

**Magel, G.; Müller, W.; Spiegel, W.; Schmidl, W.; Herzog, T.;  
Aleßio, H.-P. (alpha-lambda-epsilon, Köln)  
(2013):**

**Korrosivität von Rauchgasen:  
Online-Sensorik in Dampferzeugern.**

In: VGB PowerTech, Ausgabe 6/2013, S. 71-77

## **Korrosivität von Rauchgasen: Online-Sensorik in Dampferzeugern**

### **Corrosivity of Flue Gas: Online Sensors in Steam Generators**

Dr. Gabi Magel<sup>1</sup>

Dipl. Min. Wolfgang Müller<sup>1</sup>

Dr. Wolfgang Spiegel<sup>1</sup>

Dipl. Geol. Werner Schmidl<sup>1</sup>

Dr. Thomas Herzog<sup>1</sup>

Dipl. Ing. Hans-Peter Aleßio<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CheMin GmbH, Augsburg

<sup>2</sup> alpha-lambda-epsilon, Köln

#### ***Kurzfassung***

Um Korrosionsursachen auf die Spur zu kommen, müssen Dampferzeuger auch als chemische Reaktoren verstanden werden. Wegen der Komplexität von anlagenabhängigen Randbedingungen und chemischen Vorgängen können die Phänomene nur während des Betriebes mit speziellen Sensoren und Sonden zuverlässig erfasst werden. In diesem Artikel werden verschiedene Möglichkeiten der Online-Sensorik vorgestellt, um die Korrosions- und Belagsbildungsprozesse und deren Ursachen ermitteln zu können, die während des Betriebs an den Werkstoffen ausgelöst werden. Die Zielsetzungen für die Anwendung der Sensorik können sich auf die Optimierung von Brennstoffen, Feuerungen oder auch dem Wärmeabbau im Kessel beziehen, sowie auf die Wahl von resistenten Werkstoffen. Zudem können die Schwellen für betriebswirtschaftlich sinnvolle Mediumstemperaturen im Bereich der Verdampfer und Überhitzer (z.B. Hochtemperatur- und Salzschnmelzenkorrosion) oder im Economizer (z.B. Taupunkts- und Deliqueszenzkorrosion) ermittelt werden.

Diese Online-Sensorik wurde überwiegend in Anlagen entwickelt, in denen Abfall- und Biomassebrennstoffe verbrannt werden. Ein Einsatz auch in fossil gefeuerten Anlagen ist angesichts von zunehmend mitverbrannten „schwierigen“ Brennstoffen

zur Beurteilung von Verschmutzungs-, Korrosions- und anderen Schädigungspotentialen ebenfalls sinnvoll.

### ***Abstract***

To understand the causes of corrosion, steam generators have to be regarded as chemical reactors. As for the complex situation in an incineration plant in terms of basic conditions, firing and chemical processes, the ongoing phenomena can be dedicated reliably only during operation using special kinds of sensors and probes.

In the present article several possibilities of online sensors are demonstrated to determine the processes and causes of corrosion and fouling during operation.

The sensor technology can be applied for various targets, as for example optimization of firing, fuel or heat extraction in a boiler or for the choice of corrosion resistant material. Furthermore, thresholds can be determined for economically reasonable temperatures in the evaporator and superheater (e.g. high temperature and salt melt corrosion) or in the economizer (e.g. dew point and deliquescence corrosion).

These different kinds of sensors and probes were mostly developed in incineration plants for waste and biomass fuel. However, the application in mainly fossil-fuelled plants is getting useful, too, as increasingly „difficult“ fuel is co-incinerated that might change the potential of corrosion, fouling and other possible damage.

### ***Rauchgasseitige Korrosion: Nebenwirkungen moderner Brennstoffe***

Rauchgasseitige Korrosion ist häufig in Anlagen zu beobachten, in denen ein „chemisch schwieriger“ Brennstoff zur Dampferzeugung verbrannt wird. Unter chemisch schwierigen Brennstoffen sind Abfallbrennstoffe (Gewerbeabfälle, Ersatzbrennstoffe, Hausmüll etc.), aber auch Biomassebrennstoffe (Altholz, Stroh etc.) oder weitere Brennstoffe zu verstehen, die neben Kohlenwasserstoffen auch Alkalimetallverbindungen, Schwermetallverbindungen, Halogenverbindungen und Schwefelverbindungen enthalten.

Erfahrungen und Erkenntnisse im Umgang mit Korrosion in Dampferzeugern haben sich in den vergangenen Jahrzehnten vor allem bei Reststoff-befeuerten Anlagen entwickelt. Durch verfahrenstechnische und werkstoffliche Anpassungen und durch die Begrenzung auf moderate Temperaturen von Satt- und Frischdampf konnten die Auswirkungen der Korrosion an vielen Standorten betriebswirtschaftlich im Rahmen gehalten werden.

Damit ist aber noch kein befriedigender Zustand erreicht. Aktuelle Impulse, wie Energieeffizienz, Klimaschutz und Mitverbrennung bedingen neue Erfahrungen mit dem Thema Korrosion, zunehmend auch bei Anlagen, die mit fossilen Brennstoffen befeuert werden.

Standardmäßig wird bei der Auslegung einer Feuerung auf einen möglichst vollständigen Ausbrand der gasförmigen Verbrennungsprodukte und der festen Verbrennungsrückstände (Asche, Schlacke) geachtet. Die einzustellende Verbrennungstemperatur ergibt sich aus gesetzlichen Auflagen, sie wird aber auch begrenzt zur Reduzierung von Schadstoffbildung (z.B. NO<sub>x</sub>). Durch Zusatz von Additiven kann z.B. die Produktion von Schwefeloxiden deutlich abgesenkt werden.

Der Feuerung schließt sich ein Dampferzeuger an. Hier wird die in der Feuerung freigesetzte Energie (Wärme) zur Aufheizung, Verdampfung und Überhitzung von Wasser verwendet. Die Rauchgase kühlen dadurch um mehrere 100 K ab. Die Rauchgase werden dabei meistens als inertes Fluid betrachtet. Dies ist für die Bilanzierung und Berechnung der übertragenen Wärmemengen auch ausreichend genau.

## ***Dampferzeuger sind „chemische Reaktoren“***

Korrosionserscheinungen und Verschmutzungen im Kessel zeigen, dass es nicht ausreicht, den Dampferzeuger nur physikalisch, das heißt als Energiewandler, zu betrachten, sondern dass sich durch die Abkühlung und die dabei unterschiedlichen Oberflächentemperaturen jeweils neue (Un-) Gleichgewichtsbedingungen und somit auch komplexe chemische Reaktionen ergeben. Auf dem Weg durch den Dampferzeuger verändern sich die Rauchgasprodukte: Es entstehen neue Verbindungen, bestehende Verbindungen werden aufgelöst, Produkte kondensieren aus der Gasphase aus etc. Je reichhaltiger die Brennstoffzusammensetzung ist, umso vielfältiger sind die sich (lokal) ergebenden Rauchgasbestandteile. Dies betrifft nicht nur den heißen Teil des Dampferzeugers (z.B. Hochtemperatur- oder Salzsäurekorrosion) sondern auch kältere Bereiche (z. B. Taupunkt- oder Deliqueszenzkorrosion<sup>1</sup>).<sup>1</sup>

In den Verfahrensschritten der Feuerung und des Dampferzeugers steht diese Eigenschaft als chemischer Reaktor (bislang) nicht im Fokus. Dies lässt sich z.B. daran erkennen, dass betriebsbegleitende sensorische Maßnahmen, die sich darauf beziehen würden, noch nicht zum Standardinventar von Dampferzeugern gehören. Standardmäßig werden im Kessel meist Rauchgastemperaturen und Gaskonzentrationen (O<sub>2</sub>, CO etc.) erfasst. Dies ist jedoch für die Bewertung des laufenden Betriebs (Brennstoff, Feuerung, Wärmeabbau) in Bezug auf Korrosion (und Verschmutzung) nicht aussagekräftig und auch nicht geeignet, den Betriebsablauf diesbezüglich positiv zu beeinflussen. Zudem entsprechen die mittels Thermoelementen gewonnenen Informationen zur Rauchgastemperatur den realen, relevanten Bedingungen oftmals nicht ausreichend (u.a. bedingt durch Verschmutzung; Lage in strömungsberuhigter Zone; Eigenstrahlung etc.).

