend von den chemischen Brennstoffanalysen und den reaktionstechnischen Eigenschaften der jeweiligen Brennstoffe, korrosionsrelevante Eigenschaften zu ermitteln und Methoden zu entwickeln, welche es ermöglichen, eine Bewertung des Belagsbildungs- und Korrosionspotentials von Brennstoffen vor dem großtechnischen Einsatz durchzuführen.

Der Bedarf für eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Werkzeuge zur Gewichtung von Risiken der Verschmutzung und Korrosion ist auch durch die sich stetig ändernden Randbedingungen – d.h. Anreize – im Markt der Dampferzeuger mit schwierigen Brennstoffen gegeben. Hierzu gehören das Streben nach möglichst hoher Energieeffizienz bei Verstromung, das Erreichen von Schwellen zur gesetzlich geregelten Förderung, das energetische Nutzen neuer Brennstoffressourcen – von Nusschalen bis Hühnermist –, die Maximierung der Verfügbarkeit – konstant hohe Last –, und nicht zuletzt das Erzielen möglichst langer Reisezeiten. Die meisten dieser Anreize wirken sich aber auf unterschiedlichste Weise antreibend auf Korrosionsrisiken aus.

In den zurückliegenden zehn bis zwanzig Jahren haben sich im Kreis der Betreiber von Kraftwerken mit schwierigen Brennstoffen, insbesondere Abfallverbrennungsanlagen betreffend, einige empirische Zusammenhänge als in der Regel zutreffend herausgebildet. Hierzu gehören:

Korrosion wird schlimmer,

- wenn die Druckstufe deutlich über 40 bar gewählt wird,
- wenn die Endüberhitzung des Frischdampfes deutlich über 400 °C gewählt wird,
- wenn der Brennstoff hohe Frachten an chlorhaltigen Stoffen und/oder geringe Frachten an schwefelhaltigen Stoffen aufweist,
- wenn die Brennstoffmerkmale – Chemie, Feuchte, Heizwert – stark schwanken.

Diese Handreichungen und Hilfen beim Umgang mit Korrosionsrisiken sind nicht mehr ausreichend und müssen erweitert werden. Die Autoren dieses Beitrages – Hochschule und Gutachter/Berater – versuchen die Annäherung an diese Aufgabe durch Vernetzung von Informationen und Erkenntnissen aus ihren jeweiligen Erfahrungswelten, die unterschiedliche Schwerpunkte haben. Gemeinsam sind wir überzeugt, dass die Planer, Erbauer, Systemlieferanten, Eigentümer und Betreiber von Dampferzeugern mit schwierigen Brennstoffen willens sind, neue Informationsquellen und -qualitäten aufzunehmen und in ihr jeweiliges Handeln einzubinden.

2. Korrosionsrelevante Eigenschaften von Brennstoffen

Für den Einsatz fossiler Brennstoffe – Kohle, Erdöl, Erdgas usw. – bei industriellen Hochtemperaturverfahren, wie dem Brennen von Zementklinker oder im Bereich der Energieumwandlung in Kraftwerksanlagen, liegen umfangreiche Untersuchungen und Erfahrungen zur Optimierung der Prozessführung vor. Dabei konnten in Verbindung mit den einzelnen Prozessen brennstofftechnische Kriterien abgeleitet werden [1, 2, 3, 4 und 21], welche die Eigenschaften eines Brennstoffes aus brennstofftechnischer Sicht beschreiben.

Die brennstofftechnischen Eigenschaften lassen sich wie in Bild 1 dargestellt, untergliedern.



Bild 1: Brennstofftechnische Eigenschaften zur Charakterisierung von Brennstoffen

Bei der Beurteilung der Eigenschaften eines Brennstoffes sind selbstverständlich die jeweiligen prozesstechnischen Randbedingungen einzubeziehen, d.h., bestimmte Kriterien werden immer im Zusammenhang mit dem jeweiligen Einsatzgebiet, dem technischen Prozess und den jeweiligen Apparaten festgelegt.

Reaktionstechnische Eigenschaften von Brennstoffen sind im engeren Sinne kinetische Daten, z.B. zur Freisetzung von flüchtigen Bestandteilen, Gleichgewichts- und Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten usw. Im weiteren Sinne lassen sich auch das Zünd- und Ausbrandverhalten, die Verschlackungsneigung und das Belagsbildungs- und Korrosionspotential den reaktionstechnischen Eigenschaften zuordnen. Das Zünd- und Ausbrandverhalten ist neben den eigentlichen kinetischen Daten von einer Reihe von Parametern wie dem Anteil der flüchtigen Bestandteile, der Korngrößenverteilung, der Wärmeleitfähigkeit usw. abhängig. Ebenso lässt sich das Korrosionspotential nicht durch eine Größe allein, z.B. durch den Chlorgehalt, ausdrücken. Vielmehr ist das Korrosionspotential eines Brennstoffes als Summenparameter zu verstehen, der über die brennstofftechnischen Eigenschaften hinaus durch die prozesstechnischen Gegebenheiten – Prozessführung, betriebliche und konstruktive Parameter – beeinflusst wird [6].

Die Chlorbindungsform spielt für die Freisetzung und Belagsbildung bei einer thermischen Nutzung eine wichtige Rolle. Bei den komplexen Reaktionen und Phasenübergängen sind neben dem Chlor auch die Stoffgruppe der Schwermetalle und die Alkalien zu berücksichtigen. Daraus resultiert das anorganisch gebundene Chlor. Als problematisch für die Belagsbildung soll stellvertretend Kaliumchlorid (Schmelzpunkt: 772 °C) genannt werden. Anhand des Dampfdruckes (0,1 mbar/700 °C) wird erkennbar, dass bereits bei üblichen Feuerraumtemperaturen erhebliche Anteile in die Gasphase übergehen. Die gasförmigen Kaliumverbindungen scheiden sich dann an kalten Flächen – z.B. Wärmeübertragerflächen –, deren Temperatur unterhalb der jeweiligen Schmelztemperaturen liegt, ab und erstarren.

Hauptquelle für organisch gebundenes Chlor ist PVC, welches bei Temperaturen > 180 °C unter Abspaltung von HCl thermisch zersetzt wird. Entscheidend für die Korrosionsbildung ist nun, ob HCl mit dem Abgasstrom ausgetragen wird, oder ob es zu o.g. Reaktionen mit den Schwermetallen und/oder Alkalien und damit zu Salzablagerungen kommt. Außerdem haben die Schwefelverbindungen, und hier vor allem das Schwefeltrioxid, aufgrund der Wechselwirkungen zwischen Schwefel- und Chlorverbindungen – Sulfatisierungsreaktionen – entscheidende Bedeutung.

