

**Kaiser, M.; Schneider, D.; Brell, J.; Molitor, D; Kuttner, T. (2015):**

**Effizienzsteigerung – Anwendung der Temperature-Range-Probe  
zur Optimierung der Werkstoffwahl in MVA.**

In: VGB PowerTech, Ausgabe 10/2015, S. 53-58

# Effizienzsteigerung – Anwendung der Temperature-Range-Probe zur Optimierung der Werkstoffwahl in MVA

Marie Kaiser, Dominik Schneider, Joos Brell, Dominik Molitor, Tobias Kuttner  
CheMin GmbH, Augsburg

## Kurzfassung

Aufgrund der komplexen stofflichen Eigenschaften von Abfällen sind die Ziele eines hohen Wirkungsgrades bei der Verstromung und einer hohen Verfügbarkeit mit besonderen Herausforderungen verbunden. Die Eigenschaften des Brennstoffs und die Eigenschaften der Feuerung machen jedes abfallgefeuerte Kraftwerk zu einem individuellen und inhomogenen thermo-chemischen Prozess. Die Auswahl des besten (Schutz)Werkstoffs ist für jedes Kraftwerk gesondert durchzuführen. Auch bei signifikanter Änderung von Brennstoffeigenschaften ist die Frage erneut zu stellen. Je höher der angestrebte Wirkungsgrad bzw. die angestrebte Verfügbarkeit liegt, desto bedeutsamer ist die richtige Wahl der (Schutz)Werkstoffe.

Der vorliegende Beitrag stellt für diesen Zweck die durch CheMin entwickelte Temperature-Range-Probe vor und zeigt anhand von Anwendungsbeispielen deren Nutzungspotential. Die Sonde eignet sich für die Interessen von Kraftwerksbetreibern, für Anlagenbauer und für Hersteller und Anwender von Schutzschichten.

Im Zuge von Optimierungsmaßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz eines Kraftwerks ist die Temperature-Range-Probe ein wertvolles Hilfsmittel. So kann z.B. die Korrosionsrelevanz in Bezug auf eine Absenkung der Speisewasser-Temperatur oder eine Erhöhung der Dampfparameter durch die Sonde abgebildet werden, und dies, bevor die Maßnahme realisiert wird. Chancen und Risiken einer Optimierungsmaßnahme können damit in Bezug auf Korrosion besser eingeschätzt und optimal gestaltet werden.

## Increasing Efficiency – Using a Temperature-Range-Probe to optimize the choice of material in waste incineration plants

### Abstract

On the basis of the complex material characteristics of waste, the aims of a high efficiency of energy production and a high availability create special challenges. The characteristics of the respective fuel and the characteristics of the method of firing turn each waste-fired power plant into an individual and inhomogeneous thermo-chemical process. The choice of the best protective material has to be made for each power plant separately. Also the question must be raised again whenever there is a significant change of fuel characteristics. The higher the aspired efficiency or the desired availability is, the more important the correct choice of protective materials becomes.

This abstract introduces the Temperature-Range-Probe which CheMin developed for this purpose and shows its potential using selected examples. The Temperature-Range-Probes are of interest to power plant operators, plant developers, and to manufacturers and users of protective layers. Temperature-Range-Probes are valuable means of creating optimization procedures to increase the energy efficiency of a power plant. For example, the corrosion potential in relationship to lowering the feed water temperature or raising the steam parameter can be visualized by the Temperature-Range-Probe even before these changes have been taken in the plant. Chances and risks of an optimization process can thereby be better estimated and optimally designed with regard to corrosion.

# 1 Korrosionserscheinungen in Kraftwerken

Abzehrungserscheinungen an den Werkstoffen von Wärmetauscherflächen (Überhitzer, Verdampfer, Eco etc.) treten in Verbrennungskesseln häufig auf. Dies kann die Verfügbarkeit mindern. Zudem werden die für den elektrischen Wirkungsgrad relevanten Parameter meist konservativ ausgelegt.

Hauptursache für die Abzehrung der Werkstoffe ist Korrosion. In Abhängigkeit der Gegebenheiten (Temperaturen, Brennstoff- und Rauchgaszusammensetzung etc.) treten an den Bauteilen verschiedene Korrosionserscheinungen auf [1 bis 5]:

- Hochtemperaturchlorkorrosion
- Salzschnmelzenkorrosion
- Deliqueszenzkorrosion
- Taupunktskorrosion

Das Ziel einer Effizienzsteigerung durch bessere Verfügbarkeit und höheren Wirkungsgrad erfordert, die Korrosionsprozesse beurteilen zu können und die werkstofflichen und verfahrenstechnischen Entscheidungen so zu treffen, dass die Korrosion unter Kontrolle gehalten werden kann. Dies bedeutet, die betriebswirtschaftlichen Auswirkungen und den Instandhaltungsaufwand einschätzen zu können.

Aufgrund unterschiedlicher Einflüsse (Brennstoff, Feuerung, etc.) pro Kessel ist eine Übertragbarkeit der korrosionsrelevanten Eigenschaften von Werkstoffen und Schutzschichten nur begrenzt möglich [6, 7].

Unterschiedliche Werkstoffe und Schutzschichten können sich je nach Standort und Einbauposition als wirkungsvoll bzw. wirkungslos darstellen.