## ***Perspektive***

Vermutlich haben nach wie vor die Reststoff-befeuerten Anlagen das größte unmittelbare Bedürfnis, die Auswirkungen von Korrosion und Verschmutzung aktiv zu beeinflussen. Nicht zuletzt wirtschaftliche Gründe wirken sich verschlechternd auf die Qualität und Zusammensetzung des Brennstoffs aus. Die Anlagen verbrennen immer

---

<sup>1</sup> Bei der Deliqueszenz-Korrosion lagern sich im ersten Schritt hygroskopische Salze aus dem Rauchgas auf der Heizfläche ab. Im zweiten Schritt nehmen sie Wasser aus der Rauchgasfeuchte auf, so dass ein korrosiver, wässriger Elektrolyt oberhalb des Wassertaupunktes gebildet wird.

mehr immer schwierigeren Brennstoff. Dies gilt insbesondere für Müllverbrennungsanlagen, die ursprünglich hauptsächlich für die Verbrennung von Hausmüll gebaut wurden. Inzwischen liegt in vielen Anlagen der Anteil an Hausmüll unter 50% und der Anteil an Gewerbemüll nimmt den größeren Teil ein. Es sind von dieser Thematik auch EBS-Anlagen betroffen. Zudem wird auch von diesen Anlagen eine Effizienzsteigerung z.B. durch Wahl höherer Dampfparameter erwartet.

Auch für die fossil befeuerten Kraftwerke ergeben sich durch Mitverbrennung und geänderte Bezugsquellen der Brennstoffe Annäherungen an den Zustand eines „komplexen chemischen Reaktors“. Um das Korrosions- und auch das Verschmutzungspotential von Verbrennungsgasen unter den wechselnden Randbedingungen in einem Dampferzeuger beurteilen zu können, sind geeignete Messinstrumente erforderlich, die möglichst während des Betriebs eingesetzt werden können.

### ***Zielsetzungen und Inventar der Online-Sensorik***

Jeder Entwickler von Online-Sensorik (Sonden, Monitore, Sensoren) für Dampferzeuger in Bezug auf Korrosion und Verschmutzung baut auf seinem Verständnis der chemischen, thermischen und mechanischen Einflussgrößen auf, die zu diesen Wirkungen führen. Dadurch ergeben sich unterschiedliche Herangehensweisen bei der Entwicklung von Online-Sensorik. Im Fall der CheMin GmbH hat sich dieses Verständnis aus gutachterlicher Tätigkeit und aus Beratungsleistungen für Betreiber und Errichter von Kraftwerken entwickelt. Vor allem Stillstandsbegehungen von Kesseln, im verschmutzten und im gereinigten Zustand, bilden die Basis dieser Erfahrungen.

Aus Sicht der Autoren ist es zielführend, eine auf Korrosion und Verschmutzung ausgerichtete Online-Sensorik zunächst für die Bedürfnisse von Kraftwerken mit „chemisch schwierigen“ Brennstoffen zu entwickeln, um diese Sensorik dann im Zuge der aktuell zunehmenden Komplexität von Brennstoffgemischen auch auf die überwiegend fossil befeuerten großen Kraftwerke im Sinne einer betriebsbegleitenden Unterstützung zu adaptieren.

Die Merkmale und Messparameter der Sensorik ergeben sich aus dem Informationsbedürfnis und aus den Randbedingungen am Einsatzort. Aus Sicht der

Autoren sind folgende Zusammenhänge bei der Entwicklung und beim Einsatz von Online-Sensorik stets zu berücksichtigen:

- Die gegebene Verfahrenstechnik und die Art des Brennstoffs bestimmen die grundsätzlichen Randbedingungen der Korrosionsorte.
- Die Änderungen des Brennstoffs, die eingesetzten Werkstoffe, wie auch rechtliche Vorgaben sind langfristig variable Randbedingungen für den Korrosionsort.
- Die gegebenen Eigenschaften von Brennstoff, Feuerführung und Wärmeabbau, also der jeweilige Betriebszustand, beeinflussen als mittel- bis kurzfristig variable Randbedingungen den jeweiligen Korrosionsort.

Diese vielfältigen Randbedingungen prägen das Korrosionsverhalten, also Ursache, Ausmaß und Dynamik der Korrosion. In Bezug auf den jeweiligen Korrosionsort sind damit – als Konsequenz aus den grundsätzlichen und variablen Randbedingungen - folgende Merkmale für das Korrosionsverhalten prägend:

- (I) die Oberflächentemperatur des Werkstoffs,
- (II) die chemische und mineralogische Zusammensetzung des aufliegenden Belags (dessen Phasen und deren individuelle thermodynamische Eigenschaften) und das darin gebundene Gasmikromilieu,
- (III) die Wärmestromdichte, also dem spezifischen, auf die Fläche bezogenen Wärmestrom, der auf der Wechselwirkung zwischen der Wärmequelle (Flamme, reflektierende Oberfläche, strahlendes Rauchgasvolumen, strahlende Partikel, vorbeiströmendes Rauchgas) und der rauchgasberührten Oberfläche einer Heizfläche (Wärmesenke) beruht. Mehr oder weniger isolierende Schichten, die teils gewollt (Feuerfestauskleidung, Cladding etc.) und teils unerwünscht (Verschmutzungen, Korrosionsbeläge etc.) sind, beeinflussen die Wärmestromdichte erheblich.

Für die Optimierung der grundsätzlichen und der variablen Randbedingungen eines Dampferzeugers aus Sicht von Korrosion und Verschmutzung ergibt sich eine Vielzahl von möglichen Schritten. Die Auswahl der Schritte und deren Abfolge aus dem Spektrum der Verfahrenstechnik, der Werkstoffe, der Brennstoffe, der Feuerung und des Wärmeabbaus erfolgt für jeden Kessel individuell und abhängig von spezifischen Interessen (u.a. betriebswirtschaftliche Interessen). Die Online-Sensorik unterstützt diese Schritte, indem zusätzliche Informationen verfügbar werden oder

die normalerweise erst bei Stillständen erreichbaren Informationen bereits im laufenden Betrieb und in relativ kurzen Zeitspannen verfügbar sind.

Die Zielrichtung der durch Online-Sensorik zu beschaffenden Informationen teilt sich im Wesentlichen in vier Bereiche auf. Chemische Rauchgasdiagnose, thermische Rauchgasdiagnose, Belagsdiagnose und Werkstofftests. Entsprechend ergibt sich folgende Gruppierung (siehe Abbildung 1):

Thermische Rauchgasdiagnose: Wärmestromsensor

Chemische Rauchgasdiagnose: Partikelsonde

Belagsdiagnose: Korrosionsmonitor

Werkstoffanwendung (Test): Werkstoffsonde

Art der Diagnose	Art der Sensorik	
Thermische Rauchgasdiagnose	Wärmestromsensor	
Chemische Rauchgasdiagnose	Partikelsonde (Gittersonde/ASP)	
Belagsdiagnose	Korrosionsmonitor	
Werkstofftest	Werkstoffsonde	

Abb. 1.: Die vier Sensorikgruppen mit den verschiedenen Zielsetzungen der Diagnose.



