

# Veränderungen im Brennstoffmix – Vorausschauende Bewertung durch thermodynamische Betrachtungen in Verbindung mit Expertenwissen

Marie Kaiser, Stephan Beckord und Gabriele Magel

1.	Einleitung und Motivation .....	1
2.	Hintergrund zu Belagsbildungs- und Korrosionsprozessen.....	2
3.	Theoretische Herangehensweise mittels thermodynamischer Betrachtungen .....	3
4.	Expertenwissen.....	4
5.	Vernetzung thermodynamischer Betrachtungen mit Online-Beprobungen.....	6
6.	Fallbeispiel .....	8
7.	Zusammenfassung und Ausblick.....	11
8.	Quellen .....	12

## 1. Einleitung und Motivation

Veränderungen in Brennstoffgemischen führen dazu, dass Bestandskraftwerke mit neuen Anforderungen in Bezug auf Belagsbildung und Korrosion konfrontiert werden. Die Veränderungen zeigen sich unter anderem im Bereich fossiler Brennstoffe, wo die Bestrebungen, den fossilen CO<sub>2</sub>-Anteil zu reduzieren, dazu führen, dass zunehmend alternative Brennstoffe zugemischt bzw. der fossile Anteil sogar vollständig durch alternative Brennstoffe substituiert wird. Andererseits wird im Bereich von Altholzskraftwerken durch den bei vielen Kraftwerken bereits eingetretenen Wegfall der 20-jährigen Bindung an die EEG-Vergütung die dadurch gestiegene Flexibilität beim Brennstoffeinkauf genutzt.

Im Vorfeld Einschätzungen zu Korrosions- und Belagsbildungsprozessen in verschiedenen Bereichen des Kessels und auf die dort vorliegende Dynamik zu generieren, gewinnt somit zunehmend an Bedeutung.

Der vorliegende Beitrag soll aufzeigen, wie die CheMin GmbH durch die Verknüpfung von thermodynamischen Betrachtungen mit Expertenwissen Prognosen für die Wirkung unterschiedlicher Brennstoffmischungen auf den Prozess ermöglichen kann. Dies geschieht typischerweise vor dem Einsatz im Kraftwerk oder in einer großtechnischen Versuchsanlage. Die Veränderung im Brennstoffmix wird dabei ausschließlich auf den chemischen Input bezogen. Themenschwerpunkte, wie nötige Anpassungen an die Feuerungstechnik oder die Brennstofflogistik werden im vorliegenden Beitrag nicht betrachtet.

## 2. Hintergrund zu Belagsbildungs- und Korrosionsprozessen

Beläge entstehen durch die Abscheidung von unterschiedlichen Phasen aus dem Rauchgas und der anschließenden Ablagerung auf den vorhandenen Oberflächen. Diese lassen sich in Verschlackung oder Verschmutzung kategorisieren. Unter Verschlackung ist die Bildung eines aufgeschmolzenen Belages im heißen Bereich des Kessels zu verstehen, typischerweise an den Kesselwänden im Bereich der Feuerung und in bestimmten Bereichen des ersten Strahlungszuges. Im Gegensatz dazu liegt Verschmutzung in *kälteren* Bereichen des Kessels vor, in denen der Gesamtbelag nicht mehr aufgeschmolzen wird.

Die Grenze von Verschlackung zur Verschmutzung hängt vom Wärmeeintrag und der jeweiligen Zustellung (z. B. keramische oder metallische Schutzschichten) im Feuerraum ab und beginnt typischerweise wenige Meter oberhalb der Sekundärluftzufuhr. Die Belagsbildung ab diesem Bereich bis hin zum Kesselende wird unter der Bezeichnung Verschmutzung zusammengefasst, kann aber unterschiedliche Ausprägungen der Belagsstrukturen zeigen. Rasches Belagswachstum mit Wechtenbildung kann zum einen aufgrund von aus dem Rauchgas auskondensierten Mineralphasen entstehen, welche auf Oberflächen anhaften und aufgrund ihrer Sättigungseigenschaften *klebrige* Oberflächen bilden. Zum anderen können solid-solid Reaktionen in Belägen zu einer Erniedrigung von Schmelzpunkten der Einzelphasen führen und somit ebenso *klebrige* Oberflächen ausbilden. Beides führt dazu, dass andere (auch feste) Rauchgaspartikel anhaften und somit die Belagsdicke rasch zunimmt.