Aus stofflicher Sicht ergibt sich insgesamt ein breites Feld von korrosionsrelevanten Elementen, beispielhaft abzulesen an der unterschiedlichen Korrosionswirkung der Chlor- und Schwefelverbindungen. Es wird daher deutlich, dass z.B. der Gesamtchlorgehalt als ein Gütekriterium für Ersatzbrennstoffe und Biomassen nicht ausreichend ist. Der entscheidende Einfluss der Chlorbindungsform bzw. der Schwefelbindungsform auf das thermische Verhalten sollte durch Ermittlung des anorganischen und des organischen Chloranteils bzw. Schwefelanteils im Brennstoff Berücksichtigung finden.

Erhöhte Frachten an HCl werden als negativ gewertet. Jedoch ist die Aufteilung des Chlors im Brennstoff in die beiden Teilströme HCl und chloridisches Salz sehr von der betrieblichen Situation abhängig und kann in weiten Grenzen schwanken. HCl ist der inerte, unwirksame Teilstrom. Korrosionsrelevant ist vor allem das im Belag gebundene Chlor.

Erhöhte Frachten an SO_2 und/oder SO_3 werden als positiv gewertet. Die gleiche Argumentation wie beim Chlor gilt jedoch auch für SO_2/SO_3 und die sulfatischen Salze. Auch hier kann aus dem Messwert des SO_2 nicht auf die Fracht an sulfatischen Salzen geschlossen werden. SO_2 und vor allem SO_3 wird als wirksamer Reaktionspartner gegenüber den gelösten oder auskristallisierten Chloriden angesehen, es führt zur Sulfatisierung der Spezies im Abgas und soll damit die Korrosionsrelevanz mildernd beeinflussen. Dieser Zusammenhang ist für die Praxis bei der Verbrennung schwieriger Brennstoffe nicht gesichert – unter Umständen bedingt durch kinetische Hemmung.

Der Beitrag von Krüger [12] befasst sich mit der bisher erheblich vernachlässigten Rolle des SO_3 . Dieser gasförmige Bestandteil des Abgases scheint sehr sensibel auf die Milieubedingungen der Feuerung zu reagieren und ist zudem weitgehend unsichtbar, d.h. es gibt keine geeigneten Messverfahren – außer der Taupunktmessung am Kesselende, aber da sind die für den Kessel korrosionsrelevanten Prozesse bereits abgeschlossen, d.h. der Messwert ist für die Prozesse im Strahlungs- und Berührungsteil nicht mehr diagnostisch.

Zur Untersuchung des Korrosionsverhaltens von Brennstoffen ist es somit erforderlich, detaillierter den Verbrennungsvorgang und das Abgas, sowie die sich gleichzeitig bildenden Beläge zu untersuchen, jedoch immer in Abhängigkeit des jeweiligen Brennstoffes.

In einem ersten Schritt sind diesbezüglich Methoden bzw. Verfahren notwendig, die in der Lage sind, die Auswirkungen der Betriebsweise einer Feuerung und die Merkmale des eingesetzten Brennstoffs und die damit verbundene Belagsbildung sowie deren Korrosionsneigung zeitaufgelöst abzubilden, so dass im zweiten Schritt ein Bewertungsmaßstab für schwierige Brennstoffe entwickelt werden kann.

3. Vorgehensweise zur Bestimmung des Belagsbildungs- und Korrosionspotentials von Brennstoffen

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, eine Analyse der brennstofftechnischen Eigenschaften von Brennstoffen (Bild 1) und eine Diagnose zum Belagsbildungs- und Korrosionspotential vor, während und nach dem Einsatz des Brennstoffes in der jeweiligen Anlage durchzuführen (Bild 2). Man unterscheidet dabei grob in

- Diagnose am Brennstoff,
- Diagnose im Betrieb und
- Diagnose durch stetige Begleitung bei Stillständen.

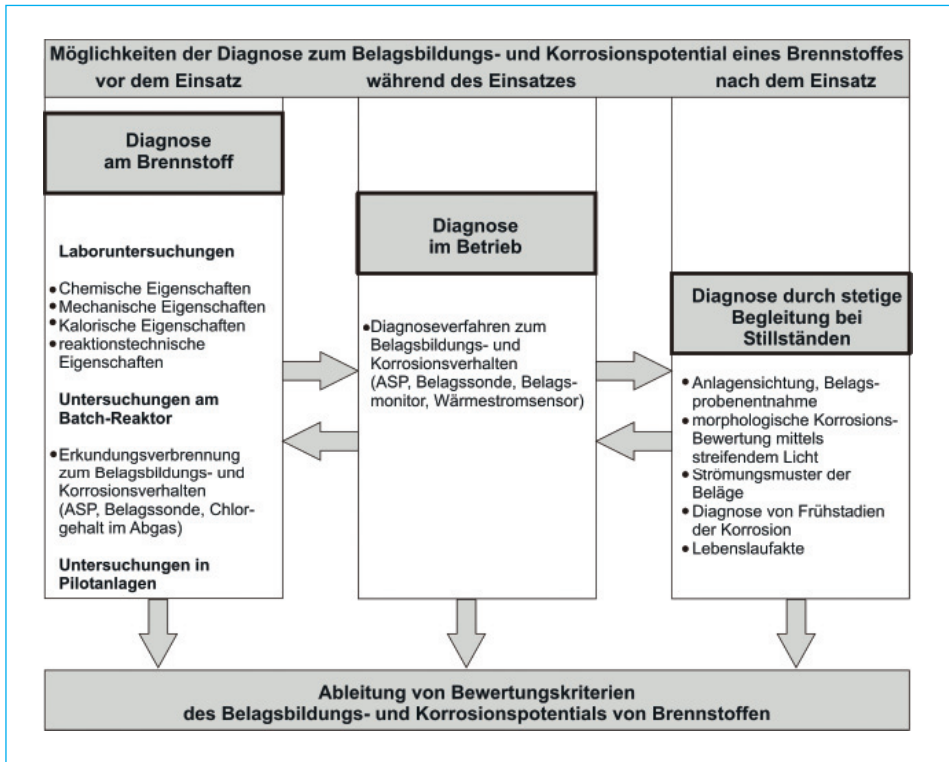


Bild 2: Vorgehensweise bei der Ableitung von Bewertungskriterien

Die einfachste aber auch in ihrer Aussage genaueste Möglichkeit, das Belagsbildungs- und Korrosionspotential zu bewerten, besteht *nach dem Einsatz* des Brennstoffes in der Anlage, während eines Stillstandes. Eine frühzeitige Erkennung von negativen Einflüssen auf die Anlage oder die Eignung des Brennstoffes für die jeweilige Anlage ist aber mit Hilfe dieser Methode nicht bzw. nur nach bereits gesammelten positiven oder negativen Erfahrungen mit dem Brennstoff möglich.