Die oben genannten grundsätzlichen und variablen Randbedingungen der Dampferzeuger können mit diesem Spektrum sensorischer Methoden aus unterschiedlichen Zielrichtungen heraus untersucht werden. Dabei ist es von Vorteil, wenn die konstruktiven Merkmale der Sonden bestimmte Eigenschaften und Freiheitsgrade zulassen. Hierzu gehören u.a.:

- Die Verweilzeit von in den Kessel eingeführten Sonden bleibt frei wählbar.
- Die Dimension der Sonden ist den gegebenen Kesselöffnungen anpassbar.
- Die Eintauchtiefe der Sonden ist den gegebenen Kesseldimensionen anpassbar.
- Die Temperaturen auf der Sondenoberfläche sind frei wählbar und regelbar.
- Die Sensoren zur Bestimmung der Wärmestromdichte sind vor Betriebseinflüssen optimal geschützt, da sie auf der Außenseite des Kessels montiert werden.

Um diese Merkmale weitgehend erfüllen zu können, sind die Sensoren so robust und „simpel“ wie möglich konstruiert.

Neben dem Einsatz der Online-Sensorik an großtechnischen Anlagen ist auch der Einsatz an Technikumsanlagen möglich. Die Skalierung der Online-Sensorik wird ggf. entsprechend verkleinert, siehe z.B. [1, 2, 3].

Aufgrund von konkreten Fragestellungen und Zielsetzungen im Zuge von Gutachten und Beratungstätigkeit befindet sich die Online-Sensorik der CheMin GmbH in kontinuierlicher Entwicklung und Erweiterung. In den zurückliegenden Jahren wurde hierzu auf Tagungen und in Fachzeitschriften berichtet [4 bis 13].

Durch die Einbettung in eine gutachterliche Tätigkeit ergeben sich für die Entwicklung einer bestimmten Online-Sensorik in der Regel mehrere Stufen. Zunächst wird ein Informationsmangel festgestellt. Dies ist z.B. gegeben, wenn ein Schadensereignis im Rahmen der gutachterlichen Untersuchung unerwartete Fragen aufwirft. Im nächsten Schritt wird das Informationsbedürfnis konkretisiert und anschließend werden Sonden bzw. Monitore bzw. Sensoren entwickelt und konstruiert, die für das Informationsbedürfnis sensitiv sein könnten. Dann wird mit Prototypen getestet, verifiziert und optimiert. Zuletzt wird ein Standard festgelegt und für Kunden angewendet, ggf. durch Patentanmeldung geschützt und ggf. für Anwender lizenziert. Im Zuge der routinemäßigen Anwendung ergeben sich ggf. Potentiale für eine

erweiterte Nutzung (für neue bzw. aktuelle Fragestellungen). Dies kann einen erneuten Entwicklungszyklus auslösen.

Anhand von Beispielen (anonymisiert) werden nachfolgend einige der Leistungsmerkmale der vier Sensorikgruppen dargelegt. Zudem sollen die Beispiele aufzeigen, bei welchen Fragestellungen eine bestimmte Online-Sensorik eingesetzt werden kann und welche Informationen daraus gewonnen werden können und welches Potential zur Optimierung bzw. zur Minderung von Korrosion sich daraus ableiten lässt.

### ***Wärmestromsensor [4, 5, 6]***

Die Online-Sensorik der Wärmestrommessung steht in verschiedenen Ausführungen zur Verfügung, je nach Konstruktion der Wärmetauscherflächen. Abbildung 1 zeigt beispielhaft die Messanordnung des Sensors für den Fall von Rohr-Steg-Rohr Verdampferwänden. Allen Ausführungen ist gemeinsam, dass am Installationsort Temperaturdifferenzen im Kesselstahl mit hoher Empfindlichkeit gemessen ( $< 0,1 \text{ K}$ ) werden, die anschließend in Wärmestromdichten umgerechnet werden können.

Der Sensor erfasst kontinuierlich die Merkmale der Wärmewiderstände, die sich auf der Verdampferwand befinden (z.B. Feuerfest, Verschlackung, Beläge etc.) und auch die Änderung des Wärmeangebots im Rauchgas.

Mehrere Sensoren am gleichen Bauteil bilden eine Sensorgruppe. Meist werden 10 bis 50 Sensoren zu einer Gruppe zusammengefasst. Die spezifischen Bedingungen der Wärmeauskopplung z.B. in der Feuerung und auch entlang eines gesamten Strahlungszuges lassen sich damit sichtbar machen. Dynamische Prozesse, die „unsichtbar“ und nicht spezifisch geregelt ablaufen, werden damit transparent. Dies betrifft z.B. das Zündverhalten des Brennstoffs, die Feuerlage, Schief lagen in der Nachverbrennung, sowie Verschlackung und Verschmutzung in den Strahlungszügen. Regelnde Eingriffe (Feuerführung) und periodische Maßnahmen (online-Reinigung) können diese Informationen nutzen, um gezielter wirken zu können.