Diese Problematik ist allgemein bekannt und so werden bei Optimierungsmaßnahmen die in Frage kommenden Werkstoffe oder Schutzschichten zunächst häufig in Form von

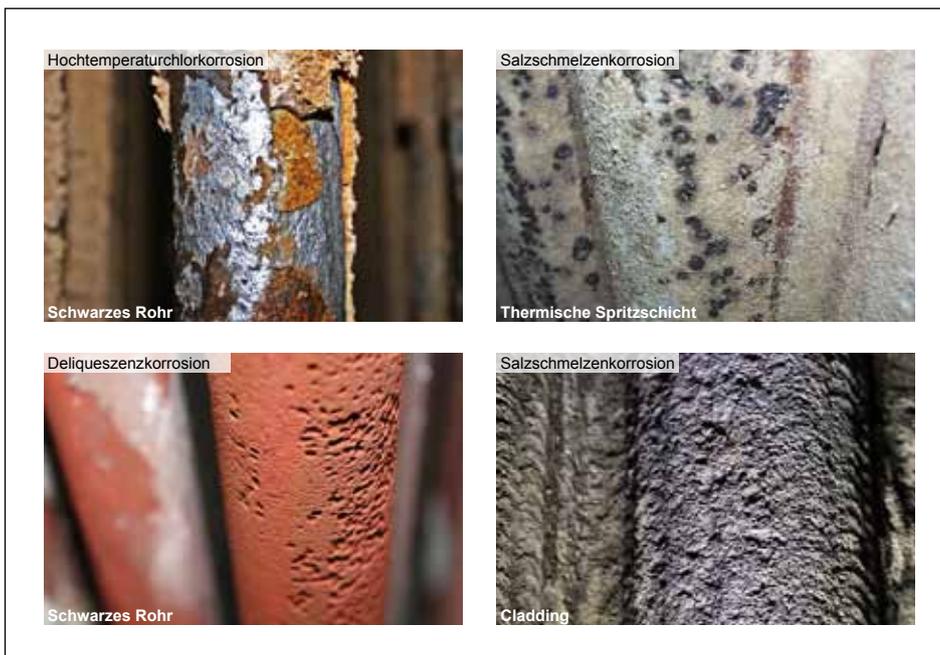


Abb. 1: Typische Korrosionserscheinungen an schwarzem Rohr, Cladding und thermischer Spritzschicht.

Testfeldern im Kessel appliziert [8, 9].

Ein Nachteil dieser Vorgehensweise sind die verhältnismäßig langen Testzyklen in Abhängigkeit der Revisionszeiten und somit eine lange Vorlaufzeit bis zur Auswertung der Ergebnisse und möglichen Anwendung des Werkstoffs. Ein weiterer erheblicher Nachteil von Testfeldern ist, dass bei Optimierungsmaßnahmen, die zu einer Änderung der Temperaturen des Werkstoffs führen (u.a. Druckstufe; Überhitzung, Speisewassertemperatur), ein Testfeld nicht geeignet ist.

## 2 Temperature-Range-Probe

Durch die im Folgenden vorgestellte Temperature-Range-Probe lassen sich diese Begrenzungen überwinden. Diese Sonde ermöglicht u.a. den Test von Werkstoffen, die Variation der Werkstoff-

temperatur, die Diagnose der Korrosionsursachen in Abhängigkeit der Werkstofftemperatur und die Ermittlung von Abzehraten in Abhängigkeit der Werkstofftemperatur. Diese Befunde zu den Werkstoffeigenschaften werden im laufenden Betrieb unabhängig von Revisionszeiten durchgeführt [10, 11].

Auch bei Schadensuntersuchungen und Gutachten konnten durch den Einsatz der Temperature-Range-Probe Befunde zu Ursache, Mechanismus und Dynamik von Korrosion und/oder Verschmutzung ermittelt werden [6, 7, 10 bis 12].

Die nachfolgend näher beschriebene Sonde wird als „Temperature-Range-Probe“ bezeichnet (da die Sonde international eingesetzt wird, wird die englische Bezeichnung verwendet). Tabelle 1 gibt einen Überblick zu den Anwendungsbereichen dieser Sonde und listet die möglichen Befunde und Aussagen auf.

Tabelle 1: Überblick zu den möglichen Anwendungsbereichen der Temperature-Range-Probe.

<b>Temperature-Range-Probe</b>		
<b>Anwendungsbereich</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Befunde und Aussagen</b>
Werkstoff	Werkstoffsonde	Werkstofftests <ul style="list-style-type: none"> <li>• Eignung und Grenzen von Rohrmaterialien</li> <li>• Eignung und Grenzen von Schutzschichten</li> </ul>
Korrosion	Korrosionssonde	Temperaturschwellen für <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hochtemperaturchlorkorrosion</li> <li>• Salzschnmelzenkorrosion</li> <li>• Taupunktskorrosion</li> <li>• Deliqueszenz-Korrosion</li> </ul> Korrosionsmechanismus und -ursache Abzehraten
Belag	Belagssonde	Belagscharakterisierung <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gefüge, Porosität</li> <li>• Salzanreicherung an Kältefallen</li> <li>• Feststoffreaktionen</li> <li>• Eutektische Schmelzen</li> <li>• Belagsaufbau / Lagenbildung</li> </ul>

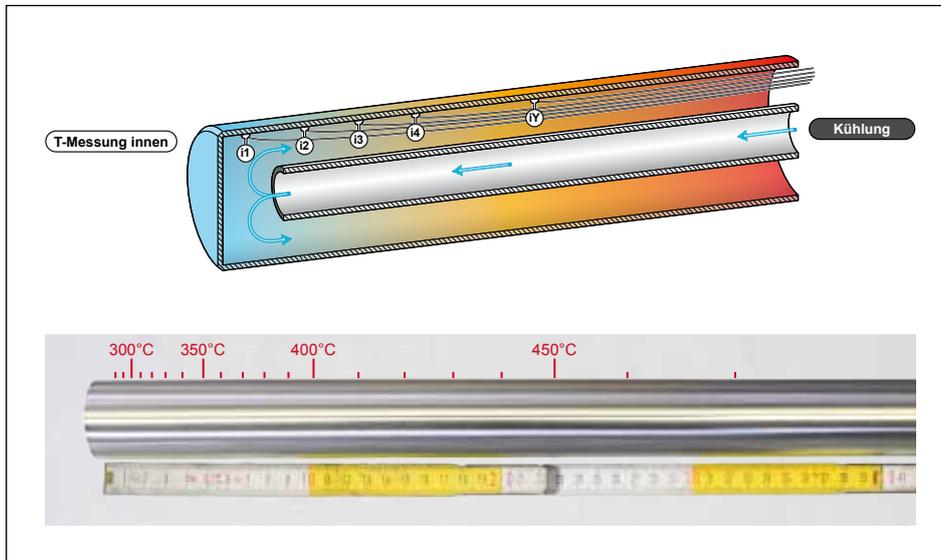
Im vorliegenden Beitrag liegt der Fokus auf der Anwendung der „Temperature-Range-Probe“ für Werkstofftests, es wird daher im weiteren Verlauf des Artikels die Bezeichnung Werkstoffsonde verwendet.

