

Spiegel, W.; Magel, G.; Herzog, T.; Müller, W.; Schmidl, W. (2014):

**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

Systematische Optimierung von Kesselbauteilen bei Korrosions- und Verschmutzungsbelastungen

W. Spiegel, G. Magel, T. Herzog, W. Müller, W. Schmidl

Zusammenfassung:

Das Ziel der Betreiber von Kesselanlagen mit schwierigen Brennstoffen ist es, in vielen Fällen unveränderbare Randbedingungen technisch zu kompensieren, so dass die gesamte Anlage betriebswirtschaftliche Vorteile ausschöpfen kann. Dies können verlängerte Reisezeiten, eine höhere Verfügbarkeit oder eine bessere Energieeffizienz sein. Der klassische Weg zu einer Optimierung ist ein Beobachten von Reisezeit zu Reisezeit in den Revisionsstillständen. Bei gleichzeitigem Wunsch die Reisezeiten zu verlängern und Revisionszeiten zu verkürzen bleiben die Erkenntniswege zusehends auf der Strecke. Dieser Beitrag führt Methoden auf, mit denen wichtige Fakten auf kürzerem Weg erarbeitet werden können und so eine technische Entscheidungshilfe zum möglichen Optimierungspotenzial erarbeitet wird.

1. Belastete Bauteile gezielt optimieren

Neben den kurzfristigen und akuten Maßnahmen zur Erkennung und Behebung von Problemen durch Korrosion und Verschmutzung in Dampferzeugern und Rauchgasreinigungen sind auch systematische Maßnahmen verbreitet, die durch eine Phase der Vorplanung gekennzeichnet sind und sich auf einer umfangreicheren Befunderhebung abstützen.

Probleme an einzelnen oder mehreren Bauteilen (Verdampfer, Überhitzer, Economiser etc.) lassen sich durch ein Paket von systematischen Maßnahmen meist besser und auch längerfristig in den Griff bekommen, als es im Rahmen von kurzfristigem Reagieren möglich ist. CheMin unterstützt diese systematischen Maßnahmen durch Stillstandsbegleitungen und Untersuchungen während des Betriebs und verfolgt dabei das Ziel, das Optimierungsinteresse des Betreibers so mit Fakten zu untermauern, dass die dann gewählte technische Optimierung den Erwartungen gerecht wird.

Der Bedarf für diese systematische Strategie ergibt sich typischerweise, wenn der Betrieb einer MVA, EBS- oder Biomasseanlage feststellt, dass regelmäßig ein oder mehrere Bauteile, z.B. der Endüberhitzer, der obere Teil des 1. Zuges oder der Feuerraum, im Betriebsverhalten und/oder im Instandhaltungsaufwand auffallend nachteilig sind, und der Nachteil durch eine technische Optimierung verbessert werden kann, und dass der zu diesem Ziel führende notwendige Investitionsaufwand sich zügig amortisiert.

Das Ziel des Betreibers ist, den Betrieb soweit zu optimieren, dass die gesamte Anlage betriebswirtschaftliche Vorteile ausschöpfen kann. Dies kann z.B. eine verlängerte Reisezeit sein, oder eine höhere Verfügbarkeit oder eine bessere Energieeffizienz.

Das nachfolgend aufgezeigte systematische Vorgehen beschreibt beispielhaft einen Weg zur Optimierung, der die langjährigen Erfahrungen der Autoren aus Schadensuntersuchungen und Revisionsbegleitungen einbezieht.

Die Ursachen und Mechanismen der durch komplexe chemische Wechselwirkungen getriebenen Prozesse von Korrosion und Verschmutzung lassen kaum eine Übertragbarkeit von Lösungen von einer Anlage auf eine andere Anlage zu. Es ist immer eine Einzelfallbewertung notwendig. Und es sollten auch in jedem Optimierungsfall konkrete Befunde an der jeweiligen Anlage erhoben werden, um die beste Lösung für das zu ertüchtigende Bauteil zu finden. Die dafür sinnvollen Schritte und möglichen Methoden werden nachfolgend dargestellt. Im Einzelfall können auch ergänzende Schritte notwendig sein.

Die einzelnen Methoden, die CheMin zur Ermittlung konkreter Befunde bezüglich der komplexen chemischen Prozesse, die zu Korrosion und Verschmutzung führen, einsetzt, bauen aufeinander auf. Die Durchführbarkeit der bewertenden Methoden, u.a. online-Sensorik, ist aber an Voraussetzungen geknüpft (z.B. Öffnungen im Kessel an geeigneter Position). Um diese Voraussetzungen und das Ineinandergreifen der Methoden optimal zu ermöglichen, ist ein bestimmter zeitlicher Ablauf erforderlich, der die sechs wesentli-

chen Schritte einer systematischen Optimierung richtig aufeinander abstimmt. Diese Schritte sind:

- (1) Zustandsbewertung,
- (2) Erkennen der Ursachen und Mechanismen der Korrosion/Verschmutzung,
- (3) Test von Schutzschichten (keramisch, metallisch, geschweißt, gespritzt etc.),
- (4) Test von alternativen Betriebsweisen,
- (5) Vorlauf für die Realisierung der Maßnahmen und
- (6) Qualitätsoptimierende Begleitung während der Realisierung der Maßnahmen

Die Bedürfnisse dieses Zeitplans lassen sich am besten realisieren, wenn für jeden der sechs Schritte ein bestimmter Zeitpunkt im Betriebsablauf gewählt wird, also folgendes Zeitschema eingehalten wird:

- (0) Vorbereitung für die Zustandsbewertung:
Im letzten Drittel der Reisezeit A
- (1) Zustandsbewertung:
Am Beginn der Revision nach Reisezeit A
- (2) Erkennen der Ursachen und Mechanismen der Korrosion/Verschmutzung:
Im ersten Viertel der nachfolgenden Reisezeit B
- (3) Test von Schutzschichten:
Im zweiten Viertel der Reisezeit B
- (4) Test von alternativen Betriebsweisen:
Im zweiten Viertel der Reisezeit B
- (5) Vorlauf für die Realisierung der Maßnahmen:
In der zweiten Hälfte der Reisezeit B
- (6) Qualitätsoptimierende Begleitung:
Während der Revision nach Reisezeit B