Korrosion kann sowohl auf keramischen wie auch auf metallischen Oberflächen wirken. Besonders bei metallischen Oberflächen spielen das lokale Mikromilieu, welches sich im Laufe einer Belagsalterung ausbildet, und auch der lokale Wärmeübergang eine entscheidende Rolle für den Mechanismus und die Intensität der Korrosion am jeweiligen Ort im Kessel.

Die jeweilige Kombination aus Brennstoff und Feuerung ist entscheidend dafür, welche Komponenten des Brennstoffs ins Rauchgas gelangen. Ebenso entscheidet diese Kombination, in welcher Spezies, in welchem Aggregatzustand und in welchen Frachtanteilen die jeweiligen Komponenten vorliegen. All dies hat entscheidende Auswirkungen auf die Prozesse im Kessel.

### 3. Theoretische Herangehensweise mittels thermodynamischer Betrachtungen

Thermodynamische Berechnungen können eine Prognose geben, wie sich ein veränderter Brennstoffmix auf einen Prozess auswirken wird. Diese Berechnungen stellen eine theoretische Betrachtung dar und sind damit – wie alle theoretischen Modellierungen – abhängig von den vorgegebenen Parametern. Hierzu ist es zwingend erforderlich, dass ein Plausibilitätscheck der getroffenen Annahmen durch Experten vorgenommen wird. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund, dass sich bei stark heterogenen Brennstoffen und sich stetig verändernden Feuerungsbedingungen eine Komplexität des Prozesses ergibt, die sich nur schwer durch theoretische Betrachtungen greifen lässt.

Zudem sollte auch erwähnt werden, dass theoretische Berechnungen nur eine Annäherung an die tatsächlichen Auswirkungen auf den Prozess sein können. Dies hat verschiedene Gründe.

Bei thermodynamischen Betrachtungen muss von gleichbleibenden Rahmenbedingungen ausgegangen werden, sich verändernde Bedingungen im Rauchgas können damit nicht abgebildet werden. Zudem handelt es sich bei den Berechnungen um Betrachtungen von Gleichgewichtszuständen. Weitere Faktoren, die die chemischen Gleichgewichte der Reaktionen bei den gegebenen Temperaturen beeinflussen können, z. B. kinetische Faktoren oder Lastwechsel, werden nicht berücksichtigt. Auch können sonstige Prozesse, die erfahrungsgemäß im Kessel ablaufen (z. B. Ausbildung von Mikromilieus in Belägen, die Veränderung der Beläge durch langsam ablaufende Sulfatierungsreaktionen) nicht mit eingerechnet werden. Auch die Auswirkungen durch die Zugabe von Additiven (z. B. zur Entstickung) oder die Effekte durch Online-Reinigungen sind in die Berechnungen nicht mit aufgenommen.

Die errechneten Ergebnisse stellen Phasenstabilitäten zu definierten Temperaturpunkten dar, sie lassen sich somit nicht als Verlauf entlang einer Rauchgasabkühlung lesen. Es wird nicht berücksichtigt, dass eine Abscheidung von Rauchgaskomponenten und die Entfrachtung des Rauchgases entlang des Rauchgasweges (z. B. die Einbindung von Silizium, Aluminium, Phosphor, Alkalien usw. in Schlacken) erfolgt. Dies führt dazu, dass sowohl die Staubfracht

als auch die spezifischen Elementfrachten mit fallender Rauchgastemperatur in der Berechnung überbewertet werden können bzw. es rechnerisch zu Phasenstabilitäten kommt, die in der Realität nicht vorliegen.

Aus diesen genannten Gründen ist es für die Auswertung der Berechnungen wesentlich, bei den ermittelten Phasen anhand von Expertenwissen zu prüfen, ob diese auch realistisch für den Feuerungsprozess der betrachteten Brennstoffe sind.

Erfahrungen seitens der CheMin GmbH zeigen, dass es wichtig ist, im Vorfeld zu definieren, ob Verschlackungsprozesse im Feuerraum oder Korrosions- und Verschmutzungseffekte in den Leerzügen und konvektiven Heizflächen im Fokus stehen. So wird es möglich, die Input-Parameter zielgerichtet anzupassen und dadurch die thermodynamischen Berechnungen möglichst realitätsnah in Bezug auf die vorliegende Fragestellung durchzuführen.