### **3 Aufbau und Funktionsprinzip der Werkstoffsonde**

Die Werkstoffsonde ist im Grundsatz eine vorübergehend in den Kessel eingebaute Wärmetauscherfläche, die auf einer Länge von ca. einem Meter jede Temperatur innerhalb eines gewählten Spektrums aufweist. Die Sonde liefert somit kein Korrosionssignal, sondern testet die Eigenschaften des jeweils eingesetzten Werkstoffs in Abhängigkeit von der Temperatur.

Die Werkstoffsonde bietet die Möglichkeit, Werkstoffe und/oder Schutzschichten im laufenden Betrieb realitätsnah zu testen. Zur Herstellung der Sonde können verschiedene Rohrwerkstoffe mit und ohne Schutzschichten verwendet werden. Um die Prozesse im jeweiligen Wärmetauscher (Strömung, Wärmedurchgang etc.) so realitätsnah wie möglich abzubilden, ist es sinnvoll, ein originales Kesselrohr als Rohling für die Herstellung der Sonde zu verwenden.

Die Länge der Werkstoffsonde ist variabel und je nach Einbauposition und –zweck anzupassen. Es lassen sich auch gewinkelte Sonden realisieren, um die Anströmsituation realitätsnah abzubilden. Üblicherweise liegt die Länge der Sonde zwischen einem und drei Metern. Für jeden Anwendungsfall wird eine maßgeschneiderte Sonde hinsichtlich Werkstoff, Abmessungen und Design hergestellt. Der Herstellungsprozess der Sonde besteht im Wesentlichen aus der Installation einer Kühleinrichtung und mehrerer Temperaturmessungen im Inneren des Testrohres.



Nach Installation der Sonde im Kessel wird diese durch das Rauchgas aufgeheizt. Durch den Einsatz von Druckluft über das installierte Kühlrohr kann ein frei wählbares Temperaturprofil erzeugt werden. Hierzu wird der zugeführte Luftstrom über die installierten Temperaturmessungen geregelt, wodurch ein konstantes Temperaturprofil über eine definierte Länge entsteht. Das Temperaturprofil wird über die gesamte Verweilzeit der Sonde im Kessel gemessen und aufgezeichnet.

Abb. 2: Funktionsprinzip der Temperature-Range-Probe mit innenliegenden Temperaturmesspunkten (i1 bis iY) und einer aktiven Kühlung zur Einstellung eines Temperaturprofils entlang der Sonde.

net, wodurch auf einer definierten Länge der Werkstoffsonde jeder Position eine Temperatur zugeordnet werden kann. Somit ist es möglich, das temperaturabhängige Verhalten eines Werkstoff bzw. einer Schutzschicht unter den jeweils gegebenen Einflüssen mittels einer Sonde realitätsnah abzubilden.

#### 4 Randbedingungen für den Einsatz

Die Anwendung der Sonde ist in fast allen Kraftwerksbereichen möglich, unabhängig von der Art der Feuerung und der Art des Brennstoffs. Typische Einbaupositionen im Kessel sind im Verdampfer- und Überhitzerbereich sowie am kalten Ende (Luftvorwärmer und Economizer). Auch in der Rauchgasreinigung und bis zum Kamin werden die Sonden eingesetzt (Taupunkt).

Der Einbau der Sonde findet im laufenden Betrieb statt, sodass unabhängig von Stillstandszeiten des Kraftwerks Versuche durchgeführt werden können. Die Installation erfolgt über eine geeignete Kesselöffnung. Hierfür können oftmals bereits vorhandene Öffnungen verwendet werden (z. B. Schauluken, Messöffnungen, Sekundärluftdüsen etc.) oder es wird – im Laufe einer Revision - eine Öffnung an der gewünschten Messposition installiert.

Der Durchmesser der Öffnung sollte mindestens 10 mm größer als der Sondendurchmesser sein. Zur Installation der Sonde wird diese durch die Öffnung in den Kessel eingeführt und mittels eines Flansches befestigt. Die Positionierung der Sonde (z. B. Eintauchtiefe) ist variabel und wird je nach Anwendungsfall (Kesselquerschnitt, Strömung, Position etc.) entschieden.

Für den Betrieb der Sonde wird Druckluft (6 bar) zur Kühlung und Strom (230 V, 50 Hz) für die Regelungseinrichtung und zur Datenaufzeichnung verwendet. Im Normalfall reicht hierfür die vorhandene Strom- und Druckluftversorgung der Anlage aus und es müssen keine zusätzlichen Installationen vorgenommen werden.

Während des Betriebs der Sonde befindet sich außerhalb des Kessels eine aktenkoffergroße Regelungseinheit inklusive Datenaufzeichnung. Außerdem ist ein Druckluftschlauch an der Rege-

lungseinheit und der Sonde installiert. Der Platzbedarf außerhalb des Kessels ist für den Betrieb der Sonde somit relativ gering.