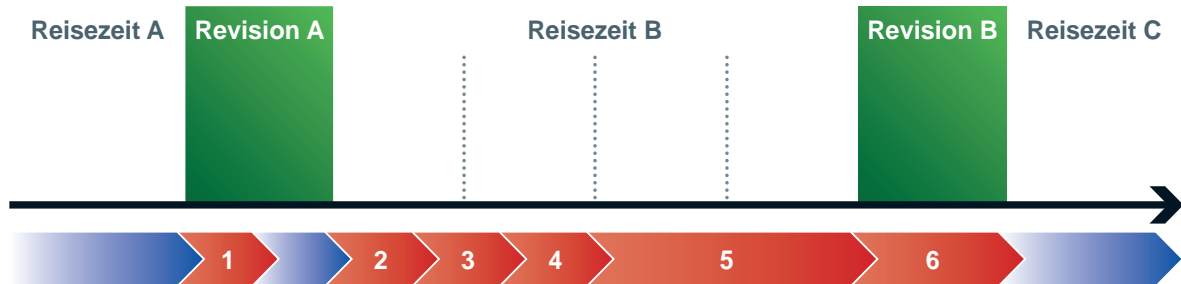


Bild 1: Systematisches Vorgehen bei der Optimierung eines Bauteils. In den rot dargestellten Zeiträumen sind folgende Schritte durchzuführen: 1 Zustandsbewertung im verschmutzten und gereinigten Zustand, 2 Erkennen der Ursachen und Mechanismen für die Korrosion bzw. Verschmutzung, 3 Test von Schutzschichten (mittels Werkstoffsonden), 4 Test von alternativen Betriebsweisen, 5 Vorlauf für die Realisierung der Maßnahmen, 6 Qualitätsoptimierende Begleitung während der Realisierung der Maßnahmen.

Abbildung 1 zeigt einen typischen Fahrplan für eine Bauteiloptimierung. Die Maßnahmen verteilen sich somit auf die Zeit von eineinhalb Reisezeiten und zwei Revisionen.

Die einzelnen zum Einsatz kommenden Methoden entstammen der gutachterlichen und beratenden Tätigkeit von CheMin und sind langjährig erprobt (z.B. Artikel der AVA Augsburg in diesem Buch). Die grundlegenden Zusammenhänge wurden in den Tagungsbänden der zurückliegenden Jahre ausführlich beschrieben [1, 2, 3, 4, 5, 6].

1.1 Zustandsbewertung während einer Revision

Das mit Problemen behaftete Bauteil liefert am Ende einer Reisezeit wichtige Informationen. Nach dem Abfahren und Einrüsten können Art, Umfang und Verteilung von Korrosion und Verschmutzung beurteilt werden (vgl. Abbildungen 2 bis 5). Eine grundlegende Einstufung der Probleme kann erfolgen. Die erfahrenen Experten begehen das Bauteil und erstellen zunächst eine optische Bewertung und Dokumentation der Phänomene. Proben werden je nach Befund genommen und ggf. analysiert. Damit können z.B. die zukünftigen Anforderungen an Schutzschichten (keramisch, auftragsgeschweißt, thermisch gespritzt etc.) oder die Zusammenhänge von Rauchgasstrom und Belagsbildung besser bewertet werden.



Bild 2: Optische Bewertung der Verschmutzungsverteilung in den verschiedenen Bauteilen, a Brennkammer, b Nachbrennkammer, c Membranwände, d Überhitzer



Bild 3: Optische Bewertung der Werkstoffoberflächen im verschmutzten Zustand; die Dicke bzw. die Verteilung der Korrosionsbeläge geben Hinweise auf die Orte mit erhöhtem korrosiven Angriff

Die Gefahr von Verfügbarkeitsdefiziten durch ungeplante Stillstände mindern. Zu diesem Vorgehen wurde auch in [1, 7] berichtet.

Die Bewertung der Werkstoffe im verschmutzten und gereinigten Zustand ist somit der Einstieg in die Einordnung der spezifischen Belastungen des zu betrachtenden Bauteils. Dieser Schritt ist nur zu Beginn einer Revision bzw. eines Stillstandes mit Einrüstung durchführbar. Deshalb müssen die vorbereitenden, planenden Maßnahmen bereits im letzten Drittel der vorhergehenden Reisezeit beginnen.

Eine analoge Bewertung der Phänomene erfolgt anschließend im abgereinigten Zustand. Auch in diesem Zustand wird das Bauteil durch die Experten begangen und durch Einsatz von streifendem Licht werden die Abzehrungen bewertet und durch selektive Messungen der Restdicken von drucktragenden Werkstoffen und Schutzschichten sowie weiteren Prüfungsmethoden (z. B. Verbund des Mauerwerks) wird der Status der Belastung und die verbleibende Restnutzungsdauer der verschiedenen Werkstoffe festgestellt (vgl. Abbildung 6).

Je nach Befundlage ist auch über eine zerstörende Beprobung von Schutzschichten (z.B. Feuerfest), Halterungen oder Rohrwerkstoffen etc. zu entscheiden. Diese Proben können im Labor weiter untersucht und u.U. auch im Detail, z.B. an der Korrosionsfront, chemisch analysiert werden.

Oftmals ist es zudem hilfreich, dass die Experten neben dem zu betrachtenden Bauteil auch die übrigen Teile des Kessels begehen, zumindest im groben Überblick, um das generelle Verschmutzungsverhalten oder andere lokal von Korrosion betroffene Bauteile zu bewerten. Auch dies sollte sowohl im verschmutzten wie im gereinigten Zustand erfolgen. Dies erlaubt Rückschlüsse auf das Zusammenwirken von Brennstoff, Feuerung und Wärmeabbau und verweist damit auf betriebliche Optimierungspotentiale. Zudem können auf diese Weise die Anforderungen an eine vorausschauende Instandhaltung unterstützt werden, da die Experten mittels streifendem Licht und selektiven Messungen von Schicht- und Wanddicken auch das Auffinden von bisher nicht erkannten Problembereichen unterstützen können. Dies kann die Gefahr von Verfügbarkeitsdefiziten durch ungeplante Stillstände mindern. Zu diesem Vorgehen wurde auch in [1, 7] berichtet.