Geht es z. B. um die Verschlackung im Feuerraum bei hohen Rauchgastemperaturen, muss das gesamte Elementspektrum bei der Berechnung Berücksichtigung finden. Geht es dagegen um Korrosions- und Verschmutzungseffekte in den Leerzügen und konvektiven Heizflächen bei mittleren bis niedrigeren Rauchgastemperaturen, dann kann auf die Betrachtung von Ascheelementen wie Aluminium, Silizium, Eisen und Magnesium verzichtet werden, da diese Elemente an den genannten Effekten nicht beteiligt sind (siehe hierzu auch Kapitel 4). Diese Elemente fließen in ihrer Gesamtheit mit dem Aschegehalt als Inertfraktion bei der FactSage-Berechnung mit ein.

Wichtig für die Durchführung solcher Betrachtungen sind zum einen eine Vollanalyse des Brennstoffs inklusive der oftmals nicht mit analysierten Alkalien und Erdalkalien und Informationen zum Brennstoffumsatz im Bestandskraftwerk, wie z. B. Luftzahl und die geplante Brennstoffmenge.

## 4. Expertenwissen

Die CheMin GmbH konnte in den letzten 25 Jahren durch Begehungen und Probenahmen (offline und online) in Kraftwerken mit unterschiedlichen Brennstoffen ein großes Spektrum an Expertenwissen generieren. Besonders für die Bewertung von Korrosions- und Belagsbildungsprozessen hat diese Erfahrung und das daraus gezogene Wissen eine hohe Bedeutung. Im Folgenden sind die relevanten Erkenntnisse aufgezeigt.

Verschlackung entsteht typischerweise durch Aufschmelzen von Aschen. Hierbei handelt es sich meist um silikatische Mischsysteme. Diese können in ihren Schmelzpunkten stark variieren, je nachdem welche Elemente in das

System mit eingebunden sind. Stark schmelzpunkterniedrigend und damit besonders relevant in Bezug auf die Verschlackungsneigung verhalten sich hierbei Phosphor, Alkalien oder Schwermetalle.

Bei Korrosions- und Verschmutzungsereignissen hingegen sind Schwermetalle (Blei, Zink, Kupfer), Chlor, Alkalien (Natrium, Kalium), Erdalkalien (Calcium) und auch Schwefel die Elemente, die in ihrer Kombination diese Prozesse beeinflussen. Ascheelemente, wie unter anderem Silizium und Aluminium, haben keine Relevanz für die initiale Ausprägung.

In Bezug auf das Verschmutzungsverhalten sind insbesondere chloridische Phasen zu betrachten, die in einem bestimmten Temperaturbereich in schmelzflüssiger Form vorliegen und dadurch klebrige Oberflächen der Beläge oder auf Werkstoffen erzeugen. Dies kann zum einen durch bereits aus dem Rauchgas in flüssiger Form auskondensierte Salze (z. B.  $\text{CaCl}_2$ ) verursacht werden oder zum anderen durch Mineralreaktionen von abgelagerten (festen) Partikeln untereinander, was zur Bildung eines Eutektikums und damit zum nachträglichen Aufschmelzen der Salze (z. B. Alkali-Calcium-Chlorid) führen kann.

In Bezug auf das Korrosionsverhalten müssen daneben auch andere Elementkombinationen betrachtet werden. Schwermetalle sind bekannt dafür, dass sie sich gut aus dem Brennstoff ins Rauchgas mobilisieren lassen. In Kombination mit Chlor bilden sich Schwermetallchloride. Aufgrund von deren Sättigungseigenschaften und der Lage der Schmelzpunkte desublimieren oder kondensieren diese auf *kalten* Wärmetauschoberflächen und reichern sich dort in den Belägen selektiv an. Je nach Wärmefluss und Oberflächentemperatur (Verdampfer- oder Überhitzerbauteil) kommt es zu einer Lagenbildung der Schwermetallsalze. Insbesondere nahe der Rohroberfläche ist häufig eine Salzsammelzone aus Schwermetallchloriden vorzufinden, die sich an den Korrosionsprozessen beteiligt und daher aus Korrosionssicht als besonders kritisch einzuordnen ist. Weitere Korrosionsprozesse, die sich aus dem Dampfdruck von abgeschiedenen Chloriden (Hochtemperaturchlorkorrosion) herleiten lassen, können ebenfalls relevant sein.

Sowohl hinsichtlich der Verschmutzungsneigung als auch dem Korrosionsverhalten gilt generell, dass ein ausreichendes Angebot an  $\text{SO}_3$  im Rauchgas Sulfatierungsreaktionen mit den vorhandenen Chloriden auslösen kann. Dabei reagiert das  $\text{SO}_3$  im Rauchgas mit den Chloriden unter Sulfatbildung und das Chlor wird in Form von  $\text{HCl}$  freigesetzt. Nachdem die sulfatische Bindung sowohl der Calcium- und Alkali-Phasen als auch der Schwermetallkomponenten jeweils eine signifikant höhere Schmelztemperatur aufweist, werden durch eine Sulfatierung sowohl die Korrosions- als auch die Verschmutzungspotenziale reduziert.