Die Einsatzdauer der Sonde ist variabel und abhängig von der Fragestellung und dem Anwendungsbereich. Bei Werkstoff-, Korrosions- oder Verschmutzungstests ist ein mehrwöchiger Einsatz

sinnvoll. Für Fragestellungen hinsichtlich der Belagcharakterisierung ist eine kürzere Anwendungszeit von mehreren Stunden bis Tagen ausreichend.

Je nach Anwendungsfall und geplanter Präparation und Analytik ist es in der Praxis meist sinnvoll eine Kombination aus einer Kurzzeitsonde (mehrere Stunden) und einer Langzeitsonde (mehrere Wochen bis Monate) zu installieren. Die Sonden werden hierbei typischerweise zeitlich hintereinander eingebaut, sodass nur eine Öffnung nötig ist.



Abb. 3: Einsatz der Sonde Vor-Ort.

## 5 Präparation und Analytik

Die Temperature-Range-Probe liefert kein online-Signal zur Korrosion, sondern die Sonde speichert über die Einsatzzeit im Kessel Informationen zur Korrosion. Nach der Einsatzzeit (je nach Zweck zwischen Stunden und Monaten) können diese Informationen ausgelesen werden. Dies erfolgt durch vorsichtige Entnahme der Sonde aus dem Kessel, geeignete Konservierung und Dokumentation der Positionierung im Kessel, sowie durch Auswertung der aufgezeichneten Thermoelementdaten und schließlich durch präparative und analytische Maßnahmen im Labor (analog zu einem Schadensobjekt).

Die gespeicherten Informationen liegen grundsätzlich in Form einer Schichtung vor. Die innerste Schicht ist der noch nicht korrosiv belastete Werkstoff. Daran schließt sich die Schicht der aktiven Korrosionsfront an und daran die Schicht der Korrosionsprodukte. Darauf aufliegend befindet sich als Deckschicht der abgelagerte Belag (der sich ggf. in Teilschichten untergliedert).

Dieses geschichtete Informationspaket ändert seine Eigenschaften und damit seinen Informationsgehalt in Abhängigkeit zur Lageposition auf der Sonde. In Längsrichtung kommt der Einfluss der Werkstofftemperatur hinzu und in umlaufender Richtung kommt der Strömungseinfluss hinzu (anström- und abströmseitig, sowie die Flankenpositionen). Zudem kann sich der Informationsgehalt auch durch Sondereinflüsse, wie z.B. Rußbläser, erhöhen.

Die Art der Untersuchungen kann sich je nach Fragestellung und in Abhängigkeit der Einsatzzeit unterscheiden. Grundsätzlich ist ein gestuftes Vorgehen vom Belag zur Korrosionsfront bzw. von makroskopisch zu mikroskopisch sinnvoll, wobei je nach Fragestellung einzelne Bearbeitungsstufen ausgeweitet bzw. eingegrenzt werden können.

Nach dem Ausbau der Sonde wird zunächst eine Dokumentation des Belagsbildes bzw. der Oberfläche vorgenommen. Unter Zuhilfenahme des Temperaturprofils aus den Thermoelementdaten können erste visuelle Befunde in Abhängigkeit der Werkstofftemperatur erhoben werden.

Zum Erfassen von chemischen Informationen werden die einzelnen Schichten von den jeweils relevanten Temperaturpositionen der Sonde entnommen und hinsichtlich ihrer Zusammensetzung analysiert (z. B. Röntgenfluoreszenzanalyse).

Zum Erfassen von Informationen zum Korrosionsmechanismus bzw. zur Korrosionsursache werden Schliffpräparate erzeugt. Hierfür werden Rohrsegmente an den relevanten Temperaturpositionen aus der Sonde herausgesägt, eingebettet und poliert. Die Präparation erfolgt absolut trocken, um chloridische Salze nicht zu entfernen. Die erzeugten Schriffe können anschließend mittels Lichtmikroskopie bzw. Rasterelektronenmikroskopie (mit energiedispersiver Röntgenanalyse) bewertet werden.

Zum Erfassen der Informationen zu den Korrosionsphänomenen, d.h. zur visuellen Darstellung der temperaturabhängigen Abzehrung, wird die Sonde gereinigt und kann anschließend gebeizt werden. Mit Hilfe des Temperaturprofils aus den Thermoelementdaten lassen sich anhand der Oberflächenmorphologie die unter den gegebenen Bedingungen herrschenden Temperaturschwellen für Korrosionsangriffe erkennen. Es lassen sich somit konkrete Aussagen hinsichtlich der Werkstoffabzehrung in Bezug auf die Mediumstemperatur treffen.

Zum Erfassen der Informationen bezüglich Abzehraten erfolgen Wand- bzw. Schichtdickenmessungen vor und nach Einsatz der Sonde.

## 6 Anwendungsbeispiele aus der Praxis

In Abhängigkeit der Gegebenheiten (Brennstoff, Kesselgeometrie, Feuerung, Betriebsparameter etc.) ergeben sich für die verschiedenen Bauteile jedes Kraftwerks spezifische Bedürfnisse hinsichtlich eines funktionierenden Korrosionsschutzes.

Besonders im Hinblick auf eine Steigerung der Energieeffizienz (längere Reisezeiten, kürzere Revisionszeiten, Erhöhung der Dampfparameter, Erhöhung der Endüberhitzungstemperatur, Verringerung der Speisewassereintrittstemperatur etc.) ist es erforderlich, die Abzehrung der Wärmetauscherflächen so gering wie möglich zu halten. Hierfür ist es unumgänglich, geeignete Rohrwerkstoffe bzw. Schutzschichten für die jeweiligen Bauteile zu verwenden.

Die nachfolgenden Beispiele (anonymisiert) geben einen Überblick zur Anwendung der Werkstoffsonde in der Praxis.