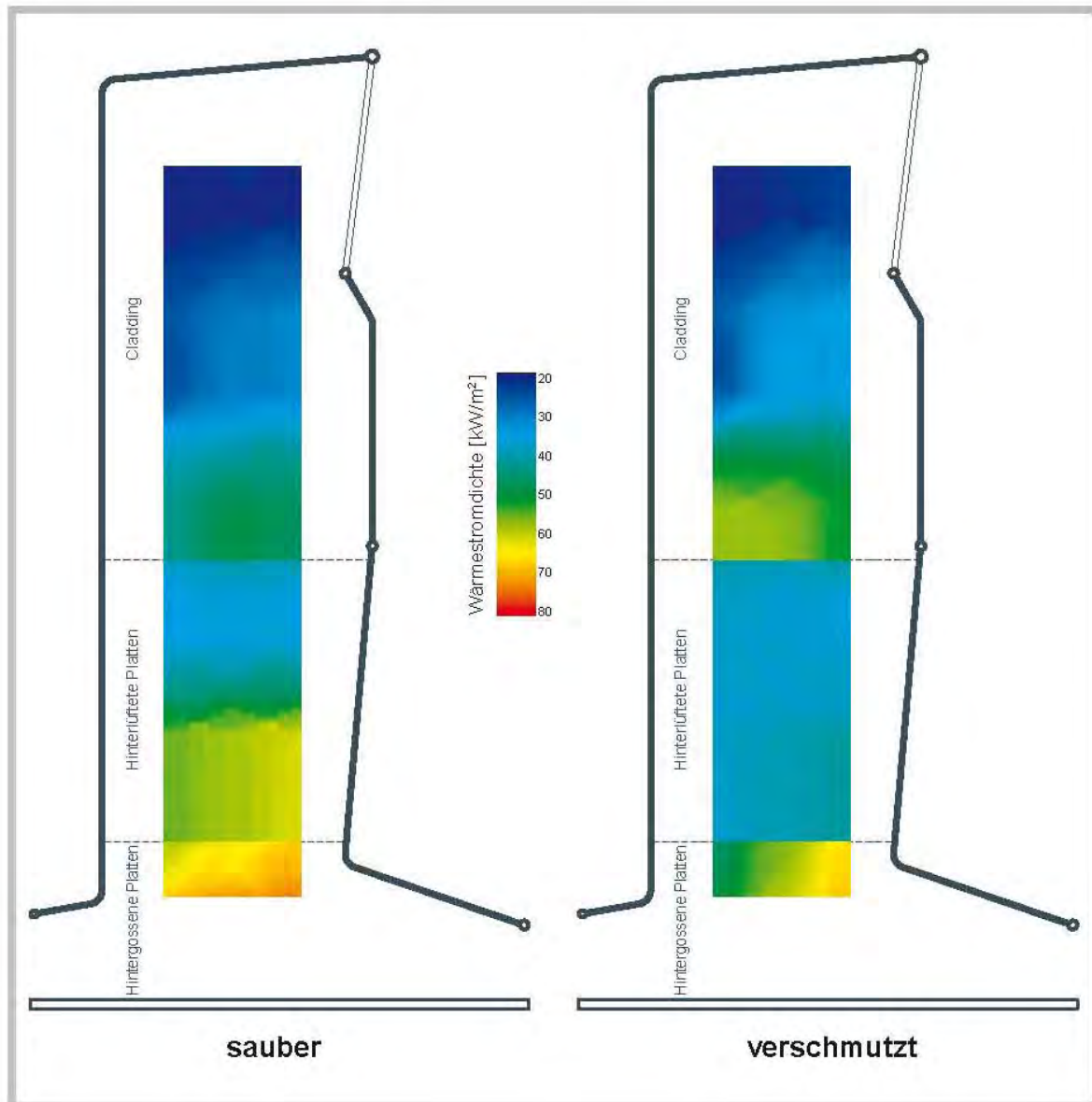


Abb. 2.: Verteilung der Wärmestromdichte in einer Anlage mit verschiedenen Wandaufbauten (hintergossenes und hinterlüftetes Plattensystem und Cladding), im sauberen und verschmutzten Zustand. Die Wärmestromdichte wird anhand von Wärmestromsensoren ermittelt, die an der Membranwand des Kessels installiert sind.

Abbildung 2 zeigt die Verteilung der Wärmestromdichte einer Seitenwand im 1. Zug einer MVA in Abhängigkeit von Schutzschichten (Feuerfest, Cladding) und vom Grad der Verschmutzung (links zu Beginn der Reisezeit, rechts nach ca. 1000 Stunden). Die dargestellte Flächeninformation wird aus 65 Sensoren interpoliert und kann im Betrieb laufend - z.B. alle 5 Sekunden - aktualisiert werden.

Grundsätzlich gilt: Je besser Wärmetauscherflächen genutzt werden, umso geringer belastet sind nachfolgende Wärmetauscherflächen. Dies ist ein wichtiger Bestandteil des Korrosionsschutzes. Wärmestromsensoren machen eine ungeeignete Nutzung von Wärmetauscherflächen sichtbar (zu geringe Belastung, zu hohe Belastung), unterstützen damit ein optimierendes Betriebsverhalten und kontrollieren dessen Erfolg.

### ***Partikelsonde [3, 7, 8, 9]***

Für die chemische Rauchgasdiagnose stehen zwei Sensor-Methoden zur Verfügung, die betriebsbegleitend eingesetzt werden: die Gittersonde und die ASP-Methode (Asche-Salz-Proportionen), vgl. Abbildung 1. Ziel ist bei beiden Sonden, die chemischen Merkmale von Rauchgasinhaltsstoffen im Kessel zu erfassen. Dies betrifft die aus der Feuerung ausgetragenen Feststoffe (und Flüssigkeiten) und alle Stoffe, die durch Abkühlung des Rauchgases im Kessel zur Sättigung gelangen (kondensieren bzw. desublimieren). Denn rauchgasseitige Korrosion ist in fast allen Fällen ein Prozess, der durch die feststofflichen Komponenten des Rauchgases bedingt ist, oftmals unter extremen stofflichen Milieus, die sich durch die selektierenden Prozesse der Belagsbildung ergeben.

Die ASP-Methode erfasst alle feststofflichen Komponenten, die nicht ausschließlich als Gas durch den Kessel transportiert werden. Dies erfolgt am kältesten Ort im Kessel, also am Kesselende. Die gesammelten Partikel werden chemisch analysiert und in ein empirisch aufgebautes Bewertungssystem eingebunden (auf der Grundlage von mehreren 100 ASP-Proben), das die generelle Korrosivität der untersuchten Betriebssituation, also die Auswirkung von Brennstoff und Feuerung, bewertet.