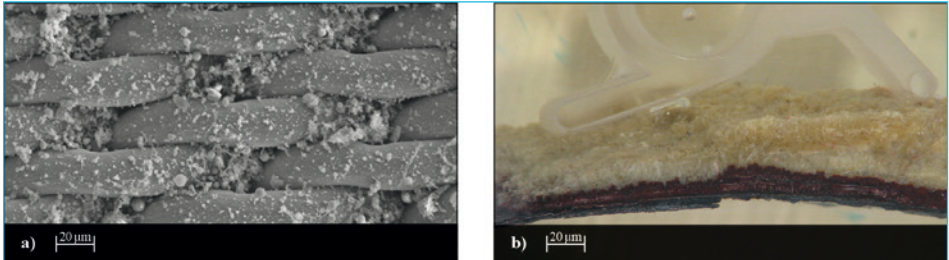
Die CheMin GmbH hat in der Vergangenheit im Rahmen von Tagungsbeiträgen den Einfluss dieser Elemente und die Zusammenhänge zu Korrosions- und Verschmutzungsprozessen im Detail diskutiert [1] [2] [3].

## 5. Vernetzung thermodynamischer Betrachtungen mit Online-Beprobungen

Geplante Brennstoffveränderungen im Vorfeld mittels theoretischer Berechnungen mit Bezug auf ihre potenzielle Wirkung im Kessel einzuordnen, hilft dabei, aufwendige großtechnische Versuchsfahrten im Labormaßstab oder in der realen Anlage auf ein Minimum reduzieren zu können. Besonders der theoretische Vergleich verschiedener Brennstoff-Inputszenarien im Abgleich mit dem Bestandsbrennstoff und der Erkenntnisse aus dem Betrieb, welche z. B. mittels Beprobung erzeugt wurden, ermöglichen eine gute Vorhersehbarkeit möglicher Auswirkungen bei einem Brennstoffwechsel.

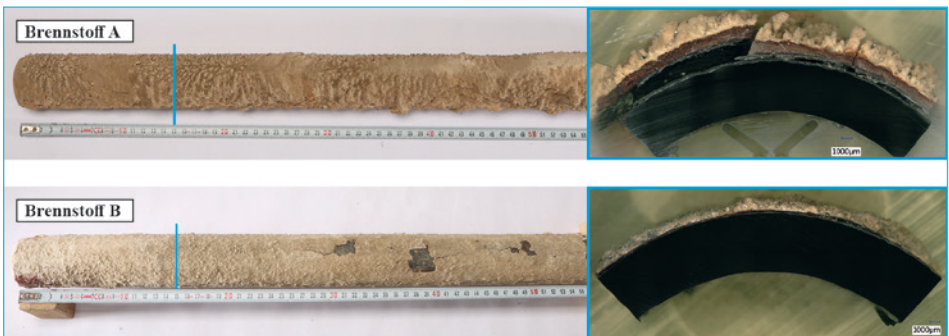
Für die Einordnung von Korrosions- und Belagsbildungsprozessen mittels thermodynamischer Berechnungen hat besonders der Abgleich mit Befunden aus Online-Beprobungen mithilfe von Gittersonden oder auch dem Einsatz von gekühlten Kurzzeitsonden mit wenigen Minuten Expositionszeit eine hohe Relevanz. Die Gittersonde ist eine Partikelsonde, bei der das Rauchgas durch ein Gitter mit Mikrometerfeinen Maschen gesaugt wird. Salze, die bei der gegebenen Rauchgastemperatur gesättigt vorliegen, kondensieren bzw. desublimieren auf der Drahtoberfläche (Abbildung 1a). Dadurch wird die beginnende Belagsbildung, die im realen Kesselbauteil auf den Werkstoffoberflächen erfolgt, auf den Drahtoberflächen reproduziert. Bereits im Rauchgas vorhandene feine, feste oder erstarrte Partikel werden in die Maschen abgelenkt, größere Partikel verteilen sich auf der gesamten Gitteroberfläche. Die Partikel und Salze werden auf ihre chemischen und optischen Kriterien hin analytisch untersucht und liefern so Informationen zum Korrosions- und Belagsbildungspotenzial der Wärmetauscherflächen. Das Funktionsprinzip und Anwendungsbeispiele finden sich unter anderem in [4] und [5].