Dahingegen sind labortechnische Untersuchungen *vor dem Einsatz* des Brennstoffes in einer Anlage allgemein akzeptiert und in jedem Fall durchzuführen. So können auf relativ schnelle Art und Weise und vor allem ohne Schaden in der Anlage zu verursachen, erste Diagnosen zum Brennstoffverhalten ermittelt werden. Auf die labortechnischen Untersuchungen wurde schon in einer Vielzahl von Veröffentlichungen eingegangen z.B. [3] und [9], so dass diese hier nicht weiter erläutert werden. Nur im Hinblick auf die Fragestellung der Genauigkeit der Prognose sollte, wie schon erwähnt, beachtet werden, dass das Korrosionsverhalten über die chemischen, kalorischen und mechanischen Eigenschaften hinaus durch die prozesstechnischen Gegebenheiten (Prozessführung, betriebliche und konstruktive Parameter) – die reaktionstechnischen Eigenschaften – beeinflusst wird.

Bei Untersuchungen zum Ascheschmelzverhalten von Mischungen aus Braunkohle und Ersatzbrennstoffen wurde festgestellt [1], dass die Temperaturdifferenz tendenziell vom Erweichungspunkt bis hin zum Fließpunkt von Braunkohle über die Mischungen mit Ersatzbrennstoffen bis hin zum einzelnen Ersatzbrennstoff immer geringer wird, jedoch nicht wie erwartet proportional zueinander. Z.B. kann die Halbkugeltemperatur der Mischungen durchaus auch größere Werte annehmen, als die der beiden Ausgangsbrennstoffe. Zuverlässige Aussagen zum Belagsbildungs- und Korrosionspotential sind auch mit dem S/Cl-Verhältnis nicht möglich, da wie bei den Versuchen zum Ascheschmelzverhalten von Mischungen, wo eine einfache Mischungsrechnung der Ascheschmelzpunkte nicht möglich ist, auch hier die Brennstoffchemie und die Prozessbedingungen zur Freisetzung des Chlors [6] eine entscheidende Rolle spielen.

Um die prozesstechnischen Gegebenheiten und deren Einfluss auf das Verhalten des jeweiligen Brennstoffes zu ermitteln, besteht die Möglichkeit, Anlagen im Pilotanlagen- bzw. Technikums-Maßstab einzusetzen und Voruntersuchungen durchzuführen. In z.B. [1] und [14] wurde auf diese Möglichkeiten näher eingegangen.

Für die Ermittlung des Belagsbildungs- und Korrosionspotentials besteht zur Diagnose des Brennstoffes die Möglichkeit, die von der Firma CheMin GmbH, Augsburg entwickelten und für großtechnische Anlagen erprobten Verfahren ASP und Belagsmonitor bzw. Belagssonde [17] einzusetzen. Derzeit werden diese Verfahren zur Diagnose im Betrieb eingesetzt.

Die Verfahren sind in der Lage die Belagsbildungsprozesse abzubilden. Die Informationen zu den chemisch-mineralischen Milieuparametern des auf dem Monitor gebildeten Belags werden mit orts aufgelösten Analyseverfahren ermittelt. Die isokinetische Beprobung der Abgaspartikel – Verfahrenskürzel: ASP, Asche-Salz-Proportionen – erzeugt ein Abbild der im Abgaspfad transportierten Frachten von festen und desublimierbaren Stoffen, sowie deren Proportionen untereinander in Abhängigkeit der Wechselwirkung Brennstoff-Feuerung. Diese Informationen lassen sich im ASP-Diagramm klassieren und sind relevant für Bewertungen des Korrosionspotentials. Für das Belagsbildungspotential auf den Strahlungsoberflächen des Kessels in der Anlage können des Weiteren *während des Einsatzes* Aussagen mit Hilfe von Wärmestromsensoren getroffen werden.

Grundsätzlich besteht auch die Möglichkeit, die isokinetische Beprobung – Belagssonde und ASP – im Batch-Reaktor anzuwenden. Durch eine Erkundungsverbrennung in Verbindung mit der isokinetischen Beprobung *vor dem Einsatz* des Brennstoffes in einer Anlage, können erste Aussagen zum Belagsbildungs- und Korrosionsverhalten des Brennstoffes getroffen werden. In Hinsicht auf die zeitliche Verfügbarkeit der Daten, die Genauigkeit der Prognosen, die Möglichkeit der Prozessabbildung und den jeweiligen Aufwand sowie das zugehörige Schadenvermeidungspotential (Bild 3) erschien es sinnvoll, erste Versuche durchzuführen und einen Vergleich der ermittelten Daten der isokinetischen Beprobung *vor dem Einsatz* im Batch-Reaktor und *während des Einsatzes* in einer Anlage durchzuführen.

	Diagnose am Brennstoff			Diagnose im Betrieb	Diagnose durch stetige Begleitung bei Stillständen
	Labor	Batch	Pilot		
Verfügbarkeit der Daten (zeitlich)	++	++	+	O	-
Genauigkeit der Prognose	-	+	+	+	++
Prozessabbildung	--	O	+	++	++
Aufwand für Ergebnisse	--	--	O	+	+
Schadenvermeidungspotential	++			+	+

Bewertung:
++ hoch → -- niedrig

Bild 3: Bewertung der Diagnosemöglichkeiten zum Belagsbildungs- und Korrosionspotential

In den folgenden Abschnitten steht der erste der drei diagnostischen Schritte, die Diagnose am Brennstoff, im Vordergrund, d.h. insbesondere der Batch-Reaktor und die Möglichkeiten der brennstofftechnischen Untersuchungen. Erste Ergebnisse, zum Vergleich von Brennstoffen anhand der isokinetischen Beprobung im Batch-Reaktor und in der realen Anlage – Belagssonde –, werden vorgestellt.

Die Anwendung der beiden anderen Diagnoseschritte zum Aufzeigen von Belagsbildungs- und Korrosionspotentialen, die Diagnose im Betrieb und die Diagnose bei Stillständen, ist seitens der Autoren u.a. unter dem Thema der *Korrosionsfrüherkennung* beschrieben worden. Diesbezüglich steht bereits ein breites Erfahrungsspektrum aus gutachterlicher und beratender Tätigkeit zur Verfügung [10, 15 und 18].