Bild 4: Bei einem Spalt im Wandaufbau der Feuerfestzustellung, z. B. durch mangelnden Verbund von Platten mit der Membranwand, kann hinter den Platten intensive Korrosion der Membranwand stattfinden.



Bild 5: Optische Bewertung der Werkstoffoberflächen im verschmutzten Zustand: a) dickere Korrosionsbeläge zeigen verstärkt korrosive Angriffe; b) anhand von Belagsuntersuchungen können die korrosiv wirkenden Phasen an der Korrosionsfront sowie die Korrosionsprodukte untersucht werden: c) unmittelbar an der Korrosionsfront ist in diesem Beispiel eine massive Eisenchlorid-schicht zu erkennen, gefolgt von Eisensulfid sowie Salzen und Eisenoxiden.

1.2 Erkennen der Ursachen und Mechanismen der Korrosion bzw. Verschmutzung mittels Sonden und Sensoren während des laufenden Betriebs

Um die Ursachen und Mechanismen von Korrosion/Verschmutzung erkennen zu können, muss der laufende Betrieb betrachtet werden, am besten in einem stationären Zustand. Das ist bei einem Kessel mit Grundverschmutzung und bei typischer Last und typischem Brennstoff gegeben. Im Zuge von Begehungen während Stillständen ist dies nicht möglich, da in den abreagierten und erkalteten Belägen diese Informationen nicht mehr verfügbar sind.

Die Ursachen und Mechanismen von Korrosion/Verschmutzung liegen zugleich in den chemischen, thermischen und auch mechanischen Einflüssen auf das Bauteil. Die im Rauchgas enthaltene Chemie, die Temperaturunterschiede, Temperaturgradienten und Temperaturschwankungen in den Medien und in den Werkstoffen und die Impulswirkung strömender bzw. schlagender Medien (u.a. Abreinigung) ist eine Gesamtheit an Wirkung auf das Bauteil, die nicht in Teilbetrachtungen zerlegt werden kann. Somit ist es zwingend, dass Ursachen und Mechanismen von Korrosion/Verschmutzung während und innerhalb des Prozesses ermittelt werden.

CheMin wählt für diesen Zweck - je nach Zielstellung und zu betrachtendem Bauteil - aus verschiedenen, auf spezifische Fragestellungen hin spezialisierten Sonden und Sensoren aus. Dies sind:

- CheMin-Gittersonde, in Kombination mit einer Bestimmung des chemischen Milieus im Rauchgas (ASP-Methode) [5, 8, 9, 10].
Gittersonde und ASP-Methode beschreiben das chemische Inventar, d.h. der Kessel wird wie ein chemischer Reaktor betrachtet.
- CheMin-Korrosionssonde (bisher als Korrosionsmonitor bezeichnet) [10].
Die Korrosionssonde ist baugleich zu der in Kapitel 1.3 beschriebenen Werkstoffsonde.
- CheMin-Taupunktsonde (bei Bauteilen am Kesselende oder in der Rauchgasreinigung) [10, 11, 12].
Die Taupunktsonde ist baugleich zur Werkstoffsonde.
- CheMin-Belagssonde (bisher als Belagsmonitor bezeichnet) [10, 12].
Die Belagssonde ist baugleich zur Werkstoffsonde.



Bild 6: Im gereinigten Zustand können die Werkstoffoberflächen mit streifendem Licht abgeleuchtet und die Messungen der Restdicken an den am stärksten angegriffenen Orten gemessen werden. Somit kann die Restnutzungsdauer der Werkstoffe bestimmt werden.

- CheMin-Wärmestromsensor [3, 4, 10].

Die Korrosionssonde, Taupunktsonde, Belagssonde und die im Kapitel 1.3 beschriebene Werkstoffsonde sind in wesentlichen Teilen baugleich und unterscheiden sich nur in Bezug auf das Untersuchungsziel. Je nach Zielsetzung für den Einsatz der Sonde können auf der Sonde Schutzschichten aufgebracht sein und längere oder kürzere Verweilzeiten im Kessel gewählt werden, von Stunden bis zu Monaten. Korrosionssonde, Taupunktsonde und Belagssonde weisen somit auch alle Merkmale auf, die in Kapitel 1.3 in Bezug auf die Werkstoffsonde beschrieben sind.

Die Anwendung der Sonden erfordert geeignete Öffnungen, die während einer Revision vorbereitet werden können. Auch die Installation von Wärmestromsensoren (auf der Kesselaußenseite) ist nur während einer Revision möglich. Die Revision als Start der Bauteiloptimierung ist also nicht nur aus Gründen der oben beschriebenen Zustandsbewertung notwendig, sondern auch, um vorbereitende Maßnahmen durchzuführen für den Einsatz von Sensoren und Sonden in der anschließenden Reisezeit.

Es ist in der Regel nicht zielführend, bereits aus anderen Gründen vorhandene Öffnungen für das Einbringen der Sonden zu verwenden, wenn das zu betrachtende Bauteil damit nicht geeignet abgebildet werden kann.

1.3 Test von Schutzwerkstoffen mittels Werkstoffsonde im laufenden Betrieb

Von Korrosion betroffene Bauteile werden in der Regel durch resistenteren Werkstoffe geschützt. Dies kann als Vollwerkstoff erfolgen oder als Schutzschicht. Alternativ bzw. ergänzend dazu besteht meist auch grundsätzlich die Möglichkeit, die Temperatur der Medien (Rauchgas und/oder Wasser/Dampf) zu reduzieren, um damit das Temperaturniveau und die Temperaturgradienten in den von Korrosion betroffenen Werkstoffen zu senken. Sinkende Rauchgastemperatur bedeutet in diesem Zusammenhang, die Wärmestromdichte zu reduzieren; vgl. dazu auch den Beitrag von Herzog et.al. in diesem Tagungsband.