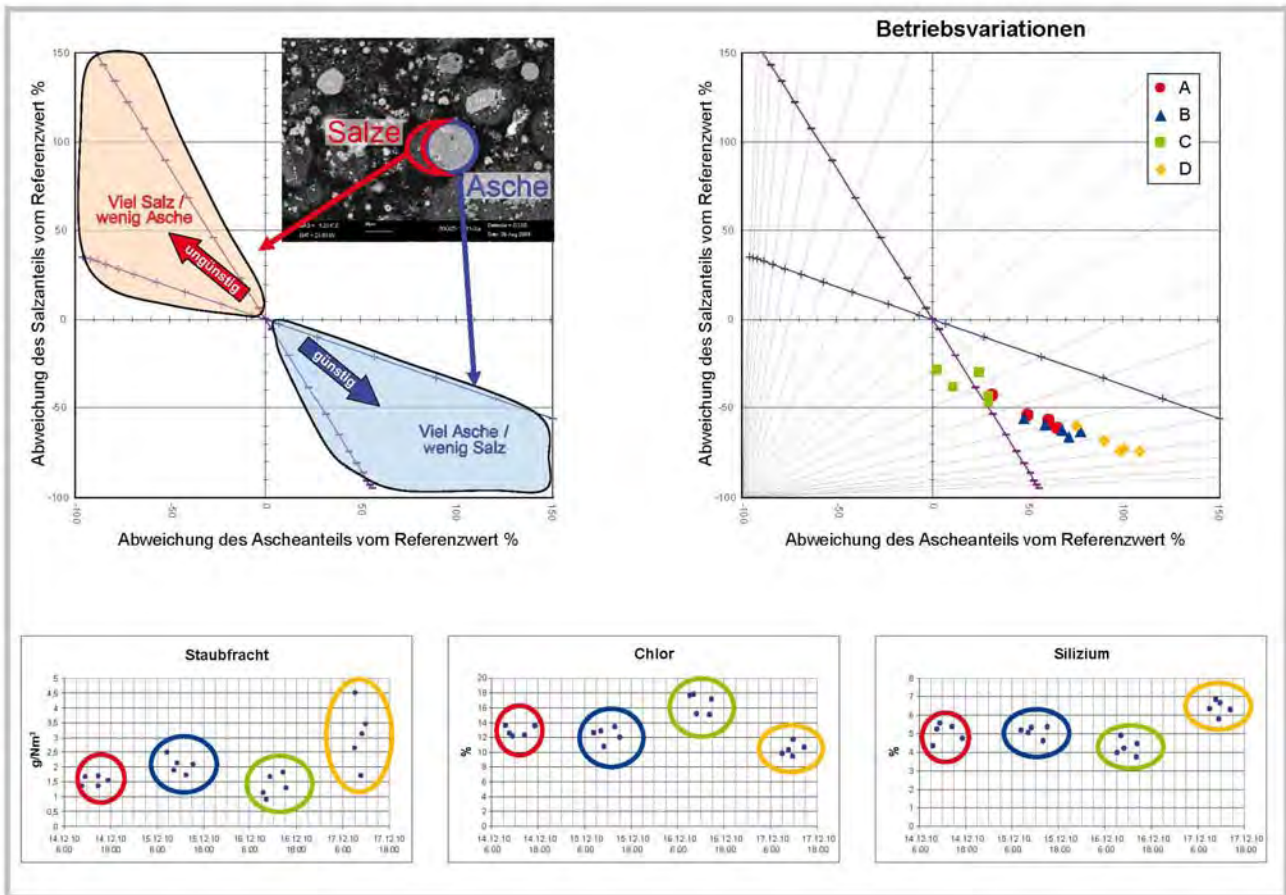


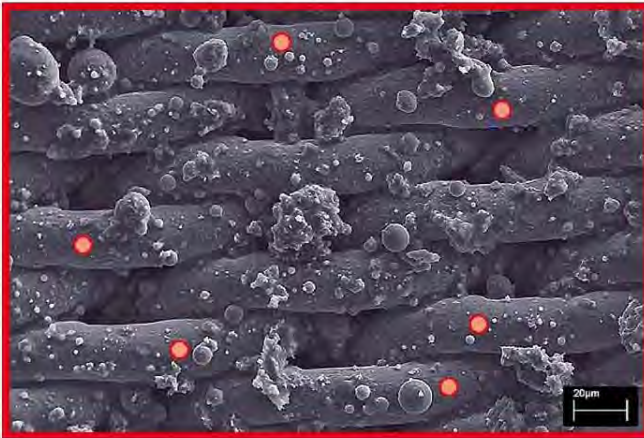
Abb. 3.: Auswertung einer ASP-Probenahme, wobei vier verschiedene Betriebsvariationen gefahren wurden, die sich im ASP-Diagramm bzw. anhand der Staubfracht und Elementanteile im Korrosionspotential unterscheiden.

Abbildung 3 zeigt ein Beispiel, bei dem vier Betriebsvariationen mit je fünf ASP-Proben untersucht wurden (z.B. pro Variation 24 Stunden Betrieb, variiert wurde entweder die Feuerführung oder die Brennstoffmischung). Das relativ geringste Korrosionspotential weist Variation D auf, die relativ höchste Variation C.

Die Gittersonde erfasst demgegenüber die selektierenden Prozesse der Belagsbildung, die für die lokal oftmals sehr unterschiedlichen Korrosionsbelastungen entlang des Rauchgasweges verantwortlich sind. Eine große Rolle spielen hierbei die in Sättigung geratenden Salze (meist Chloride). Die Konstruktion der Sonde (vgl. Abbildung 1 und 4) ermöglicht, die in Sättigung befindlichen Salze von den übrigen Partikeln so zu trennen, dass eine getrennte chemische Analyse möglich ist und physikalische Eigenschaften (Ablagerung flüssiger oder fester Partikel, Kondensation flüssiger Schichten auf dem Gitter etc.) erkennbar sind (Abbildung 4).

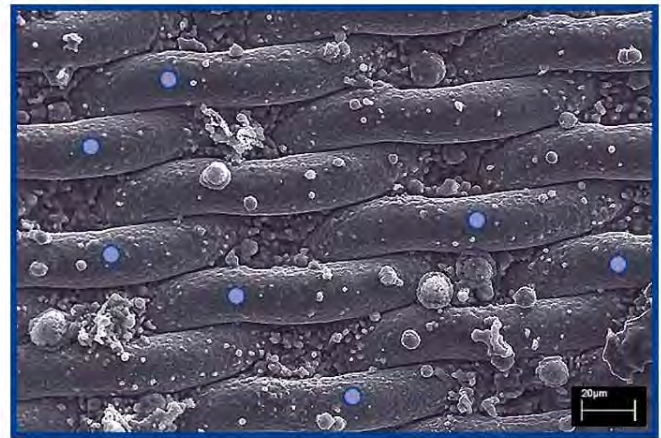


**Beispiel für Sondenposition  
mit heißerem Rauchgas**

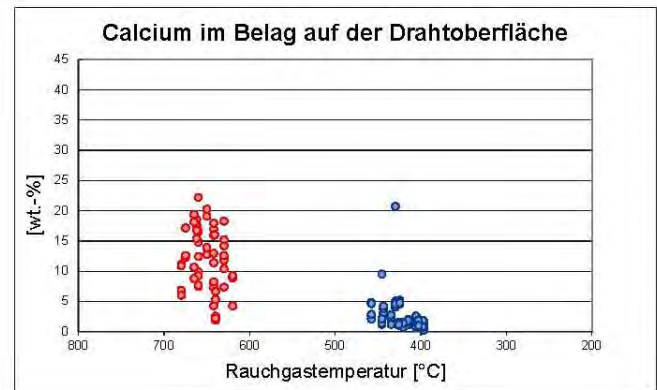
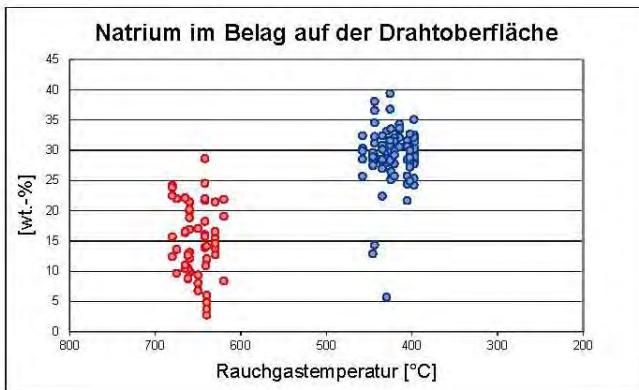
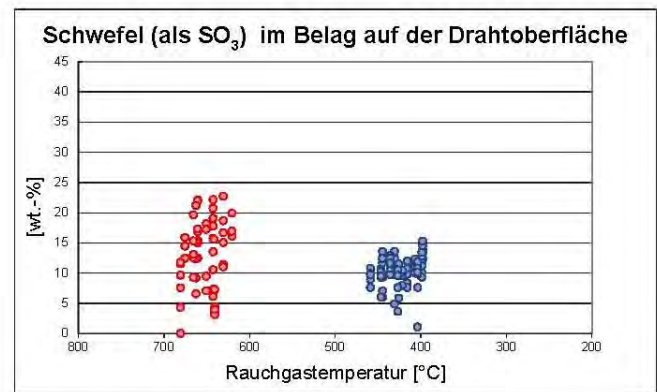
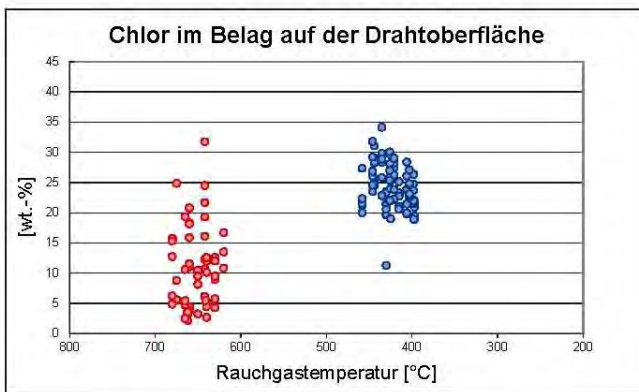


● Positionen typischer Messstellen (qualitativ)

**Beispiel für Sondenposition  
mit kälterem Rauchgas**



● Positionen typischer Messstellen (qualitativ)



*Abb. 4.: Anwendung der Gittersonde bei unterschiedlichen Rauchgastemperaturen. Das Gitter wird (gekühlt oder ungekühlt) in den Rauchgasstrom gehalten, wobei sich die bei der jeweiligen Rauchgastemperatur gesättigt vorliegenden Spezies auf der Drahtoberfläche ablagern. Dieser Belag der Drahtoberfläche wird anschließend mikroanalytisch untersucht.*

Durch Kühlung der Sonde lassen sich auch Kältefalleneffekte erfassen, die auf der Oberfläche von Verdampfer- und Überhitzerheizflächen immer gegeben sind.