4. Diagnose am Brennstoff mit Hilfe eines Batch-Reaktors

4.1. Beschreibung des Batch-Reaktors und der möglichen brennstofftechnischen Untersuchungen

Bei kontinuierlich betriebenen Rostsystemen – mit bewegtem Rost – laufen die Teilschritte Trocknung, Entgasung, Vergasung und Restausbrand des Feststoffes entlang des Reaktionsweges – Rostlänge – nahezu gleichzeitig ab. Beim Batch-Reaktor wird der Brennstoff diskontinuierlich zugegeben. Die einzelnen Prozessschritte laufen dabei zeitlich hintereinander in einem instationären Betrieb ab.

Die dabei wesentlichen Haupteinflussgrößen sind in [16] beschrieben. Bei Rostsystemen können insbesondere die Sauerstoffkonzentration, die Temperatur und die Verweilzeit unabhängig voneinander entlang des Reaktionsweges gesteuert werden.

Grundlegende Untersuchungen an einem kontinuierlichen Rostsystem sind jedoch aufgrund der hohen Versuchsdauer sehr aufwendig. Zur Verminderung des Versuchsaufwandes ist der Einsatz eines chargenbetriebenen Versuchsrostes zweckmäßig [5, 7 und 8]:

Der Prozess im Batch-Reaktor lässt sich wie folgt charakterisieren:

- Der Brennstoff wird kalt in den Reaktionsraum gegeben, dessen Wände vorher auf eine Temperatur – 800 °C bis 900 °C – aufgeheizt wurden.
- Die Brennstoffschüttung wird von unten nach oben von einem Reaktionsgas durchströmt.
- Die für den Kohlenstoffumsatz notwendige hohe Reaktionstemperatur wird durch Strahlungswärmeübertragung von den Wänden auf den Feststoff und das Gas erreicht.
- Mit steigender Temperatur nehmen die Reaktionsgeschwindigkeit und der Kohlenstoffumsatz zu.
- Bei einem ausreichend hohen Umsatzstrom werden die Wände weiter aufgeheizt. In diesem Fall wird Wärme vom Brennstoffbett auf die Feuerraumwände übertragen.
- Mit zunehmendem Kohlenstoffumsatz nimmt die reaktive Oberfläche des Brennstoffes und damit die Freisetzung der chemischen Energie wieder ab.

Danach ist der weitere Verlauf der Reaktion von der im Bett gespeicherten Energie abhängig. Bei einem Brennstoff mit geringer Speicherfähigkeit – geringer Inertanteil – sinkt die Temperatur der Schüttung infolge der Kühlwirkung des Reaktionsgases schnell ab, so dass die Reaktion bei vergleichsweise hohen Restkohlenstoffgehalten abbricht (*Kaltblasen*).

Hat der Brennstoff eine große Wärmespeicherfähigkeit – hoher Inertanteil –, findet die Abkühlung langsamer statt. Die nötige Reaktionstemperatur kann länger aufrechterhalten werden, so dass der im Inertbett eingebundene Kohlenstoff weiter umgesetzt werden kann. Der Restkohlenstoffgehalt am Ende sinkt weiter ab.

In Bild 4 ist der Aufbau des Batch-Reaktors dargestellt. Der Batch-Reaktor setzt sich aus einer beweglichen Retorte (6) und einem feststehenden Feuerraum (7) zusammen. Feuerraum und Retorte sind mit Feuerfestmaterial und einer Isolierschicht ausgemauert (8). Der freie Querschnitt in Feuerraum und Retorte beträgt 415 x 265 mm. Retorte und Feuerraum bestehen aus vier Segmenten, die im Weiteren als Segment 1 (Rostretorte) bis Segment 4 (oberstes Segment des Feuerraumes) bezeichnet werden. Die Rostretorte kann auf Schienen unter den Feuerraum bewegt werden. Am Boden der Retorte befindet sich die Primärluftzuführung (4). An der Retorte kann der Druckverlust an fünf Messstellen über dem Rost bzw. dem Feststoffbett sowie die Retortenwandtemperatur gemessen werden.

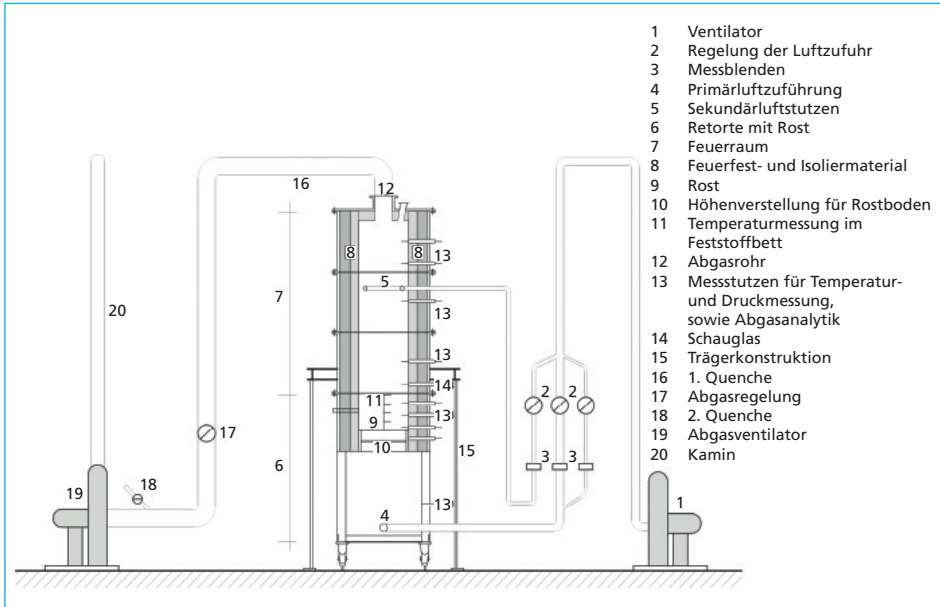


Bild 4: Aufbau des Batch-Reaktors

Der Innenraum der Retorte ist nach unten durch den Rost (9) begrenzt. Der Rost trägt einerseits das Brennstoffbett und muss andererseits bei gleichmäßiger Verteilung der Primärluft einen geringen Rostdurchfall realisieren. Dies wird hier durch eine freie Rostfläche von etwa 4 % angestrebt, wobei die freie Rostfläche das Verhältnis von offenen Spalten auf dem Rost – durch die von unten die Primärluft strömt – zu der gesamten Rostfläche darstellt.