Die Praxis zeigt, dass die Anwendung einer Schutzschicht oder die Absenkung der Rauchgas- oder Mediumtemperatur nicht zwangsläufig vorhersehbar (planbar) zu dem gewünschten Erfolg führt. Es bestehen im chemischen Inventar des Rauchgases zu viele Kombinationsmöglichkeiten für die Bildung aggressiver Milieus, als dass ein bestimmter Werkstoff oder eine bestimmte Schutzschicht bei einer bestimmten Temperatur dies sicher abdecken könnte; siehe hierzu auch den Beitrag von Aleßio in diesem Tagungsband.

Der Praxistest von möglicherweise wirksamen Schutzschichten unter den konkreten und spezifischen thermisch-chemischen Milieubedingungen ist deshalb unverzichtbar. Zugleich ist der Einfluss der Temperaturen zu berücksichtigen, u.a. deshalb, da Berührungsbauteile stets eine Temperaturspanne des Mediums von mehreren 10er bis über 100 K

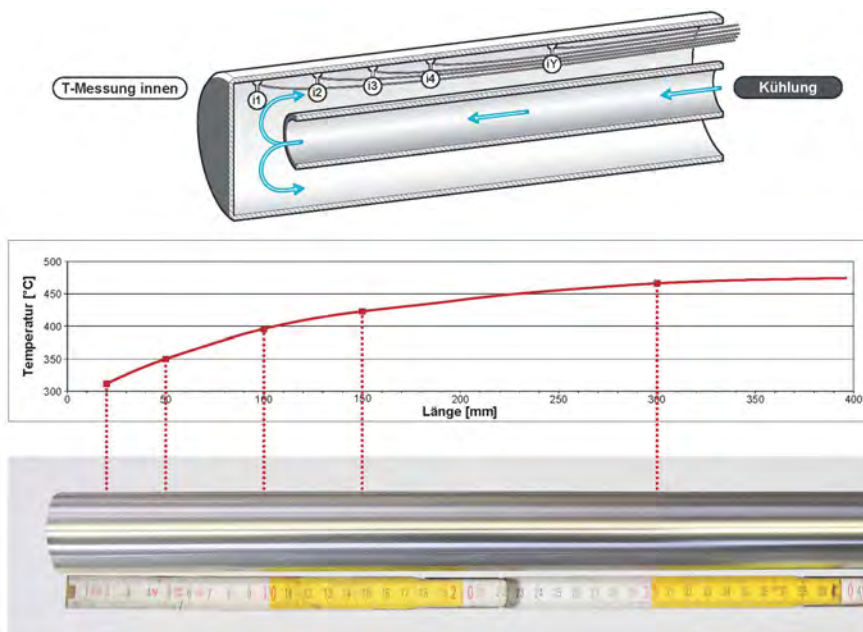


Bild 7: Die gekühlte CheMin-Sonde wird im laufenden Betrieb bei einer gewünschten Abgastemperatur im Dampferzeuger eingebaut. Durch die interne Kühlung und die Beheizung von außen stellt sich auf der Oberfläche der Sonde ein ansteigendes Temperaturprofil ein, das mit innen liegenden Temperaturfühlern erfasst und mit einer externen Regelung gleichbleibend gehalten wird.

aufweisen.

Diese Anforderungen an ein Testinstrument hat CheMin in Form einer neuartigen Werkstoffsonde umgesetzt und zum Patent angemeldet. Der innovative Charakter, also die besonderen Leistungsmerkmale dieser Werkstoffsonde ergeben sich durch folgende Eigenschaften (vgl. Abbildungen 7 bis 9):

- Der Körper der Werkstoffsonde ist in seinen Abmessungen ein reales Bauteil (Kesselrohr), ggf. mit Schutzschichten (auftragsgeschweißt, thermisch beschichtet; denkbar ist auch eine keramische Schutz-

schicht, z. B. als übergeschobene Hülle, als keramische Masse mit Ankeren bzw. Halterungen etc.). Die Schutzschichten können das aus der Fertigung kommende Produkt oder auch neuartige Werkstoffentwicklungen darstellen. Dieser Körper wird im laufenden Betrieb im Kessel an der gewünschten Position und Rauchgastemperatur eingebaut (Abbildung 9).

- Die Oberfläche des Sondenkörpers wird im vorderen Teil der Werkstoffsonde (z.B. 70 cm Länge) auf einen weitgehend frei wählbaren konstanten Temperaturbereich geregelt (z.B. von 250 bis 500°C), d.h. der für die Korrosion und die Funktionsmerkmale wichtige Parameter der „Werkstofftemperatur“ wird über einen breiten Temperaturbereich gleichzeitig erfasst (Abbildung 7).

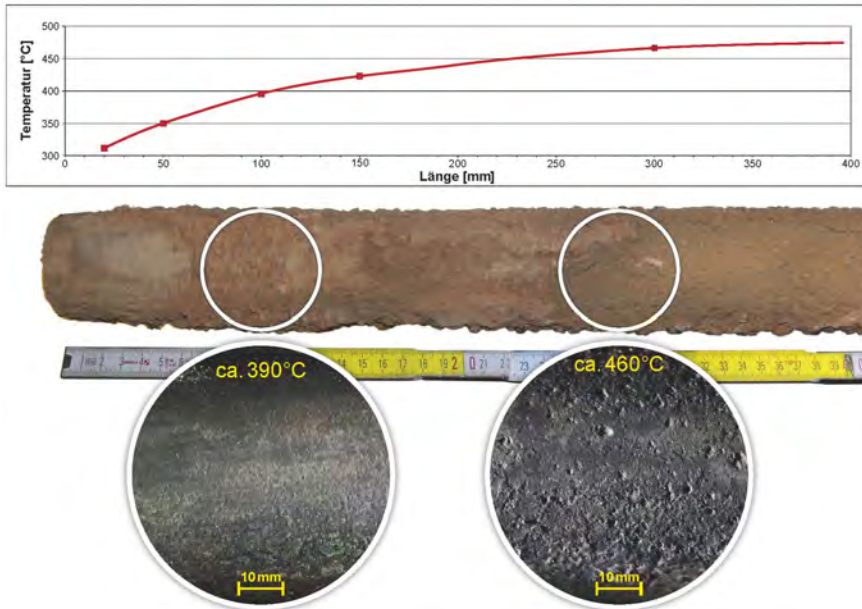


Bild 8: Im laufenden Betrieb bilden sich auf der Sondenoberfläche Beläge, die bei den gegebenen unterschiedlichen Werkstofftemperaturen korrosive Vorgänge auslösen können. Im Bild zeigt der spritzbeschichtete Werkstoff bei einer Oberflächentemperatur von 390°C kaum korrosiven Angriff (linkes Detailbild), während ab einer Oberflächentemperatur von 460°C verstärkt Korrosionsmulden auftreten (rechtes Detailbild).