Abb. 4: Werkstoffsonden, Oberflächenmorphologie verschiedener Schutzschichten (nach Abreinigung) in unterschiedlichen Temperaturbereichen, eingesetzt zwischen 1.000 und 1.700 h im Überhitzerbereich. Mit steigender Temperatur (von links nach rechts) nimmt der Korrosionsangriff zu.

### 6.1 Schutzschichten, Werkstofftests im Überhitzerbereich

Anwendungsbereich: Werkstoff (Schutzschichten)

Ziel: Abzehraten

Rauchgastemperatur: ca. 700 °C

Temperaturprofil auf der Sonde: ca. 350 – 500 °C

Das folgende Beispiel beschreibt mehrere Werkstofftests von Schutzschichten im Überhitzerbereich eines Müllheizkraftwerks. Ziel der Untersuchungen ist die Auswahl einer geeigneten Schutzschicht für den Endüberhitzer hinsichtlich einer geplanten Anhebung der Dampfparameter durch die Ermittlung von Abzehraten. Hierfür wird eine Versuchsreihe mit Werkstoffsonden aus verschiedenen Schutzschichten hinsichtlich ihres temperaturabhängigen Abzehrungsverhaltens durchgeführt. Die Werkstoffsonden werden nacheinander an jeweils der gleichen Position im Kessel eingebaut und für mehrere Wochen

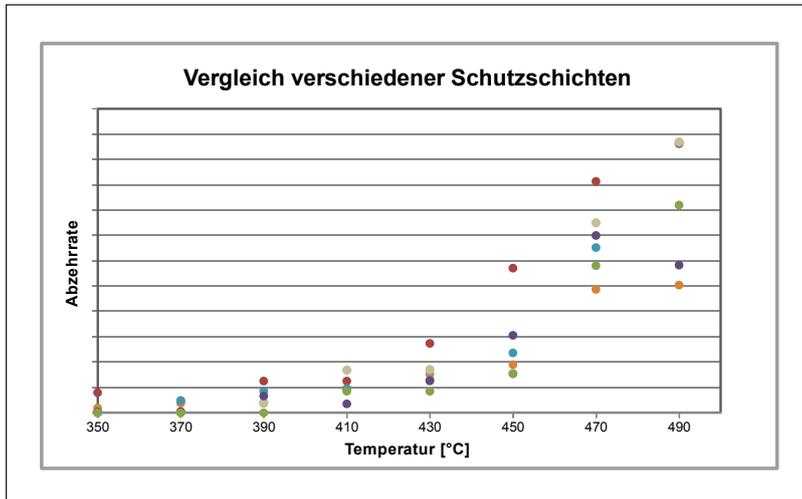


Bild 5: Diagramm des Abzehrungsverhaltens in Abhängigkeit der Mediumtemperatur für verschiedene Schutzschichten

unterschiedliche Ausschnitte (etwa 15 cm), in dem sich das Abzehrungsverhalten mit steigender Temperatur signifikant verändert.

An den gereinigten Sonden werden an den jeweiligen Temperaturpositionen Schichtdickenmessungen durchgeführt und mit Hilfe der gemessenen Nullschichtdicken Abzehrungen in Abhängigkeit der Temperatur berechnet. Abbildung 5 zeigt einen Vergleich (qualitativ) verschiedener Schutzschichten hinsichtlich ihres Abzehrungsverhaltens in Abhängigkeit der Mediumtemperatur.

Sowohl die Darstellung der Oberflächenmorphologie als auch der Vergleich der Abzehrungen machen deutlich, dass die verglichenen Schutzschichten in Abhängigkeit der Einsatztemperatur ein unterschiedliches Abzehrungsverhalten aufweisen.

Anhand der gewonnenen Daten kann nun abschließend eine geeignete Schutzschicht entsprechend der Bedürfnisse (Temperatur, Reisezeit, Revisionszeit, Kosten, etc.) ausgewählt werden.

Zur Bestätigung der ermittelten Abzehrungen wurde auch eine Werkstoffsonde mit der aktuell im Endüberhitzer verwendeten Schutzschicht eingesetzt. Die Ergebnisse dieser Sonde stimmen mit den Abzehrungsbefunden am Endüberhitzer überein.

## 6.2 Schwarzer Stahl, Korrosionstest im Überhitzerbereich

Anwendungsbereich: Korrosion

Ziel: Korrosionsmechanismus und –ursache, Temperaturschwellen

Rauchgastemperatur: bis max. 600 °C

Temperaturprofil auf der Sonde: ca. 340 – 480 °C

Das erste Beispiel beschreibt den Einsatz einer Sonde aus molybdänhaltigem Stahl, die in einer Müllverbrennungsanlage eingesetzt wurde. Ziel des Einsatzes der Korrosionssonde war eine Machbarkeitsüberprüfung bzgl. einer Dampftemperaturanhebung im Endüberhitzer von 400 auf 420 °C, ergänzend dazu sollte das Korrosionsverhalten oberhalb 420 °C abgeschätzt werden. Dementsprechend wurde die Sonde im Umfeld des Endüberhitzers eingebaut. Die Rauchgastemperatur liegt an dieser Position bei max. 600 °C. Das Temperaturprofil der Sonde wurde auf 340 bis 480 °C eingestellt. Nach einer Betriebszeit der Sonde von etwa 5 Wochen (ca. 840 h) wurden zunächst die Beläge dokumentiert und gesichert. Zwei Rohrsegmente wurden präpariert und den entsprechenden Temperaturen (aktuelle Endüberhitzungstemperatur 400 °C und angestrebte Endüberhitzungstemperatur 420 °C) zugeordnet. Diese wurden anschließend licht- und raster-elektronenmikroskopisch hinsichtlich des Korrosionsangriffs untersucht. Ergänzend dazu wurden