Beläge, welche im Zuge von Kesselstillständen beprobt werden, erfahren im Laufe der Betriebszeit eine Alterung durch stattfindende solid-solid Reaktionen nebeneinander vorliegender Mineralphasen, die Interaktion von Salzen mit dem Werkstoff und gas-solid Reaktionen durch nachgelieferte Gasspezies aus dem Rauchgasstrom. Diese Beläge eignen sich daher nicht, um initiale Korrosions- und Verschmutzungsvorgänge zu beschreiben (Abbildung 1b). An dieser Stelle wird auf den Beitrag zu Sulfatierungsreaktionen in abgeschiedenen Belägen von Born und Bachhiesel [6] verwiesen.



**Abb. 1:** a): Abgeschiedene Rauchgaspartikel auf dem Gewebe der Gittersonde (Beprobungszeit: wenige Sekunden); b) Gealterter Belag, eingebettet und im Querschnitt angeschliffen, beprobt während eines Revisionsstillstandes (ca. 8.000 h Expositionszeit)

Für die Einordnung verschiedener Brennstoffmischungen besteht des Weiteren die Möglichkeit des Einsatzes einer gekühlten Sonde im Prozess, die im Grundsatz eine vorübergehende in den Kessel eingebaute Wärmetauscherfläche darstellt. Im Gegensatz zum Belag, welcher im Revisionsstillstand beprobt wird, ermöglicht diese Sonde die Beprobung von Belägen nach dem Einsatz individueller, auch sehr kurz gewählter Einsatzzeiten. Die gekühlte Sonde wird im laufenden Betrieb eingebaut und kann für einen gewünschten Zeitraum während der Testverbrennungen eingesetzt werden. Eine detaillierte Beschreibung über die Einsatzmöglichkeiten kann aus [7] und [8] entnommen werden. Die Belagsbildung oder der Korrosionsangriff können im Anschluss an den Einsatzzeitraum, der für beide Brennstoffmischungen ähnlich gewählt werden sollte, vergleichend untersucht werden. In dem Beispiel in Abbildung 2 sind gekühlte Sonden nach einer Einsatzzeit von zwei Wochen vergleichend dargestellt.

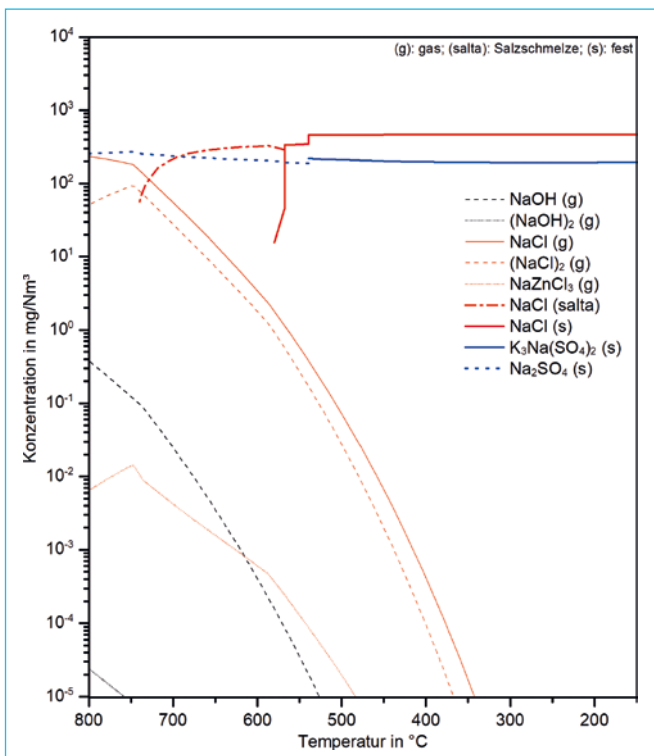


**Abb. 2:** Gekühlte Sonden nach dem jeweiligen Einsatz während einer Testverbrennung des Brennstoffs A bzw. B. Die unterschiedliche Ausprägung von Korrosionsbelägen und anhaftenden Salz-Asche-Belägen erlaubt die Einordnung des jeweiligen Brennstoffs im Hinblick auf dessen Belagsbildungs- und Korrosionspotenzial.