- Durch Variation der Wanddicke der Werkstoffsonde kann die Wärmestromdichte zu höheren oder niedrigeren Werten angepasst werden. Der über die gesamte Werkstoffsonde ausgekoppelte Wärmestrom wird anhand der Kühllufttemperatur bilanziert. Kritische Temperaturschwellen in der Resistenzfähigkeit des Werkstoffs gegen die thermisch-chemischen Belastungen, die bei der gegebenen Rauchgastemperatur und Wärmestromdichte vorliegen, lassen sich mit dieser Methode ermitteln.

- Die Werkstoffsonde ist für ein weitgehend frei wählbares Zeitfenster (von Stunden bis zu Monaten) einsetzbar, d.h. bestimmte oder auch mehrere variable Betriebszustände können gezielt abgebildet werden. Die Werkstoffsonde kann jederzeit eingesetzt und wieder gezogen werden.

- Nach dem Ende der Expositionszeit kann die Korrosionsresistenz des getesteten Werkstoffs innerhalb des eingestellten Temperaturfensters direkt optisch abgelesen werden. Nach mehreren Tests können die jeweiligen Werkstoffsonden direkt miteinander verglichen und vermessen werden (Wanddicke, Schichtdicke, Position der Abzehrung, Typ der Abzehrung etc.), vgl. Abbildung 8.

- Die Werkstoffsonde kann – analog zu Schadensuntersuchungen – im Anschluss an die Expositionszeit im Labor zerlegt und ggf. mikroanalytisch untersucht werden, um Ursache, Art und Intensität der Korrosion (Abzehrung) zu erfassen.

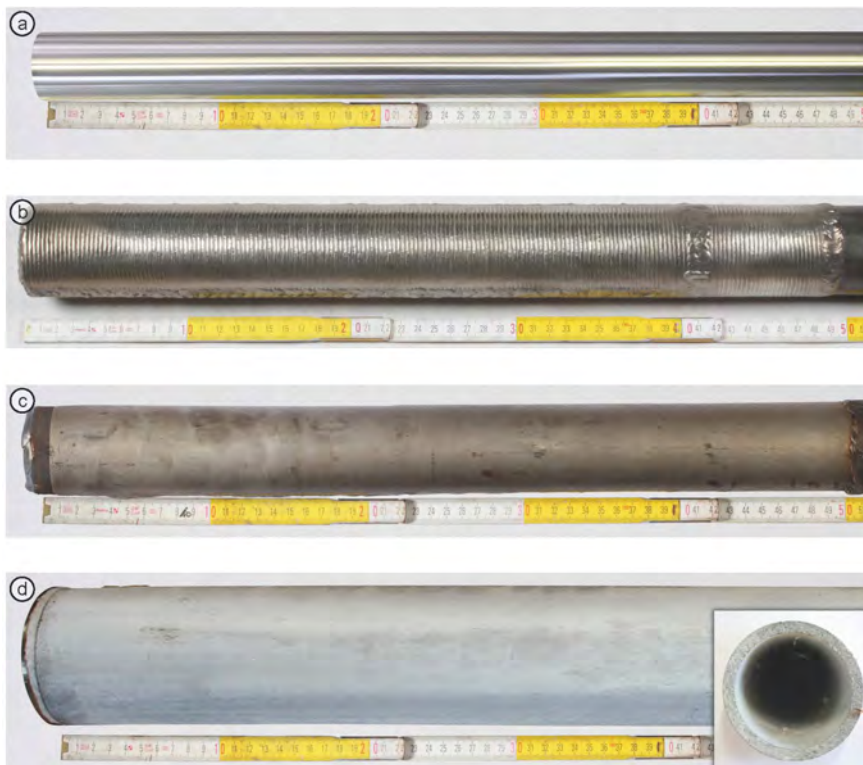


Bild 9: Die CheMin-Werkstoffsonden können aus verschiedenen Stählen aufgebaut (a) oder mit unterschiedlichen Schutzschichten versehen sein. Die Schutzschichten können u. a. durch Auftragsschweißung (b) oder Spritzbeschichtung (c) aufgetragen werden oder können aus keramischem Material bestehen.