Die Spaltengröße und -anzahl muss so gewählt sein, dass einerseits eine ausreichende Strömungsgeschwindigkeit der Primärluft erreicht wird, und andererseits eine gute Verteilung des Reaktionsgases gewährleistet wird. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass sich die Spalten nicht zu leicht mit Feststoffpartikeln zusetzen.

In Abhängigkeit von den geforderten Versuchsbedingungen kann der Rost vor dem Versuch in der Höhe angepasst werden. Die Temperaturmessung im Brennstoffbett wird mit vier Thermoelementen durchgeführt, die an einer Vorrichtung, dem so genannten *Galgen* (11) angebracht sind. Am Rost selbst befindet sich eine Messstelle zur Messung der Rosttemperatur. Der Feuerraum (7) wird aus den Segmenten 2, 3 und 4 gebildet, die über Flanschverbindungen fest miteinander verschraubt und abgedichtet sind, und von einer im Boden verankerten Trägerkonstruktion aus Profilstahl getragen werden. In jedem Segment des Feuerraumes befinden sich seitlich Messstellen zur Messung von Druck und Temperatur (13). In den Segmenten 2 und 4 befinden sich zusätzliche Messstellen für die Abgasanalytik (13). Im Segment 3 sind außerdem zwei Stutzen (5) eingelassen, an denen die Lanzen für die Sekundärluftleitung befestigt sind. An der Unterkante von Segment 2 ist ein Stutzen mit Schauglas für die visuelle Flammenüberwachung im Feuerraum (14) angebracht.

Versuche zur Charakterisierung des Verbrennungsverlaufs bei Steinkohlen und zum Temperaturverlauf im Brennstoffbett wurden erstmals in den frühen dreißiger Jahren in Batch-Reaktoren durchgeführt [20, 22]. Damals wurden Batch-Reaktoren zur Optimierung für den Bau und Betrieb von Rostfeuerungen genutzt. Insbesondere in [22] wurden derzeit schon die folgenden Fragen gestellt: Kennen wir unsere Brennstoffe genau genug, um ihnen in den Feuerungen die bestmöglichen Bedingungen zu schaffen und wie verhalten sich die Brennstoffe unter den ihnen in den Feuerungen aufgezwungenen Bedingungen?

Aus dieser Fragestellung heraus wurden für Regelbrennstoffe verschiedene Methoden entwickelt [23], die es ermöglichten, Regelbrennstoffe je nach Anwendung zu klassifizieren.

Heute stellen sich erneut die gleichen Fragen, da z.B. biogene Brennstoffe wie schon beschrieben in zahlreichen Anwendungsgebieten einen sehr hohen Stellenwert einnehmen und die Schonung der Umwelt durch den Einsatz von Biomassen zur Energieerzeugung einen Beitrag zur Reduzierung der CO₂-Emissionen im Rahmen der Kyoto-Protokolle und Ressourcenschonung leisten.

Die für die Regelbrennstoffe entwickelten Methoden zur Charakterisierung lassen sich nicht ohne weiteres auf biogene Brennstoffe oder Ersatzbrennstoffe übertragen, d.h., für biogene Brennstoffe und Ersatzbrennstoffe sind zunächst geeignete Methoden zur Ermittlung brennstofftechnischer Eigenschaften zu entwickeln. Aufgrund des Fehlens von Informationen des brennstofftechnischen Verhaltens dieser Brennstoffe in verschiedenen Feuerungen lassen sich derzeit auch nur schwierig, und dabei jeweils im Einzelfall abschätzend, Kriterien für bestimmte Parameter festlegen. Bei Regelbrennstoffen sind diese Kriterien besonders in Kraftwerksanlagen bekannt und werden streng überwacht, um insbesondere Probleme im Hinblick auf Zündung, Ausbrand, Verschlackung und Korrosion zu vermeiden.

Die Möglichkeit der Brennstoffcharakterisierung von biogenen Brennstoffen und Ersatzbrennstoffen wurde unter anderem (Zündofen, Fallrohr- und Verschlackungsreaktor [13]) z.B. mit Hilfe von Batch-Reaktoren in einem Forschungsvorhaben untersucht [1]. Dabei wurden verschiedene Parameter, wie die Reaktionsfrontgeschwindigkeit [7, 10] bei der Untersuchung verschiedener Brennstoffe bei annähernd gleichen Versuchsbedingungen in drei, von ihrer Konstruktion her unterschiedlich aufgebauten, Batch-Reaktoren miteinander verglichen. Die ermittelten Ergebnisse der Untersuchungen ergaben nur geringe Abweichungen. Eine Eignung des Batch-Reaktors als Methode zur Charakterisierung von Brennstoffen konnte somit nachgewiesen werden.

Im zweiten Schritt soll nun die Möglichkeit untersucht werden, ausgehend von den chemischen Brennstoffanalysen und den reaktionstechnischen Eigenschaften der jeweiligen Brennstoffe, korrosionsrelevante Eigenschaften – isokinetische Beprobung, Abgasanalysen – zu ermitteln und Verfahren weiter zu entwickeln, welche es ermöglichen, eine Bewertung des Belagsbildungs- und Korrosionspotentials von Brennstoffen vor dem großtechnischen Einsatz durchzuführen.

Das Korrosionspotential eines Brennstoffes wird nicht nur über die chemischen Eigenschaften (Chlorgehalt, Ascheschmelzverhalten usw.), sondern auch durch die prozesstechnischen Gegebenheiten (Prozessführung, betriebliche und konstruktive Parameter) beeinflusst.

Mit Hilfe eines Batch-Reaktors ist es im Technikums-Maßstab möglich, z.B. durch verschiedene Luftstufungen [8] die Teilschritte des Feststoffumsatzes – Pyrolyse, Vergasung und Verbrennung – zu steuern und so gezielt die prozesstechnischen Gegebenheiten bei der thermischen Behandlung zu verändern. Das brennstofftechnische Verhalten kann so je nach Brennstoff und dazugehöriger Prozessführung untersucht werden.

4.2. Erste beispielhafte Ergebnisse

Wie in Kapitel 3 erläutert, besteht grundsätzlich die Möglichkeit die brennstofftechnischen Eigenschaften von Brennstoffen zu bestimmen und eine Diagnose zum Belagsbildungs- und Korrosionspotential (Bild 2)

- vor dem Einsatz – Diagnose am Brennstoff –,
- während des Einsatzes – Diagnose im Betrieb – und
- nach dem Einsatz in der jeweiligen Anlage – Diagnose durch stetige Begleitung bei Stillständen –

durchzuführen.