## 6. Fallbeispiel

Dass die Vernetzung thermodynamischer Betrachtungen, Online-Beprobungen und Expertenwissen in alle Richtungen sinnvoll und hilfreich ist, wird im nachfolgenden Beispiel aufgezeigt.

Für einen MVA-Standort wurden auf Grundlage der Brennstoffzusammensetzung mittels FactSage Mineralphasen für den Temperaturbereich von 800 °C bis 150 °C gerechnet. Die vollständige Auswertung kann in diesem Beitrag nicht ausgeführt werden. Beispielhaft kann aber anhand der Natriumspesies die Vernetzung von theoretischer Berechnung und Online-Untersuchung gezeigt werden. Als Hauptspezies errechnen sich Chloride, Sulfate und Hydroxide (Abbildung 3).

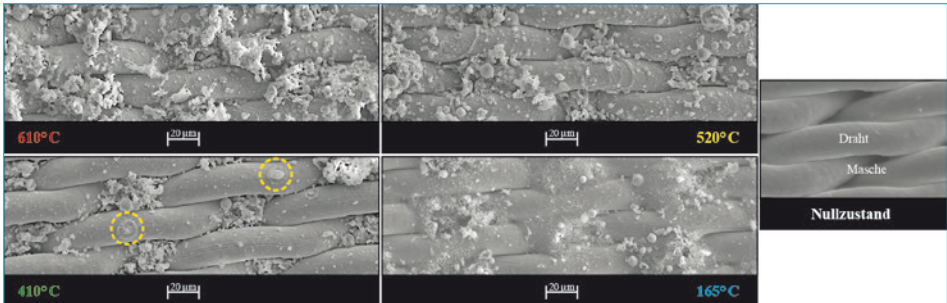


**Abb. 3:** Mittels FactSage errechnete Natriumspesies: Das Diagramm ist mit abnehmender Temperatur entlang der Abszisse dargestellt. Auf der Ordinate ist der Gehalt der jeweiligen Komponente in mg/Nm<sup>3</sup> dargestellt.

Im Abgleich dazu zeigt die Abbildung 4 den Befund der Online-Beprobung an insgesamt vier verschiedenen Temperaturpunkten entlang des Rauchgasweges. Optisch lassen sich Unterschiede in der Ausprägung der abgeschiedenen Partikelfracht in Bezug auf die Rauchgastemperatur am Beprobungsort erkennen. Im

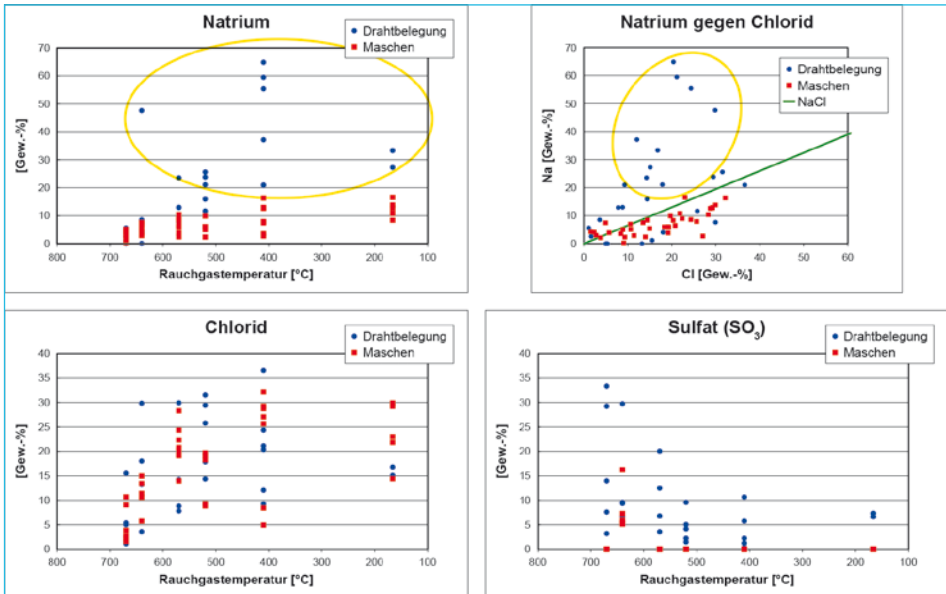


Rauchgas nimmt insbesondere der Anteil der feineren Partikelfracht von hohen zu niedrigen Temperaturmilieus zu. Am Beprobungsort mit 410 °C Rauchgastemperatur zeigt sich zudem eine flüssige Mineralspezies auf der Drahtoberfläche. Diese lässt sich anhand der Impaktkrater erkennen, welche durch das Auftreffen von Partikeln auf einem Flüssigkeitsfilm entstanden sind.