Die Partikelsonden machen die chemisch-stoffliche Seite der Korrosivität sichtbar, sowohl für den gesamten Prozess (ASP), als auch für die lokalen Effekte an einzelnen Bauteilen (Gittersonde). Oftmals leistet diese Sensorik Entscheidungshilfe, welche Feuerführung bzw. welche Brennstoffe ein Minimum an Korrosivität ergeben. Zudem erlaubt diese Sensorik, zwischen Brennstoffen und Korrosivität eine betriebswirtschaftlich belastbare Beziehung herzustellen.

### ***Korrosionsmonitor [9, 10, 11, 12, 13]***

Korrosionsmonitore - und auch die nachfolgend beschriebenen Werkstoffsonden - erzeugen ein komplettes Abbild eines korrosionsbelasteten Bauteils, inkl. Belagsbildung und Wärmestrom. Die Sonden sind somit temporär eingesetzte Bauteile. Beginn und Ende der „Reisezeit“ sind frei wählbar, abgestimmt auf vorgegebene Brennstoffe bzw. Betriebssituationen. Die Stillstandsbegehung lässt sich somit in das Labor übertragen mit allen Vorteilen der präparativen Handhabung und Analyse.

Abbildung 1 zeigt den Aufbau der Sonden. Durch innen aufgekuppelte Thermodrähte wird ein Kühl- (oder Heiz-)Fluid so geregelt, dass sich ein gewählter Temperaturbereich (z.B. 200 K) konstant auf der Sondenlänge einstellt (vgl. Abbildung 5).

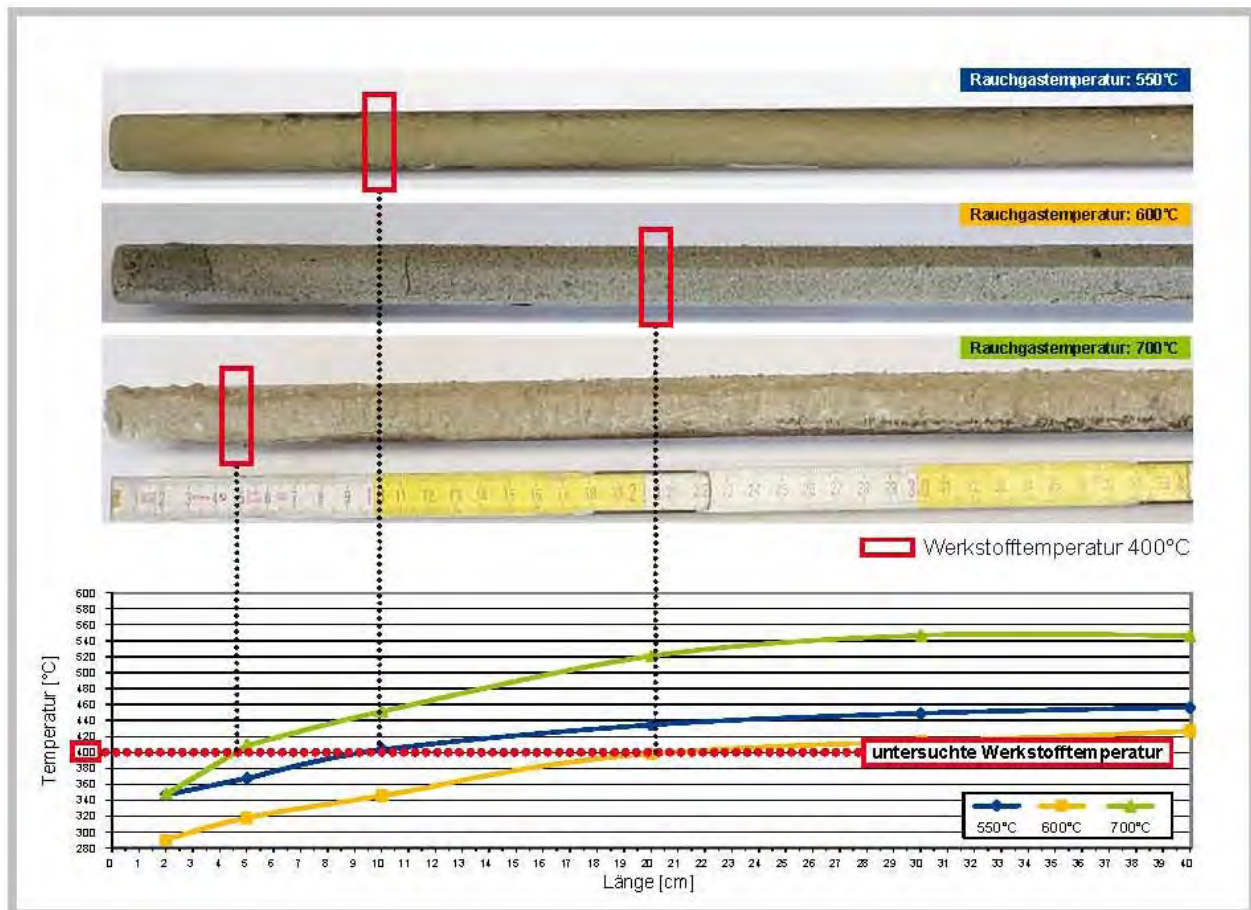


Abb. 5.: Anwendungsbeispiel für Korrosionsmonitore: der aktiv gekühlte Korrosionsmonitor wird bei unterschiedlichen Rauchgastemperaturen in den Rauchgasstrom eingeführt. Die auf der Innenseite der Sonde angebrachten und regelbaren Thermofühler sichern ein über den Probenahmezeitraum gleichbleibendes Temperaturfenster auf der Sondenoberfläche. Anschließend kann der Belag bei der gewünschten Werkstofftemperatur (im Beispiel Werkstofftemperatur 400°C) weiter untersucht werden.

Die Abhängigkeit der Korrosion von der Werkstofftemperatur wird damit sichtbar und bewertbar. Temperaturschwellen zwischen geringer und erhöhter Korrosivität bilden sich ab. Durch den Einbau der Sonden an mehreren Kesselöffnungen entlang des Rauchgasweges kann auch der Einfluss der Rauchgastemperatur (der Wärmestromdichte) abgebildet werden (vgl. Abbildung 5).