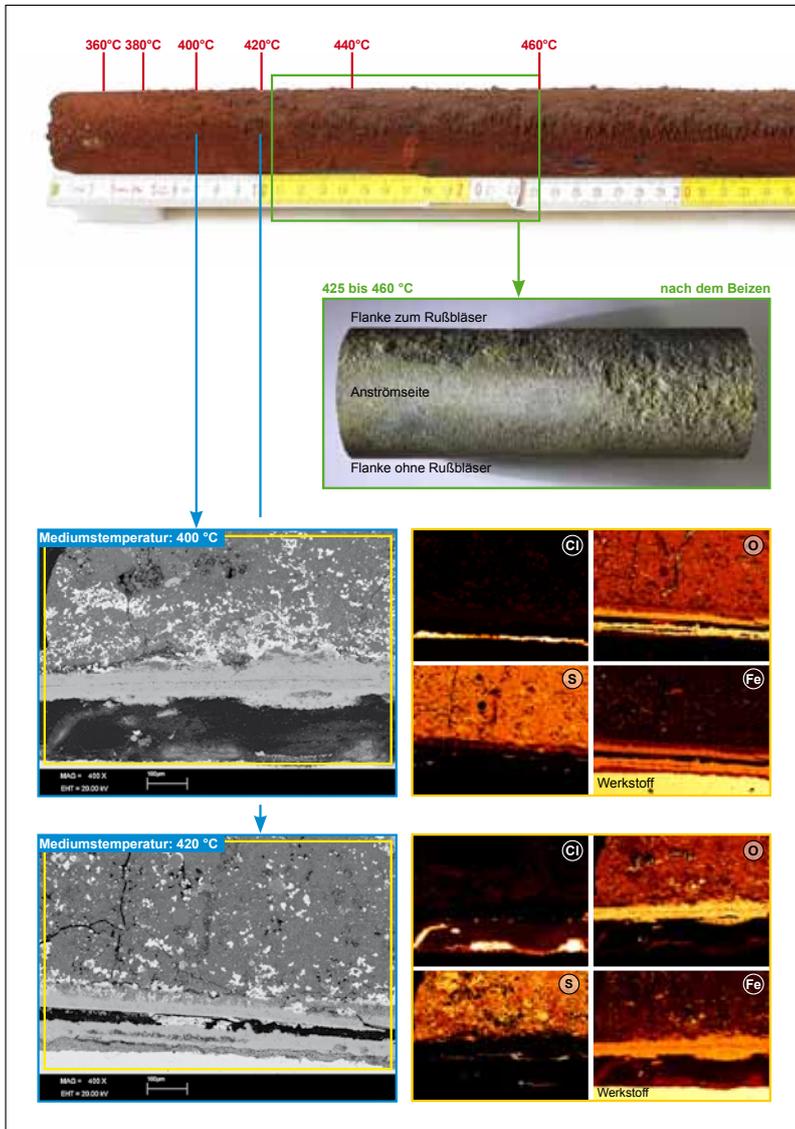


Bild 6: Korrosionssonde, hergestellt aus einem molybdänhaltigen Kesselstahl, eingesetzt für ca. 840 h im Überhitzerbereich. Die Abbildung zeigt im oberen Bereich die Sonde mit Belag (mit zunehmender Temperatur nimmt die Belagsdicke zu). Darunter ist ein abgereinigter Rohrabchnitt aus dem Temperaturbereich von 425 bis 460 °C zu erkennen. Im unteren Bereich ist für die 400 °C und 420 °C – Positionen jeweils der Korrosionsangriff mithilfe der Befunde aus der REM-Untersuchung dargestellt.

zur Dokumentation der Oberflächenmorphologie einzelne Rohrabchnitte (Temperaturbereiche) gereinigt und gebeizt.

Der Untersuchungsumfang ist in Abbildung 5 dargestellt.

Mithilfe des rasterelektronischen Befundes war es möglich, eine Aussage zur Veränderung des Korrosionsangriffs zu treffen. An der 420 °C – Position findet sich über der massiven Chloranreicherung an der Korrosionsfront zusätzlich eine Sulfidschicht. Dies ist ein Hinweis auf ein stark sauerstoffreduziertes Milieu, welches in diesem Ausmaß an der 400 °C – Position nicht dokumentiert werden konnte.

Die gebeizten Rohrabchnitte ermöglichen zusätzlich den optischen Befund in Abhängigkeit der Rauchgasanströmung. An den Flanken ergibt sich ein vorausschreitender Korrosionsangriff (besonders im Bereich des Rußbläfers). Ab ca. 450 °C nimmt die Korrosion auch an der Anströmseite massiv zu.

### 6.3 Schwarzer Stahl, Korrosionstest am kalten Ende

Anwendungsbereich: Korrosion

Ziel: Temperaturschwelle für Deliqueszenz- und Taupunktkorrosion

Rauchgastemperatur: ca. 260 – 290 °C

Temperaturprofil auf der Sonde: ca. 80 – 130 °C

Folgendes Beispiel stammt aus einer Versuchsdurchführung an einem Gaskraftwerk im Bereich des Economizers. Hintergrund der Untersuchungen waren lokale, temperaturabhängige Abzehrungserscheinungen am kalten Ende des Gaskraftwerks. Zur Ermittlung der Temperaturschwellen (Deliqueszenz- und Taupunktkorrosion) und der Korrosionsursache wurden bei unterschiedlichen Brennstoffzusammensetzungen Sonden im Bereich des Economizers installiert. Die Rauchgastemperatur an der Einbauposition beträgt zwischen 260 und 290 °C. Das Temperaturprofil der Sonden wurde auf 80 – 130 °C eingestellt.