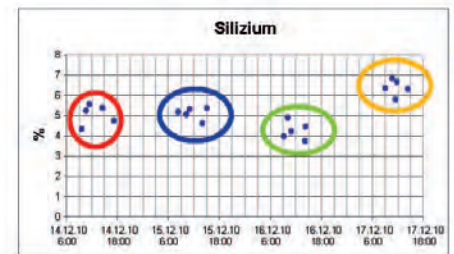
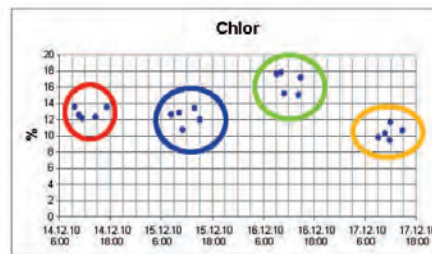
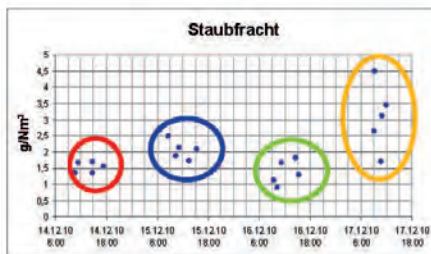
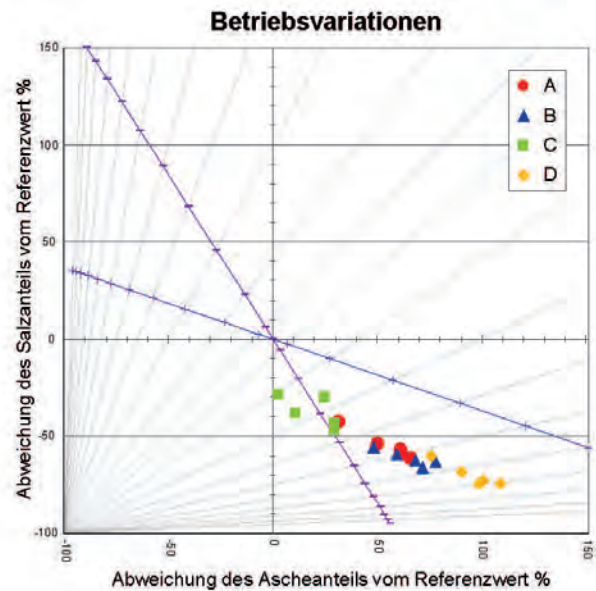
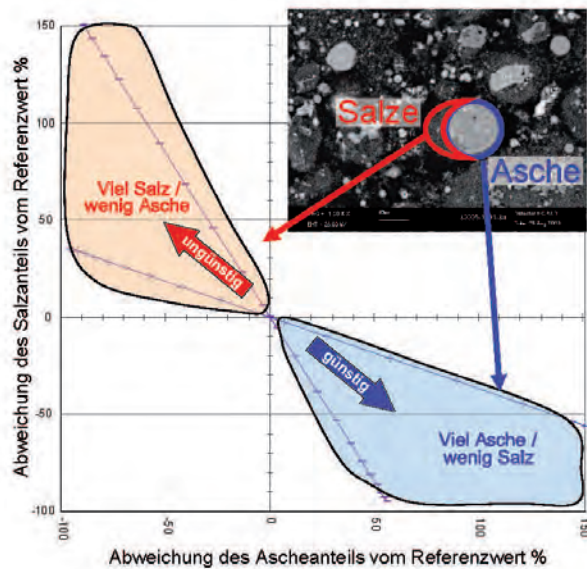


Bild 10: Die Probenahme der Abgaspartikel mittels ASP-Methode (Asche-Salz-Proportionen) kann bei unterschiedlichen Betriebsweisen erfolgen. Anhand der Staubfracht und der Elementanteile und des dadurch ermittelbaren Korrosionspotentials wird das thermisch-stoffliche Abgasinventar in Bezug zu den verschiedenen Betriebsvariationen gesetzt

1.4 Test von alternativen Betriebsweisen

Das chemische Inventar, das zu Korrosion und Verschmutzung führt, wird durch den Brennstoff und die Feuerung vorgegeben. Oftmals gibt es alternative Betriebsweisen in der Feuerführung oder bei der Auswahl oder Vorbehandlung der Brennstoffe (Mischung, Lagerung), die sich mildernd auf die Korrosion/Verschmutzung auswirken würden, die aber in diesem Zusammenhang ohne weitere Untersuchungen nicht zuverlässig prognostiziert werden können.

Um eine Prognose erstellen zu können, müssen die alternativen Betriebsweisen über einen bestimmten Zeitraum hergestellt werden (stationärer Zustand).

In dem Zeitraum des stationären Zustands ist ein bestimmtes chemisches Inventar im Rauchgas vorhanden, das bei unterschiedlichen Rauchgastemperaturen in den unterschiedlichen Bauteilen (gegebene Rauchgaseschwindigkeit, gegebene Wärmestromdichte) zu unterschiedlichen Effekten führt. Die Auswirkungen der verschiedenen Betriebsweisen auf die Werkstoffe der jeweiligen Bauteile kann mit den unter Kapitel 1.2 erwähnten sensorischen Hilfsmitteln überprüft werden. Eine Kombination mehrerer Methoden ist sinnvoll und je nach Fragestellung zu empfehlen.

Wird die Bewertung mittels Korrosionssonden, Belagsonden oder Taupunktsonden angestrebt, erfolgt dies nach dem in Kapitel 1.3 aufgeführten Prinzip (Oberfläche des Sondenkörpers wird auf ein frei wählbares Temperaturfenster geregelt und bei gegebener Rauchgastemperatur in den Rauchgasstrom gehalten, die bei unterschiedlicher Oberflächentemperatur abgelagerten Beläge können analysiert (Belagsonde) oder Temperaturschwellen für Korrosionsresistenz (Korrosionssonde, Taupunktsonde) ermittelt werden). Für diese Methoden ist ein stationärer Zustand über mehrere Tage erforderlich, abhängig davon, wie hoch die tatsächliche Belastung an den verschiedenen Werkstoffen ist.

Soll ein thermisch-stofflicher Zusammenhang aus Brennstoff, Feuerung und Rauchgasinventar ermittelt werden, kann auch die Gittersonde und/oder die ASP-Methode (Asche-Salz-Proportionen) zum Einsatz kommen

(vgl. Abbildung 10). Wird eine Bewertung mittels ASP-Methode und Gittersonde durchgeführt, wird das chemische Inventar des Rauchgases beprobt und zunächst und hauptsächlich in Bezug auf die Frachten und die Stoffspezies ausgewertet. Die Vorgehensweise und beispielhafte Befunde und Optimierungen sind in [13, 14] beschrieben. Die vergleichende Auswertung der Befunde aus mehreren Betriebsweisen zeigt anschließend auf, welche Betriebsweise eine Optimierung darstellt. Wird der Belastungszustand von verschiedenen Betriebsweisen mittels ASP und/oder Gittersonde bewertet, ist ein Zeitraum des stationären Zustands von mehreren Stunden erforderlich.