**Abb. 4:** Abgeschiedene Rauchgaspartikel nach wenigen Sekunden Beprobungszeit auf dem Gewebe der Gittersonde an Positionen verschiedener Rauchgastemperatur im Abgleich mit dem Nullzustand. Unterschiede in der optischen Ausprägung lassen Rückschlüsse auf die Sättigungseigenschaften der abgeschiedenen Mineralspezies zu.

Die auf den Gittersonden abgeschiedenen Rauchgaspartikel wurden mittels REM-EDX orts aufgelöst im Hinblick auf ihre Zusammensetzung charakterisiert. In den Diagrammen in Abbildung 5 sind die Ergebnisse dieser Untersuchungen dargestellt. In diesen wird zwischen den Beprobungsorten Drahtbelegung und Maschen auf dem Gewebe unterschieden. Auf den Drahtoberflächen scheiden sich typischerweise Aerosole ab, welche in Kontakt mit der Drahtoberfläche aus der Gasphase desublimieren bzw. kondensieren. In den Maschen finden sich feine Partikel. Der Fokus liegt auf diesen beiden Ablageorten, da dort die für Korrosions- und Belagsbildungsprozesse relevanten Spezies abgeschieden werden. Bei der gezeigten Auswertung wird ebenfalls das Hauptaugenmerk auf die abgelagerten Natrium-Verbindungen gelegt.



**Abb. 5:** REM-EDX-Messpunkte, aufgenommen auf der Drahtoberfläche und in den Maschen des Gewebes der Gittersonde. Es ergibt sich ein Überschuss an Natrium, welcher sich nicht als Natriumchlorid binden lässt (gelbe Markierung).

In den Diagrammen zeigt sich, dass der Anteil an Natrium und Chlor in der Partikelfracht mit sinkender Rauchgastemperatur bis ca. 400 °C zunimmt, Schwefel hingegen nimmt ab. Nach der stöchiometrischen Verrechnung des Natriums als NaCl wird deutlich, dass der Anteil an Chlor nicht ausreicht, um das vorliegende Natrium vollständig zu binden. Auch andere mögliche Bindungspartner liegen nicht in ausreichenden Konzentrationen für eine vollständige Bindung vor (in den Diagrammen nicht dargestellt). Somit muss davon ausgegangen werden, dass ein signifikanter Anteil an Natrium auch anderweitig gebunden ist. Denkbar wäre eine Bindung als Carbonat, Oxid oder Hydroxid. Ein eindeutiger Nachweis ist nicht möglich, da sich die Elemente Kohlenstoff, Wasserstoff und auch Sauerstoff aufgrund der niedrigen Molmassen mittels REM-EDX nicht quantitativ messen und aufgrund der geringen Probenmenge auch nicht anderweitig bestimmen lassen. Damit kann nur eine Abschätzung erfolgen, sodass die Aussage zu diesen Elementen mit einer gewissen Unschärfe behaftet ist.

Durch die Verknüpfung der theoretischen Betrachtungen und der experimentellen Daten lässt sich das bei den Beprobungen mittels Gittersonde erhaltene Ergebnis verfeinern. So zeigen die theoretischen Berechnungen mittels FactSage neben den chloridischen und sulfatischen Natriumverbindungen auch Natriumhydroxid. Ein Vorliegen von carbonatisch und oxidisch gebundenem Natrium ist in der vorliegenden Brennstoffmischung unwahrscheinlich. Des Weiteren zeigt sich anhand der Befunde aus der Online-Beprobung, dass mit sinkender

Rauchgastemperatur der Anteil an chloridischen Verbindungen ansteigt und im Gegenzug der Anteil an sulfatisch gebundenen Verbindungen sinkt. Mittels FactSage lässt sich dieser Verlauf nicht darstellen. Ab ca. 500 °C errechnen sich für die Natriumchloride und -sulfate nahezu konstant bleibende Frachtanteile. Somit zeigt sich, dass nur durch das Miteinander von verschiedenen Herangehensweisen (theoretische Berechnungen und experimentelle Untersuchungen) ein mehr und mehr realitätskonformes Bild der im Rauchgas bei verschiedenen Temperaturen vorliegenden Spezies ermittelt werden kann.