Die hier nicht im vollen Umfang vorgestellten Ergebnisse stammen aus Untersuchungen an einer zirkulierenden Wirbelschichtanlage, bei der die Auswirkungen der Substitution von Regelbrennstoffen (Steinkohle) durch Biomasse-Brennstoffe (Holzpellets) untersucht wurden. Bilder der untersuchten Brennstoffe sind in Bild 5 dargestellt.



Bild 5: Bilder der Brennstoffe

Zur Ermittlung der chemischen, kalorischen und mechanischen Eigenschaften wurden im ersten Schritt Laboruntersuchungen durchgeführt, wodurch ein erster Vergleich der Brennstoffeigenschaften möglich ist. Die Elementaranalyse und der Heizwert der Brennstoffe sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Laboranalysen der Brennstoffe

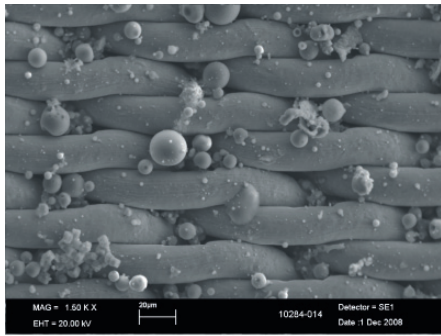
	Einheit	Steinkohle	Holzpellets
chemische Eigenschaften			
Wassergehalt	Ma.-% (an)	9,81	4,82
Aschegehalt	Ma.-% (wf)	12,1	0,32
Kohlenstoffgehalt	Ma.-% (wf)	76,9	50,2
Wasserstoffgehalt	Ma.-% (wf)	4,04	6,06
Stickstoffgehalt	Ma.-% (wf)	1,8	0,52
Schwefel, gesamt	Ma.-% (wf)	0,76	0,005
Chlor, gesamt	Ma.-% (wf)	0,13	0,02
Ascheschmelzverhalten (Fließpunkt)	°C	> 1.300	> 1.400
kalorische Eigenschaften			
Heizwert (H_u)	MJ/kg (wf)	29,8	18,8
mechanische Eigenschaften			
Schüttdichte	kg/m ³	800	650

Laboranalysen sind als erster Schritt zur Brennstoffcharakterisierung notwendig, z.B. um den Biomasse-Brennstoffbedarf bei der Substitution zu bestimmen. Da die Feuerungswärmeleistung trotz der Substitution des fossilen Brennstoffes Steinkohle (Verringerung des Massenstromes) durch den Biomasse-Brennstoff Holzpellets konstant bleiben soll, kann ausgehend von den im Labor bestimmten Heizwerten der einzusetzende Massenstrom beider Brennstoffe theoretisch berechnet werden.

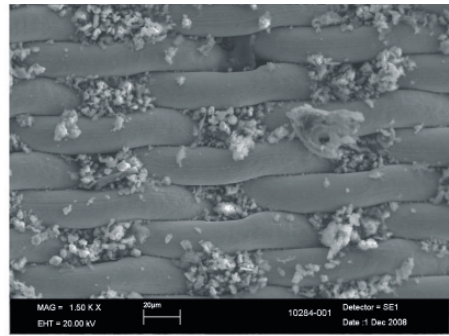
Des Weiteren sind die Laboranalysen für die Versuchsplanung am Batch-Reaktor notwendig, z.B. im Hinblick auf die zu erwartenden Temperaturen im Reaktor und der zuzugebenden Luftmenge sowie für die Bilanzierung der Versuche.

Ausgehend von den labortechnischen Ergebnissen soll nun auf die isokinetische Beprobung im Batch-Reaktor und in der Wirbelschichtanlage eingegangen werden. Dazu wurden Belagssondenmessungen in beiden Anlagen durchgeführt. Die Beprobung wurde dabei identisch und bei ähnlichen Temperaturverhältnissen (etwa 300 °C) durchgeführt, um die ersten Ergebnisse am Batch-Reaktor mit denen der Wirbelschichtanlage vergleichen zu können.

Abhängig von der Entnahmeposition (Messöffnung im Kessel) und der damit gegebenen Abgastemperatur 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 (grobe und feine Partikel, besonders korrosionsrelevante Salzschnmelzen [17]) 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 am Belagsaufbau teilnehmenden Partikel des Rohgases an der Beprobungsposition. In Bild 6 sind beispielhaft Aufnahmen der Belagssonden dargestellt, welche mit Hilfe der Rasterelektronen-Mikroskopie (REM) erstellt wurden.



**Batch-Reaktor
"Diagnose
am Brennstoff"**



**Wirbelschichtanlage
"Diagnose
im Betrieb"**

Bild 6: REM-Aufnahmen der Belagssondenmessung

Optisch sind Unterschiede der auf der Belagssonde abgelagerten Partikel erkennbar, sowohl von der Fracht, als auch von der Größe der Partikel. Die Struktur der Partikel hingegen ist sehr ähnlich. In den meisten Fällen handelt es sich um grobe bis feine, meist feste Partikel, Salzschnmelzen sind hier auf den ersten Blick nicht zu erkennen.

Die Unterschiede sind zum Teil darin begründet, dass die Belagssondenmessung im Batch-Reaktor mit einer Brennstoffmischung von 50 % Steinkohle und 50 % Holzpellets und in der Wirbelschichtanlage mit einer Brennstoffmischung von 65 % Steinkohle und 35 % Holzpellets bzw. 75 % / 25 %, immer bezogen auf die Feuerungswärmeleistung (FWL), durchgeführt wurde.

Ausgehend von dem Sedimentationsgefüge wurden die chemischen Daten aus Punkt- und Kleinflächenmessungen der abgelagerten Partikel untersucht. Im Folgenden ist der Vergleich der Messungen – Batch-Reaktor und Wirbelschichtanlage – für Magnesium, Silizium, Chlor und Natrium dargestellt (Bild 7).

Im Bild sind beispielhaft von drei Belagssondenmessungen

- V1-Wirbelschicht, Diagnose im Betrieb 65 % / 35 % (FWL)-Mischung,
- V2-Wirbelschicht, Diagnose im Betrieb 75 % / 25 % (FWL)-Mischung und
- V3-Batch-Reaktor, Diagnose am Brennstoff 50 % / 50 % (FWL)-Mischung

jeweils die größten, kleinsten und der Mittelwert der Messungen abgebildet.