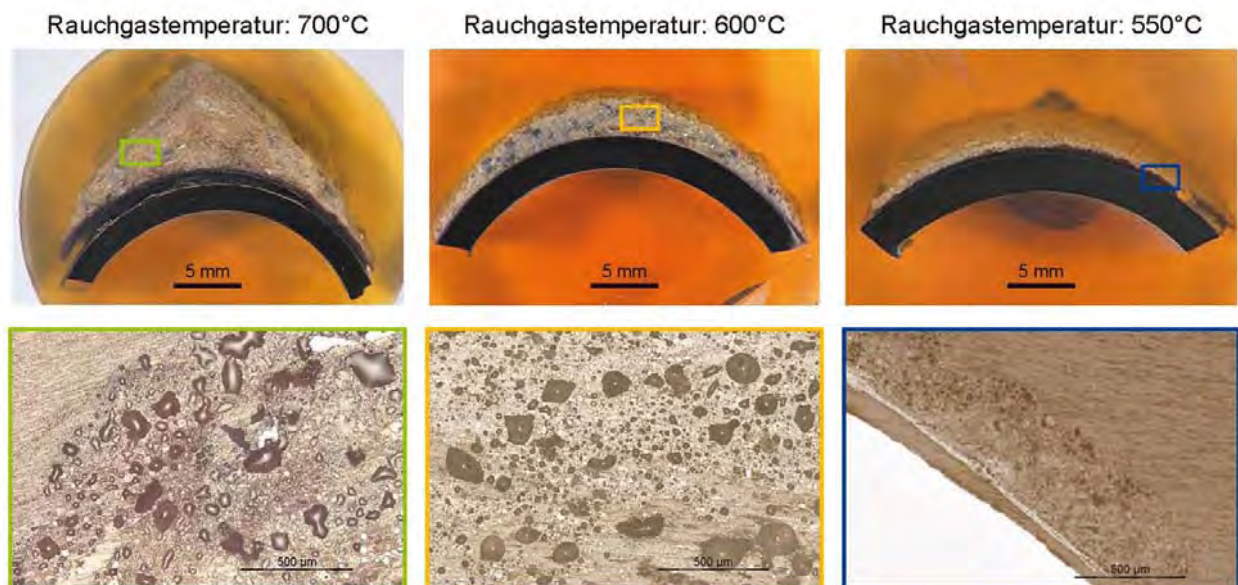
Die möglichen Zielsetzungen für den Einsatz der Korrosionsmonitore sind damit sehr vielfältig. Der Fokus kann auf unterschiedlichen Schwerpunkten liegen, z.B.:

- der vergleichenden Bewertung von Brennstoffen,
- der Optimierung der Feuerführung,



- der Optimierung von Bauteiltemperaturen (Stichwort: höhere Endüberhitzungstemperatur),
- der Ermittlung der Wärmebelastung von Bauteilen.

Die Sonden eignen sich zudem für die Bewertung von Belägen. So kann die Ursache von z.B. besonders harten oder besonders schnell anwachsenden Belägen untersucht werden (vgl. Abbildung 6).



*Abb. 6.: Belagsuntersuchungen von Korrosionsmonitoren bei einer Werkstofftemperatur von 400°C und bei unterschiedlichen Rauchgastemperaturen. Die Probenahmedauer war bei allen Sensoren 15 h. Anhand des Belagsaufbaus können Rückschlüsse auf die Dynamik der Verschmutzung sowie auf den chemischen Inhalt gezogen werden. Ein hoher Anteil an hygroskopischen Salzen (in diesem Fall  $\text{CaCl}_2$ ) verursacht bei einer Rauchgastemperatur von 700°C und 600°C die Bildung von Feuchtigkeitstropfen auf der Oberfläche der Anschliffpräparate. Bei 550°C ist kein  $\text{CaCl}_2$  mehr im Belag vorhanden.*

In gleicher Weise nützlich sind diese Sonden auch für den Taupunkts- bzw. Deliqueszenzbereich, also für Bauteile wie LUVU, ECO und Bleche in der Rauchgasreinigung (vgl. Abbildung 7).

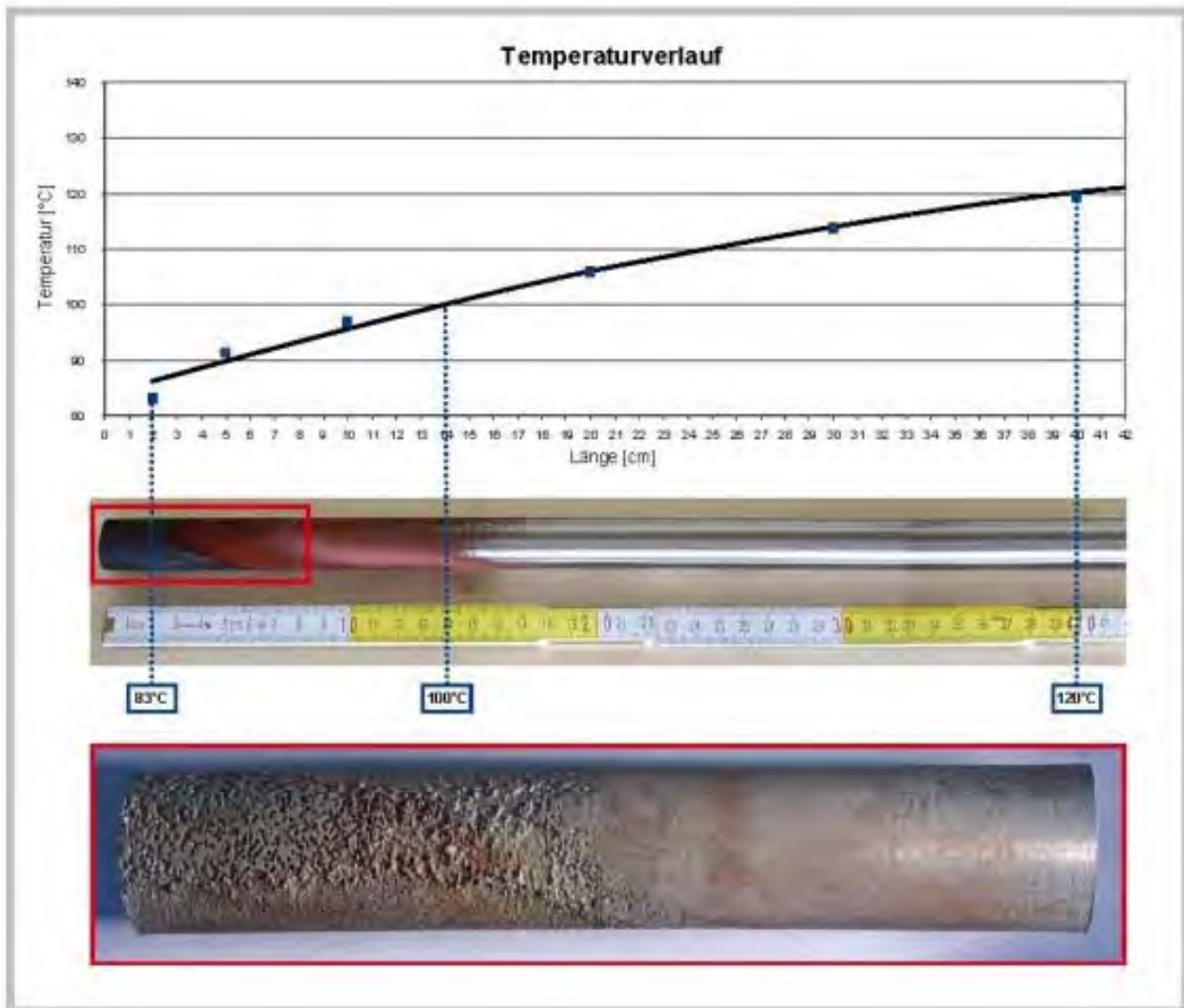


Abb. 7.: Anwendungsbeispiel für einen Korrosionsmonitor im Taupunkt- bzw. Deliqueszenzbereich. Die Betrachtung der Sondenoberfläche bei unterschiedlichen Werkstofftemperaturen können Rückschlüsse auf Temperaturschwellen für erhöhte korrosive Angriffe ermittelt werden. Bei chemischer Untersuchung der gebildeten Beläge ist zudem der für die Korrosionsangriffe verantwortliche Aggressor zu bestimmen.