Im Rahmen der Untersuchung wurden mehrere Kurzzeitsonden (etwa ½ Tag) für unterschiedliche Brennstoffzusammensetzungen eingesetzt. Zusätzlich wurde eine Sonde über einen längeren Zeitraum (etwa dreieinhalb Monate) betrieben um einen repräsentativen Kesselbetrieb (Brennstoff- und Lastwechsel) abzubilden.

Abbildung 7 zeigt exemplarisch eine eingesetzte Kurzzeitsonde. Zur Ermittlung der Korrosionsursache und des Korrosionsmechanismus wurden an der Kurzzeitsonde analytische Untersuchungen (Lichtmikroskop und REM) an der 83 °C Temperaturposition vorgenommen. Die Untersuchungen zeigen, dass Ammoniumchlorid am Korrosionsangriff beteiligt ist.

## 6.4 Schwarzer Stahl, Korrosionstest am Kamin

Anwendungsbereich: Korrosion

Ziel: Temperaturschwelle für Deliqueszenz- und Taupunktkorrosion

Rauchgastemperatur: ca. 140 °C

Temperaturprofil auf der Sonde: ca. 70 – 130 °C

In einem Müllheizkraftwerk wird zur Steigerung der Energieeffizienz die Absenkung der Abgastemperatur im Bereich des Kamins angestrebt. Hierzu sollte mittels Korrosionssonden die Schwellentemperatur für Korrosionsangriff ermittelt werden. Für die Versuchsdurchführung wurden

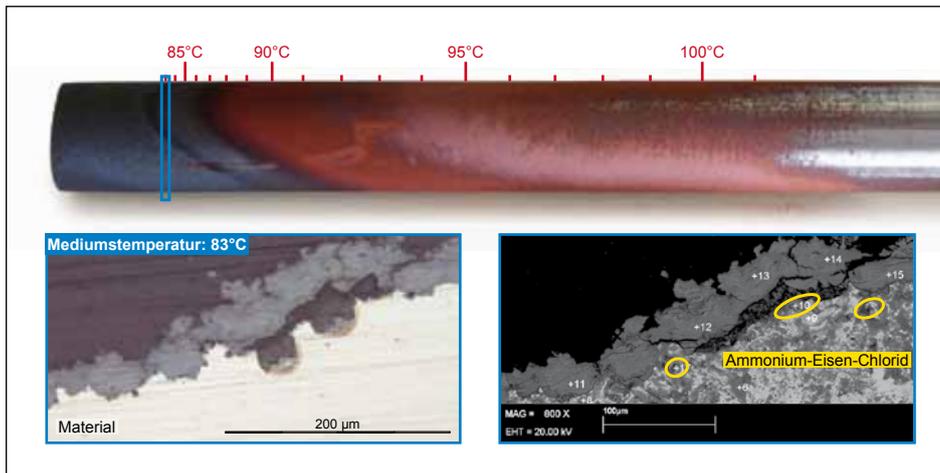


Bild 7: Korrosionssonde zur Taupunktbestimmung (optischer Befund, Lichtmikroskopie und Mikroanalytik), eingesetzt für ca. 15 h am kalten Ende.

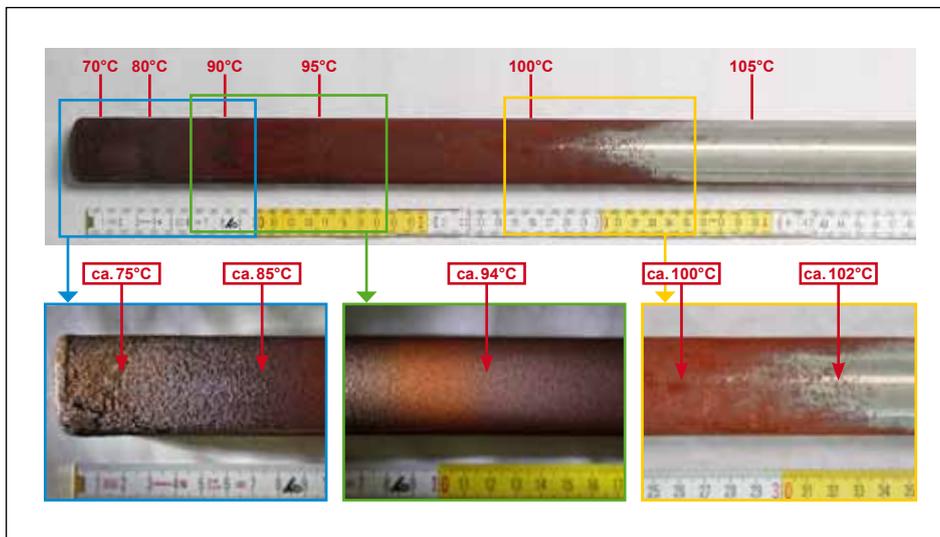


Bild 8: Korrosionssonde zur Taupunktbestimmung (optischer Befund), eingesetzt für ca. 350 h am Kamin.

nacheinander zwei Korrosionssonden am Kamin im Reingas bei einer Rauchgastemperatur von etwa 140 °C eingesetzt. Das Temperaturprofil der Sonden wurde zwischen 70 und 130 °C eingestellt. Die Sonden wurden jeweils etwa 2 Wochen betrieben.

Das Bild 8 zeigt exemplarisch eine der beiden eingesetzten Korrosionssonden mit Bildausschnitten an verschiedenen Temperaturpositionen. Der Angriff der Oberfläche verändert sich über die Sondenlänge, mit steigender Temperatur nimmt der Korrosionsangriff ab. Im vorderen Bereich zeigt sich starker Korrosionsangriff mit Muldenbildung. Ab ca. 94 °C geht der muldenförmige Korrosionsangriff in flächige Abzehrung mit einer rauen Oberfläche über. Ab etwa 100°C geht der korrosive Angriff zurück und ab ca. 102 °C ist kaum mehr korrosiver Angriff vorhanden.