Die chemischen Daten aus Punkt- und Kleinflächenmessungen der abgelagerten Partikel von den Belagssondenmessungen im Batch-Reaktor und in der Wirbelschichtanlage stimmen in der Größenordnung gut überein. Zur wissenschaftlichen Absicherung der Rückschlüsse auf das Belagsbildungs- und Korrosionspotential sind jedoch weitere Messungen und Untersuchungen erforderlich. Aus diesem Grunde wird zum jetzigen Zeitpunkt auf eine Bewertung der Ergebnisse der Belagssondenmessung verzichtet.

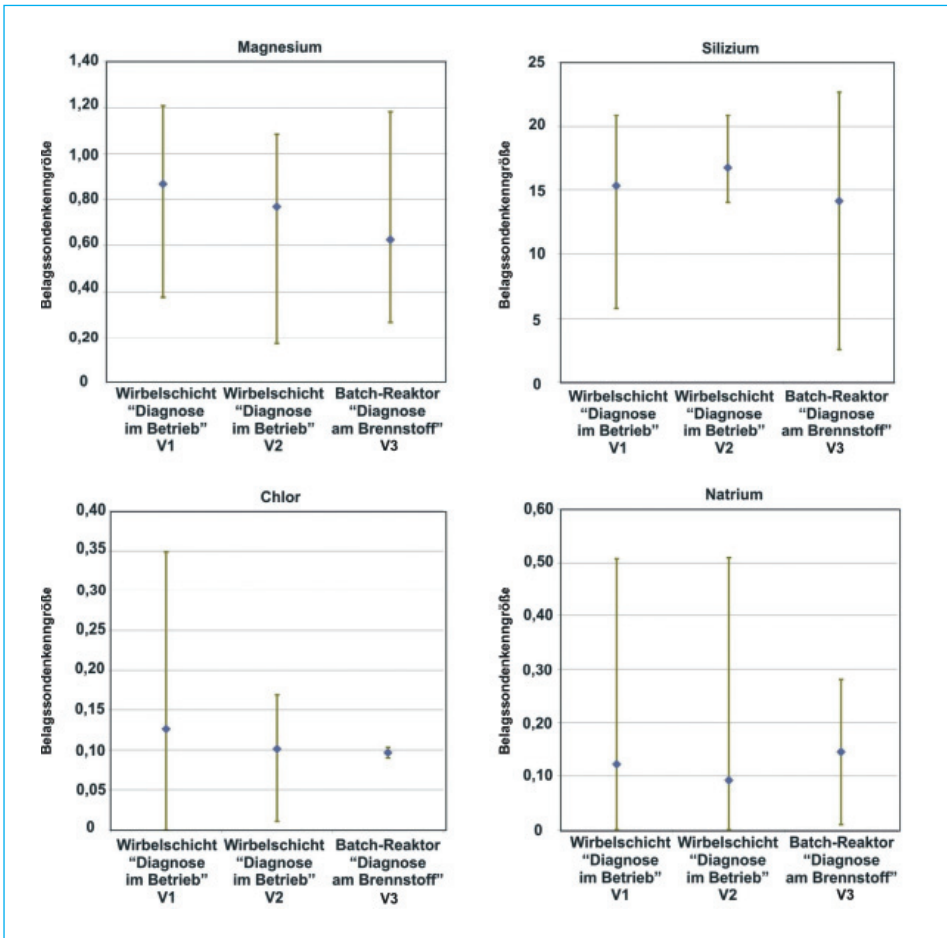


Bild 7: Vergleich der Ergebnisse der chemischen Analyse der Punkt- und Kleinflächenmessungen der abgelagerten Partikel auf der Belagssonde

Die gute Übereinstimmung insbesondere im Hinblick auf die Mittelwerte der Frachten im Batch-Reaktor im Vergleich zu den Werten der realen Anlage zeigt, dass es durchaus realistisch ist, mit Hilfe des Batch-Reaktors ausgehend vom Brennstoff eine Diagnose zum Belagsbildungs- und Korrosionspotential *vor dem Einsatz* in der Anlage zu ermitteln.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Diagnose am Brennstoff in der oben beschriebenen Weise liefert Informationen zu den Potentialen der Verschmutzung und Korrosion. Zentraler Aspekt dieser Diagnose ist die gemeinsame Gewichtung von Brennstoff- **und** Feuerungsmerkmalen. Die alleinige Betrachtung des Brennstoffs ist nicht hinreichend realitätsnah.

Diese Position der Autoren ist einerseits gestützt durch die Erkenntnisse aus Schadensgutachten in Abfall-, Biomasse- und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken zur Rolle der Stoffspezies im Abgas bzw. der Stoffspezies im Belag für die Verschmutzungs- und Korrosionspotentiale. Andererseits belegen die aktuell gegebenen Korrosionsprobleme an diesen Anlagen, dass die Einhaltung von bestimmten Grenzen einer Stofffracht im Brennstoff oder von bestimmten Verhältnissen von Stofffrachten zueinander, die gewünschte Wirkung nicht sicherstellen kann.

In Anlehnung an bekannte Muster der Vermittlung von Wirkungs- und Warnhinweisen liefert die Diagnose am (schwierigen) Brennstoff eine Art von *Beipackzettel* zum Brennstoff. Um im Bild zu bleiben: Vor Anwendung lesen und auf die beschriebenen möglichen Nebenwirkungen achten.

Derartige Diagnosen am Brennstoff unter Berücksichtigung der gemeinsamen Wirkung aus Brennstoff und Feuerung, z.B. mittels eines Batch-Reaktors, beziehen bereits viele der Einflussgrößen aus Brennstoff, Feuerung und Dampferzeuger einer großtechnischen Anlage ein. Die damit erreichbare Realitätsnähe erlaubt es, betriebswirtschaftliche Freiheitsgrade für Weichenstellungen zu öffnen bzw. offen zu halten. Hierzu gehören Entscheidungen zur Brennstoffauswahl, -aufbereitung, -mischung ebenso, wie die Auswahl und Kombination von passiven Schutzmaßnahmen, und nicht zuletzt die Feuerführung und die Wahl der Leitgrößen der Feuerungsleistungsregelung für einen optimal energieeffizienten Betrieb.