Die Freiheitsgrade eines wählbaren Bereichs von Rauchgas- und Werkstofftemperaturen sind auch für diese Zielsetzung von großem Vorteil.

Die Möglichkeit zur Untersuchung von Belägen und von Korrosionsprodukten macht den Korrosionsmonitor auch zu einem Instrument der Ursachenbewertung. So kann es z.B. für die Wirkung von abwehrenden Maßnahmen bei Taupunktkorrosion entscheidend sein, zwischen den Aggressoren Schwefelsäure und beispielsweise korrosiv wirkende Salze wie Ammoniumchlorid sicher unterscheiden zu können.

## **Werkstoffsonde**

Werkstoffsonden sind in Aufbau, Handhabung und Nutzung gleichartig zu den Korrosionsmonitoren. Der Fokus liegt hier auf dem jeweiligen Sondenwerkstoff (Werkstofftest). Zudem können auch Schutzschichten einbezogen werden (z.B. Cladding, thermisches Spritzen, Feuerfest). Auch komplexe Wandaufbauten lassen sich auf der Sonde abbilden.

## **Zusammenfassung**

Aus der gutachterlichen Tätigkeit der CheMin GmbH auf dem Gebiet der rauchgasseitigen Korrosion und Verschmutzung von Dampferzeugern ergibt sich anhand der gegebenen Schäden ein besseres Verständnis für die Prozessschritte der Feuerung, der chemischen Reaktionen im Zuge des Wärmeabbaus, der Bildung und Entwicklung von Verschmutzung und damit für die Wechselwirkungen zwischen Werkstoffen und Rauchgasinhaltsstoffen.

Da jeder Kessel aufgrund seiner spezifischen Randbedingungen ein „Einzelfall“ ist, werden sensorische Methoden betriebsbegleitend eingesetzt, um diese Wechselwirkungen - für jeden Kessel - zu erfassen und damit zielorientiert zu beeinflussen. In Abhängigkeit von der Werkstofftemperatur, der Rauchgastemperatur, der Wärmestromdichte, der Werkstoffart, der Chemie der Beläge oder auch der Dynamik der chemischen Reaktionen (also zeitabhängige Prozesse) werden Befunde erhoben. Entsprechend müssen die online-Sonden diese Randbedingungen gezielt und mit variierbaren Parametern erfassen können.

Der vorliegende Beitrag stellt diesbezüglich vier Gruppen von online-Sensorik vor und zeigt an Beispielen das Anwendungspotential auf.

Alle feststoffbefeuerten Dampferzeuger können sich in Bezug auf Korrosion oder Verschmutzung dynamisch verhalten. Unerwartete, von langjähriger Erfahrung abweichende Befunde sind zunehmend häufig zu beobachten. Im Groben sind die auslösenden Faktoren den Interessen der Wirkungsgradoptimierung, der Kostenoptimierung, der Verfügbarkeitserhöhung und der nicht stetigen Auslastung zuzuordnen. Dies betrifft alle Brennstoffe von Steinkohlen über Braunkohlen bis hin

zu Biomassen, Ersatzbrennstoffen und Abfällen. Der Online-Sensorik für die Bekämpfung von Korrosion und Verschmutzung sollte deshalb ein angemessener Platz im betrieblichen Ablauf eingeräumt werden und nicht erst bei Schäden zum Einsatz kommen.

## Literatur

- [1] 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. und Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall. Band 6. Neuruppin: TK Verlag, 2009, S. 443-460
- [2] Pohl, M., Bernhardt, D., Beckmann, M., Spiegel, W.: Brennstoffcharakterisierung zur vorausschauenden Bewertung des Korrosionsrisikos. In: Born, M. (Hrsg.): Dampferzeugerkorrosion 2011, Freiberg: SAXONIA Standortentwicklungs- und verwaltungsgesellschaft mbH, 2011, S. 67-83
- [3] Pohl, M., Beckmann, M., Herzog, T., Spiegel, W., Kaiser, M., Brell, J.: PartikelGitterNetzSonde – Korrosionsdiagnose bei der Verbrennung schwieriger Brennstoffe. In: Thomé-Kozmiensky, K.J. und Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall. Band 10. Neuruppin: TK Verlag, 2013, S. 339-357.
- [4] Spiegel, W., Magel, G., Herzog, T., Müller, W., Schmidl, W.: Empirische Befunde am Kessel – Wärmestromdichte korreliert mit Korrosionsdynamik. In: Thomé-Kozmiensky, K.J. und Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall. Band 7. Neuruppin: TK Verlag, 2009, S. 271-286
- [5] Magel, G., Molitor, D., Bratzdrum, C., Koch, M., Aleßio, H.-P.: Wie kommt die Wärme ins Rohr? – Korrosion ist oftmals ein Symptom hoher Wärmestromdichte. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. und Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 9. Neuruppin: TK Verlag, 2012, S. 373-390
- [6] Krüger, S.: Wärmestrommessung an Membranwänden von Dampferzeugern, Neuruppin: TK-Verlag, 2009
- [7] Metschke, J., Spiegel, W.: Endbericht EU22 – Systematisierung und Bewertung von verfügbaren Maßnahmen zur Korrosionsminderung in der betrieblichen Praxis von MVA mittels partikelförmiger Rauchgasbestandteile. Im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz 2004, verfügbar unter [www.chemin.de](http://www.chemin.de)
- [8] Magel, G., Spiegel, W., Herzog, T., Müller, W., Schmidl, W.: Standzeitprognose durch regelmäßige Kesselkontrolle. In: Born, M. (Hrsg.): Dampferzeugerkorrosion 2011, Freiberg: SAXONIA Standortentwicklungs- und verwaltungsgesellschaft mbH, 2011, S. 95-112
- [9] Spiegel, W., Herzog, T., Jordan, R., Magel, G., Müller, W., Schmidl, W.: Korrosions-Früherkennung bei Abfall-, Biomasse- und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken. In: Thomé-Kozmiensky, K.J. und Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall. Band 3. Neuruppin: TK Verlag, S. 235-258.

- [10] Müller, W., Kaiser, M., Schneider, D., Herzog, T., Magel, G., Spiegel, W.: Korrosion in altholzgefeuerten Biomasseanlagen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. und Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 10. Neuruppin: TK Verlag, 2013, S. 359-377
- [11] Herzog, T., Müller, W., Spiegel, W., Brell, J., Molitor, D., Schneider, D.: Corrosion caused by Dew Point and Deliquescent Salts in the Boiler and the Flue Gas Cleaning. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Thiel, S. (Hrsg.): Waste Management, Volume 3, Recycling and Recovery, Neuruppin: TK Verlag, 2012, p. 343-358
- [12] Herzog, T., Müller, W., Spiegel, W., Brell, J., Molitor, D., Schneider, D.: Korrosion durch Taupunkte und deliqueszente Salze im Dampferzeuger und in der Rauchgasreinigung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. und Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 9. Neuruppin: TK Verlag, 2012, S. 429-460
- [13] Magel, G., Spiegel, W., Müller, W.: Einschätzung der Korrosivität des Rauchgases durch Online-Sensorik, VGB-Fachtagung „Thermische Abfallverwertung 2012“, Hürth 8.-9. November 2012, verfügbar unter [www.chemin.de](http://www.chemin.de)