Die Auswirkungen der Fracht und Stoffspezies im Rauchgas auf die Korrosion und Verschmutzung sind stark abhängig von den jeweils gegebenen Temperaturen des Rauchgases und Oberflächentemperaturen der Wärmetauscher.

Aus den beiden Temperaturen und weiteren Einflüssen wie z.B. der Rauchgasgeschwindigkeit ergeben sich die Wärmestromdichten im Belag und im Werkstoff und die Kältefallenwirkung. Die Details dieser Zusammenhänge sind u.a. in [7] beschrieben.

Die Gittersonde wird auch für das Verfahren der Brennstoffdiagnose im Technikummaßstab verwendet und bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen in Großkraftwerken eingesetzt [5, 15, 16].

Das chemische Inventar im Rauchgas und die thermisch-stofflichen Zusammenhänge werden beispielsweise pro Betriebsvariation durch ASP und Gittersonde untersucht. Konkret bedeutet dies, dass während des Zeitraums des stationären Zustands einer Betriebsvariation diese Untersuchungen stattfinden. Durch Aneinanderreihung von Betriebsvariationen in der Form, dass z.B. am Abend die Änderung vorgenommen wird und während der Nacht sich ein stabiler Zustand entwickelt, kann dann während des folgenden Tages das Untersuchungsprogramm stattfinden. Damit lässt sich pro Tag eine Betriebsvariation untersuchen, d.h. innerhalb einer Kampagne von einigen Tagen lassen sich mehrere Betriebsvariationen unterbringen.

Begleitend zu den in Kapitel 1.2, 1.3 und 1.4 beschriebenen Maßnahmen ist es notwendig, auch die Betriebsdaten auszuwerten, um auf der Zeitskala den Charakter des Betriebs und Art und Intensität von Unstetigkeiten zu erfassen. Relevante Betriebsparameter sind in der Regel alle Temperaturen, alle Daten zur Chemie des Rauchgases (SO₂, HCl, Feuchte) und die Leistung (Last).

Aus Sicht des Betreibers ist es für das Ziel einer Bauteiloptimierung nicht notwendig, diese komplexen thermisch-stofflichen Zusammenhänge nachvollziehen zu können. Die notwendigen Voraussetzungen sind in den eingesetzten Untersuchungsmethoden bereits berücksichtigt. D.h. das Expertenwissen steckt in der Auswahl, Ausgestaltung und Anwendung der Untersuchungsmethoden. Erforderlich für den Einsatz aller Sonden sind geeignete Öffnungen am zu betrachtenden Bauteil, um die für dieses Bauteil relevanten thermisch-stofflichen Bedingungen und korrosiven Auswirkungen abbilden zu können. Diese Öffnungen sind während der Revision vorzubereiten.

1.5 Vorlauf für die Realisierung der Maßnahmen

Der Vor-Ort-Einsatz der Sonden sollte während der Reisezeit so rechtzeitig erfolgen, dass genügend Zeit bleibt, um in der restlichen Reisezeit die gesammelten Informationen auszuwerten und einen konkreten Optimierungsweg ausarbeiten zu können und auch den Lieferanten die notwendige Vorlaufzeit zugeben.

Zudem sollte ein Zeitpuffer eingeplant werden, damit ggf. weitere Werkstofftests oder weitere Betriebsvariationen durchgeführt werden können, sofern sich der Bedarf dafür ergibt.

Es empfiehlt sich, für diese Vorlaufphase zumindest das letzte Drittel einer Reisezeit einzuplanen, besser sogar die zweite Hälfte der Reisezeit.

1.6 Qualitätsoptimierende Begleitung während der Realisierung

Während der Realisierung einer Bauteiloptimierung kommt auch der Begleitung eine besondere Bedeutung zu, insbesondere bei der Beschichtung mit metallischen Werkstoffen und der Montage von keramischen Werkstoffen. Die marktüblichen QS-Maßnahmen fokussieren die Erfüllung von Spezifikationen und Normen und deren Dokumentation wird am Schluss dem Produkt beigelegt. Würde man dagegen die im Markt verfügbaren Erfahrungen während der Produktion beachten und begleitet diese im Sinne einer Qualitätsopt-

timierung (QO), dann kann das unter 1.1 bis 1.5 beschriebene Anforderungsprofil an die Schutzschicht für das konkrete Bauteil und dessen individuelle thermisch-chemische Belastung konkret berücksichtigt werden. Diese Anforderungen in die jeweils besonderen Qualitätsmerkmale einer Schutzschicht zu übertragen, ist für den Lieferanten der Schutzschicht nicht gelebter Alltag. Hier ist es sinnvoll, dass auch die Qualitätsoptimierung aus gleicher Hand erfolgt, wie die zuvor durchgeführten Untersuchungen. Zu den hier relevanten Themen hat CheMin mehrere Beiträge veröffentlicht, insbesondere zu auftragsgeschweißten und thermisch gespritzten Schutzschichten, sowie zu feuerfesten Werkstoffen [6, 7, 17, 18, 19].

2. Vorteile für den Betreiber

Für die Optimierung von Bauteilen (Verdampfer, Überhitzer, ECO) oder von Bereichen des Kessels (Feuerung, Strahlungsteil, Berührungsteil) ist ein kurzfristiges Reagieren auf Missstände in der Regel kein wirtschaftlich vorteilhafter Weg. Maßnahmen, die eine Überbrückung bei akuten Defekten und eine Absicherung der Verfügbarkeit bis zum geplanten Ende einer Reisezeit ermöglichen, sind notwendig und wichtig, sind aber nicht einer mittel- und langfristigen Optimierung gleichzusetzen.

Aus den Erfahrungen der zurückliegenden Jahre spricht viel dafür, für Optimierungen – hier in Bezug auf Korrosion und Verschmutzung – systematische und geplante Wege einzuschlagen.

Aus den Erfahrungen der CheMin zeichnen sich für ein systematisches Vorgehen klare Schritte ab, die sinnvoll sind und die aufgrund der komplexen chemischen und thermischen Bedingungen in MVA, EBS- und Biomasseanlagen auch notwendig sind. Diese Schritte sind in den Kapiteln 1.1 bis 1.6 dargelegt.