## 7 Zusammenfassung

Die Verfügbarkeit von Kraftwerken und somit auch deren Energieeffizienz wird häufig durch die Abzehrung der Wärmetauscherflächen begrenzt. Um diesen Effekt möglichst gering zu halten, gilt es, für die belasteten Bauteile den geeigneten Werkstoff bzw. die geeignete Schutzschicht anzuwenden. Aufgrund unterschiedlicher Einflüsse (Brennstoff, Feuerung, Dampfparameter etc.) ist eine Übertragbarkeit von Befunden nur eingeschränkt möglich.

Mittels der Werkstoffsonde (Temperature-Range-Probe) ist es möglich, Werkstoffe und Schutz-

schichten an der jeweiligen Einbauposition hinsichtlich ihrer Wirksamkeit zu testen. Im Gegensatz zu Testfeldern kann die Werkstoffsonde im laufenden Betrieb unabhängig von Stillständen ein- und ausgebaut werden und ermöglicht somit eine Befunderhebung unabhängig von Kesselstillständen und somit in der Regel in wesentlich kürzeren Zeitintervallen. Durch die Abbildung eines frei eingestellten Temperaturbereiches auf der Sonde können Aussagen zum Werkstoffverhalten bei verschiedenen Temperaturen (Temperaturschwellen) unter den gegebenen Bedingungen getroffen werden. Damit sind Aussagen möglich, bis zu welchen Betriebstemperaturen (Satttdampf, Frischdampf) der jeweilige Werkstoff am jeweiligen Bauteil (Belastung durch Rauchgas, also Temperatur, Geschwindigkeit und Partikelfracht) in der jeweiligen Anlage (Brennstoff; Verfahrenstechnik) geeignet ist. Dies ist eine wesentliche Information auf dem Weg zur Steigerung der Energieeffizienz mittels Erhöhung des Wirkungsgrades.

## Literatur

- [1] Spiegel, W.; Herzog, T.; Magel, G.; Müller, W.; Schmidl, W.: Dynamische chlorinduzierte Hochtemperaturkorrosion von Verdampfer- und Überhitzerbauteilen aufgrund spezieller Belagsentwicklungen – Häufiger Befund in Abfall- und Biomasse-gefeuerten Dampferzeugern. In: VGB PowerTec 1/2 2005, S. 89-97. Verfügbar unter [www.chemin.de](http://www.chemin.de)
- [2] Spiegel, W.; Herzog, Th.; Jordan, R.; Magel, M.; Müller, W.; Schmidl, W. & Albert, F.W.: (2013): Korrosion in Abfallverbrennungsanlagen. In: Born, M. (Hrsg.): Dampferzeugerkorrosion 2013, Freiberg: SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH, 2013, S. 9-95.
- [3] Herzog, T., Spiegel, W., Müller, W., Brell, J., Molitor, D. und Schneider, D.: Corrosion caused by Dew Point and Deliquescent Salts in the Boiler and the Flue Gas Cleaning in: Thomé-Kozmiensky, K.J. und Thiel, S. (Hrsg.): Waste Management, Volume 3, Recycling and Recovery, Neuruppin: TK Verlag, 2012, p. 343-358.
- [4] Herzog, T., Spiegel, W., Müller, W., Brell, J., Molitor, D. und 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.
- [5] Müller, W.; Kaiser, M.; Schneider, D.; Herzog, Th.; Magel, G. & Spiegel, W.: Korrosion in alt holzgefeuerten Biomasseanlagen in: Thomé-Kozmiensky, K. J. und Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 10. Neuruppin: TK Verlag, 2013, S. 359-377.
- [6] Müller, W., Schneider, D., Kaiser M., Brell, J., Dr. Spiegel, W. & Pohl, M.: Creating Fuel Leaflets for the prevention of negative impact on the boiler from minor fuel components. VGB PowerTech, Ausgabe 07/14, S. 76 bis 81.
- [7] Müller, W. und Spiegel, W.: Brennstoff-Beipackzettel: Frühzeitiges Erkennen von negativen Auswirkungen der Nebenkomponenten in Brennstoffen in: VGB-Workshop Dampferzeuger, Wirbelschichtfeuerungen, Industrie- und Heizkraftwerke, Weimar, Tagung vom 26. und 27.03.2014.
- [8] Herzog, Th. & Metschke, J.: Cladding(ge)schichten – Erfahrungen als Grundlage für Qualitätsanforderungen in: Thomé-Kozmiensky, K. J. und Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall. Band 6. Neuruppin: TK Verlag, 2009, S. 505-516.
- [9] Schmidl, W.: Erfahrungen mit thermisch gespritzten Schichten als Korrosionsschutz auf Wärmetauscherflächen in reststoffbefeuerten Dampferzeugern. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. und Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall. Band 6. Neuruppin: TK Verlag, 2009, S. 593-610.
- [10] Spiegel, W., Magel, G., Herzog, T., Müller, W. und Schmidl, W.: Systematische Optimierung von Kesselbauteilen bei Korrosions- und Verschmutzungsbelastungen in: Thomé-Kozmiensky, K.J., und Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 11, Neuruppin: TK Verlag, 2014, S. 497-515.
- [11] Spiegel, W., Schneider, D., Kaiser, M., Molitor, D., Brell, J., Kuttner, T.: Korrosionsschutz und Werkstoffwahl in Abfallverbrennungsanlagen, Ersatzbrennstoff-Kraftwerken und Biomasseanlagen in: Thomé-Kozmiensky, K.J., und Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 12, Neuruppin: TK Verlag, 2015, S. 223-240.

- [12]** Magel, G., Müller, W., Spiegel, W., Schmidl, W., Herzog, F., Alessio, H.-P.: Korrosivität von Rauchgasen: Online-Sensorik in Dampferzeugern in: VGB PowerTech, Ausgabe 06/13, S. 71 bis 77.