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Mithilfe von thermodynamischen Berechnungen ist es grundsätzlich möglich, das Potenzial für Schmelzebildung, Korrosion und Verschmutzung anhand des Brennstoff-Inputs abzuschätzen. Einschränkend ist hierbei zu nennen, dass unterschiedliche Einflussgrößen, wie z. B. Schwankungen in den Feuerungsbedingungen, bei dieser Betrachtung nicht berücksichtigt werden. Thermodynamische Berechnungen eignen sich somit besonders für die Vorauswahl möglicher Brennstoffszzenarien.

Um Prognosen zu korrosionsbedingt gegebenen Abzehraten an metallischen Bauteilen oder auch um Unterschiede in der Verschlackungs- und Verschmutzungsintensität herausarbeiten zu können, wird empfohlen, für vorausgewählte Brennstoffszzenarien Testverbrennungen durchzuführen, die möglichst direkt im Bestandskraftwerk stattfinden sollten. Denkbar hierfür sind Testzeiträume von ca. zwei Wochen je Brennstoffszzenario. Es ist zu empfehlen die Testzeiträume mit Sonden an unterschiedlichen Stützstellen im Kessel zu begleiten. Sonden fungieren hierbei als temporäre Wärmetauscherrohre, welche nach dem Testzeitraum zerstörend geprüft werden können. Ein Vergleich verschiedener Brennstoffszzenarien wird somit leicht möglich.

Alternativ zur Testverbrennung in der Bestandsanlage sind Testverbrennungen in Versuchsanlagen. Dies ermöglicht die Validierung eines Brennstoffs mit deutlich geringerem Brennstoffbedarf. Analog zur Testverbrennung in der realen Anlage können diese Testverbrennungen mit Sonden begleitet werden.

### Danksagung

Abschließend möchten sich die Autoren bei Herrn Dr. Daniel Bernhardt und Herrn Martin Dunker, Mitarbeiter der Professur für Energieverfahrenstechnik an der TU Dresden, herzlich für Ihre Unterstützung bei der Erstellung von thermodynamischen Berechnungen bedanken.

## 8. Quellen

- [1] Spiegel, W.; Kaiser, M.; Magel, G. und Schmidl, W.: Relevant Thermochemical Processes in Biomass Fired Power Plants. In: Thiel, S.; Thomé-Kozmiensky, E.; Winter, F.; Juchelková, D. (Hrsg.): Waste Management, Volume 8, Waste-to-Energy, Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, 2018. IRRRC Waste-to-Energy, Wien, 01.-02. Oktober 2018, S. 457–464.
- [2] Spiegel, W.; Magel, G. und Müller, W.: Einfluss von Calciumspezies auf Korrosion und Verschmutzung in MVA und EBS-Kraftwerken. DEPOTECH, Leoben, November 2012.
- [3] Magel, G. und Kaiser, M.: Wirkung schwefelbasierter Additive auf Korrosion und Verschmutzung. 19. VDI-Fachkonferenz Feuerung und Kessel – Beläge und Korrosion – in Großfeuerungsanlagen, 21.-22. Juni 2022, Regensburg.
- [4] Müller, W.; Schneider, D.; Kaiser, M.; Brell, J.; Spiegel, W. und Pohl, W.: *Fuel leaflets* for the prevention of negative impact on the boiler from minor fuel constituents. In: VGB PowerTech 7 (2014), S. 76–81.
- [5] Pohl, M.: Methode zur Charakterisierung der freigesetzten mineralischen Bestandteile eines Brennstoffes mit Hilfe der Partikelgitternetzsonde. TU Dresden, Dissertation, 2013.
- [6] Born, M. U. und Bachhiesl, M.: Thermodynamische Grundlagen und Mechanismen der Hochtemperatur-Chlorkorrosion an Dampferzeugern bei der Verbrennung und Mitverbrennung von Abfällen. In: Rauchgasseitige Dampferzeugerkorrosion, Freiberg: Verlag SAXONIA, 2003.
- [7] Kaiser, M.; Schneider, D.; Brell, J.; Molitor, D. und Kuttner, T.: Effizienzsteigerung – Anwendung der Temperature-Range-Probe zur Optimierung der Werkstoffwahl in MVA. VGB PowerTech 10 (2015), S. 53–58.
- [8] Pohl, M.; Wen, T.; Jentschke, L.; Kaiser, M.; Brell, J. und Spiegel, W.: Möglichkeiten zur In-Situ Brennstoffdiagnose für heterogene Abfallströme. In: Thiel, S.; Thomé-Kozmiensky, E.; Quicker, P.; Gosten, A. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 19. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2022, S. 534–551.