So gesehen bietet jedes Ende einer Reisezeit die Chance, in der anschließenden Revision mit einem Optimierungszyklus zu beginnen. Dabei ist es gleichgültig, ob dies für ein bestimmtes Bauteil erfolgt, für mehrere Bauteile oder für ganze Bereiche des Kessels.

Für alle sechs Schritte gilt, dass der jeweilige Aufwand durch die Zielvorgaben bestimmt wird. Der Betreiber entscheidet also selbst, welcher Aufwand notwendig ist, indem er die Erwartungen an die Bauteiloptimierung formuliert. Im Groben ergibt sich der in einem Schritt zu tätige Aufwand auch aus den Befunden der zuvor durchgeführten Schritte. Je komplexer und aggressiver ein thermisch-chemisches Milieu wirkt, desto mehr Aufwand sollte z.B. in die Werkstofftests und in die Betriebsvariationen gesteckt werden.

Alle in diesem Beitrag dargelegten unterstützenden Maßnahmen zur Bauteiloptimierung werden aus einer Hand angeboten. Dies hilft, unnötige Schnittstellen zu vermeiden.

Literatur

Alle nachfolgenden Publikationen sind auf www.chemin.de verfügbar.

- [1] Spiegel, W.; Herzog, Th.; Jordan, R.; Magel, M.; Müller, W. & Schmidl, W.: (2008): Korrosionsfrüherkennung: Korrosionsminderung heute ist Effizienzsteigerung morgen. In: K. J. Thomé-Kozmiensky und M. Beckmann (Hrsg.): Energie aus Abfall. Band 4. Neuruppin: TK Verlag 2008, S. 509-524
- [2] Spiegel, W.; Herzog, Th.; Jordan, R.; Magel, M.; Müller, W. & Schmidl, W.: (2009): Anwendung sensorischer Prozessinformationen am Beispiel der Korrosionsfrüherkennung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. und Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall. Band 6. Neuruppin: TK Verlag, 2009, S. 669-684
- [3] Spiegel, W.; Herzog, Th.; Jordan, R.; Magel, M.; Müller, W. & Schmidl, W.: (2010): 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, 2010, S. 271-286
- [4] Magel, G.; Molitor, D.; Bratzdrum, C.; Koch, M. & Aleßio, H.-P. (2012): 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
- [5] Pohl, M.; Beckmann, M.; Herzog, Th.; Spiegel, W.; Kaiser, M. & Brell, J. (2013): PartikelGitterNetz Sonde – 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-

- [6] Herzog, Th.; von Trotha, G. & Molitor, D. (2013): Von Korrosion lernen. Welche Herausforderungen stellt der Betrieb, was ist schweißtechnisch beim Korrosionsschutz durch Cladding machbar? In: Thomé-Kozmiensky, K. J. und Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 10. Neuruppin: TK Verlag, 2013, S. 473-488
- [7] 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
- [8] Metschke, J.; Spiegel, W.; Gruber, K.; Magel, G. & Müller, W. (2004): Endbericht EU22 - Systematisierung und Bewertung von verfügbaren Maßnahmen zur Korrosionsminderung in der betrieblichen Praxis von MVA mittels partikelförmiger Rauchgasbestandteile. Forschungsauftrag EU22 im Auftrag des Bayerischen Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (Co-Finanzierung aus Mitteln des Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung, EFRE)
- [9] Metschke, J.; Spiegel, W.; Gruber, K.; Magel, G. & Müller, W. (2005): ASP und Belagssonde - Weiterentwicklung und Erprobung von ASP (Asche-Salz-Proportionen) und Belagssonde. Sitzung der ATAB-AG5 in Großblappen
- [10] Magel, G.; Müller, W.; Spiegel, W.; Schmidl, W.; Herzog, Th. & Aleßio, H.-P. (2013): Korrosivität von Rauchgasen: Online-Sensorik in Dampferzeugern. In: VGB PowerTech, Ausgabe 6/2013, S. 71-77
- [11] Herzog, Th.; Müller, W.; Spiegel, W.; Brell, J.; Molitor, D. & Schneider, D. (2012): 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
- [12] Magel, G.; Spiegel, W. & Müller, W. (2012): Einschätzung der Korrosivität des Rauchgases durch Online-Sensorik. VGB-Fachtagung "Thermische Abfallverwertung 2012", 8.-9. November 2012 in Hürth
- [13] Spiegel, W.; Herzog, Th.; Jordan, R.; Magel, M.; Müller, W. & Schmidl, W.: (2008): Korrosion in Biomasseverbrennungsanlagen und Strategien zur Minimierung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. und Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall. Band 5. Neuruppin: TK Verlag, 2008, S. 413-421
- [14] Müller, W.; Kaiser, M.; Schneider, D.; Herzog, Th.; Magel, G. & Spiegel, W. (2013): 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
- [15] Beckmann, M.; Krüger, S.; Gebauer, K.; Pohl, M.; Spiegel, W. & Müller, W. (2009): 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
- [16] Pohl, M.; Bernhardt, D.; Beckmann, M. & Spiegel, W. (2011): Brennstoffcharakterisierung zur vorausschauenden Bewertung des Korrosionsrisikos. In: Born, M. (Hrsg.): Dampferzeugerkorrosion 2011, Freiberg: SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH, 2011, S. 67-83
- [17] Herzog, Th. & Metschke, J. (2009): 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
- [18] Schmidl, W. (2009): Erfahrungen mit thermisch gespritzten Schichten als Korrosionsschutz auf Wärmetauscherflächen in reststoffbefeueten Dampferzeugern. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. und Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall. Band 6. Neuruppin: TK Verlag, 2009, S. 593-610
- [19] Schmidl, W.; Herden, H.; Keune, R.; Klotz, S. & Schuhmacher, K.-H. (2011): Cladding im Überhitzbereich bei erhöhten Dampfparametern am Beispiel des MHKW Frankfurt. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. und Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 8. Neuruppin: TK Verlag, 2011, S. 395-412