Die hier vorgestellte Diagnose am Brennstoff ist der noch fehlende, konsequente Schritt zur Einstufung von Verschmutzungs- und Korrosionsrisiken. In den letzten Jahren wurde vor allem die *Diagnose im Betrieb* und die *Diagnose durch stetige Begleitung bei Stillständen* weiterentwickelt und unter dem Begriff *Korrosionsfrüherkennung* in den Markt getragen. Für Abfallverbrennungsanlagen ist die Anwendung der Korrosionsfrüherkennung der geeignete Weg zur aktiven Minderung von Korrosionsrisiken, denn hier ist der Brennstoff kaum beeinflussbar. Für Biomasse- und Ersatzbrennstoff-Kraftwerke ist die Diagnose am Brennstoff demgegenüber eine wesentliche Erweiterung und Ergänzung.

Diesen Schritten auf dem Weg zu verlässlichen Diagnosen zur Verschmutzungs- und Korrosionsvermeidung stehen weitere Bemühungen zur Verbesserung der Widerstandskräfte des Kessels zur Seite, d.h. einerseits die werkstofflichen Lösungen mit feuerfesten keramischen Produkten und Schutzschichten aus Nickelbasislegierungen, und andererseits verfahrenstechnische Lösungen, z.B. externe Überhitzung. Auch auf diesen Feldern gibt es stetig Verbesserungen und Neuentwicklungen, oftmals tatkräftig unterstützt von Betreibern.

Mittelfristiges Ziel der Autoren ist, die Diagnose am Brennstoff mittels Batch-Reaktor und dem parallelen Einsatz von ASP und Belagssonde an Batch-Reaktor und großtechnischer Anlage für ein breites Spektrum von Brennstoffen und Anlagen durchzuführen, die Aussagekraft dieses Verfahrens dadurch zu belegen und letztlich standardisierte Wege der Diagnose am Brennstoff aufzeigen zu können.

6. Literatur

- [1] AiF-Vorschungsvorhaben: Substitution von Regelbrennstoffen durch Ersatzbrennstoffe. AiF-Nr. 14894 BG. Beckmann, M., Bauhaus-Universität Weimar; Scholz, R., Technische Universität Clausthal, Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik; Flamme, S., Institut für Abfall, Abwasser, Site und Facility Management e. V., Ahlen; Seifert, H., Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Technische Chemie, Eggenstein-Leopoldshafen
- [2] Beckmann, M.; Horeni, M.; Scholz, R.; Rüppel, F.: Notwendigkeit der Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe 3 – Immissions- und Gewässerschutz, Qualitätssicherung, Logistik und Verwertung, Deponierung der Schwerfraktion. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2003
- [3] Beckmann, M.; Scholz, R.: Biomasse- und Ersatzbrennstoffe als schwierige Brennstoffe. In Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 1. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2007
- [4] 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
- [5] Beckmann, M.; Scholz, R.: Zum Feststoffumsatz bei Rückständen in Rostsystemen. Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK) 46 (1994), Nr. 5, S. 218-229
- [6] Beckmann, M.; Scholz, R.; Horeni, M.: Energetische Verwertung von Ersatzbrennstoffen mit hohem Chlorgehalt. In: Wiemer, K.; Kern, M. (Hrsg.): Bio- und Sekundärrohstoffverwertung – stofflich – energetisch. Witzenhausen. XVIII. Kassler Abfallwirtschaftskonferenz, 25.-27. April 2006
- [7] Bleckwehl, S.; Kolb, T.; Seifert, H.; Herden, H.: Verbrennungsverhalten von MBA-Fraktionen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe 4. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2004
- [8] Bleckwehl, S.; Leibold, H.; Walter, R.; Seifert, H.; Rückert, F. U.; Schnell, U.; Hein, K. R. G.: Einfluss der zeitlichen und örtlichen Luftstufung auf das Abbrandverhalten von stückigem Brennstoff in einem Batch-Prozess. GVC-Jahrestagung, Wiesbaden, 2002
- [9] Born, M. (Hrsg.): Dampferzeugerkorrosion. Freiburg: Verlag SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH, 2007
- [10] Herzog, T.; Metschke, J.: Cladding(ge)schichten – Erfahrungen als Grundlage für Qualitätsanforderung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 6. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2009
- [11] Kolb, T.; Weber, T.; Gehrman, H.-J.; Bleckwehl, S.; Seifert, H.: Thermische Verwertung und brennstofftechnische Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen in Rostsystemen. In Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 1. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2006
- [12] Krüger, J.: Zum Verhalten von Schwefel in Abfallverbrennungsanlagen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 6. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2009
- [13] Kupka, T.; Mancini, M.; Irmer, M.; Weber, R.: Investigation of ash deposit formation during co-firing of coal with sewage sludge, saw-dust and refuse derived fuel. Fuel 87 (12), p. 2824-2837, Sep 2008
- [14] Pfrang-Stotz, G.; Reichelt, J.; Seifert, H.: Belagsbildung und Korrosion in Abfallverbrennungsanlagen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 1. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2004
- [15] Schmidl, W.: Erfahrungen mit thermisch gespritzten Schichten als Korrosionsschutz auf Wärmetauscherflächen in reststoffbefeuchten Dampferzeugern. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 6. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2009

- [16] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren. Verbrennung, Vergasung, Pyrolyse, Verfahrens- und Anlagenkonzepte. Teubner-Reihe UMWELT, Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden: B. G. Teubner GmbH, 2001
- [17] Spiegel, W.: Analyse des Rohgases und der Kesselablagerung zur Beurteilung der Ersatzbrennstoffqualität. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 1. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2006
- [18] Spiegel, W.; Herzog, T.; Jordan, R.; Magel, G.; Müller, W.; Schmidl, W.: Anwendung sensorischer Prozessinformationen am Beispiel der Korrosionsfrüherkennung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 6. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2009
- [19] Spiegel, W.; Herzog, T.; Jordan, R.; Magel, G.; Müller, W.; Schmidl, W.: Korrosions-Früherkennung: Korrosionsminderung heute ist Effizienzsteigerung morgen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 4. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2008
- [20] Tanner, E.: Der Temperaturverlauf im Brennstoffbett und im Rost bei der Verbrennung von Steinkohle. Dissertation TU Darmstadt, 1933
- [21] Weber, R.: Characterization of alternative fuels. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 2. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2005
- [22] Werkmeister, H.: Versuche über den Verbrennungsverlauf bei Steinkohlen mittlerer Korngrößen. Dissertation TH Hannover, 1932
- [23] Zerkowski, J.: Kohleverbrennung – Brennstoff, Physik und Theorie, Technik. 1. Auflage 1986, Band 8 der Fachbuchreihe *Kraftwerkstechnik*, VGB Technische Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber e.V.