

Wege zu einer optimierten Nassreinigung von Strahlungsheizflächen

Slawomir Rostkowski, Michael Beckmann und Christoph Rinderle

1.	Einleitung.....	423
2.	Allgemeines.....	424
3.	Theoretische Betrachtung des Tropfenverhaltens.....	425
4.	Tropfen-Versuche.....	428
4.1.	Vorversuche im Labor.....	428
4.2.	Versuche in einer großtechnischen Anlage.....	429
4.2.1.	Versuchsapparatur.....	429
4.2.2.	Praxiseinsatz der Versuchsapparatur im MHKW Kassel.....	430
5.	Zusammenfassung und Ausblick.....	432
6.	Symbole und Indizes.....	433
7.	Literaturverzeichnis.....	433

1. Einleitung

Die Belagsbildung an den Wärmeübertragungsflächen ist bei dem Einsatz fester Brennstoffe unvermeidlich. Die Belagsschichten behindern den Wärmetransport vom Abgas an das Arbeitsmedium. Die in dem Belag enthaltenen Stoffe können die Korrosionsprozesse an der Oberfläche der Kesselwand fördern. In Folge der isolierenden Wirkung der Beläge in den Strahlungszügen kommt es zur Verschiebung des Temperaturprofils entlang des Abgasweges, so dass die nachgeschalteten Wärmeübertragungsflächen einer erhöhten thermischen Belastung ausgesetzt sind. Um diesen negativen Auswirkungen der Belagsbildung vorzubeugen, werden die Beläge mithilfe von Online-Reinigungssystemen während des Betriebes entfernt. Die lokale Belagssituation im Kessel kann jedoch sehr unterschiedlich sein. Besonders in den Abfallverbrennungsanlagen kann sich diese aufgrund der schwankenden Brennstoffeigenschaften mit der Zeit stark verändern. Dies beeinflusst die Wirkung und den erzielten Effekt der Reinigungsmaßnahmen. Auf dem Weg zu einer optimierten Reinigung der Strahlungszüge ist es wichtig, zuerst die Wirkungsmechanismen und die Haupteinflussfaktoren zu untersuchen. Dann müssen Methoden entwickelt und angewendet werden, die Informationen über die Ausgangssituation in der Anlage einerseits und die Effekte der Reinigungsmaßnahmen andererseits liefern.

2. Allgemeines

In den Strahlungszügen hat sich das Wasser als Reinigungsmedium durchgesetzt [3]. Bei der Reinigung mit Wasser können drei Mechanismen wirksam sein:

- die Impulswirkung des aufprallenden Wassers auf die Belagsschicht,
- die Sprengung der Belagsstruktur durch schlagartiges Verdampfen des Wassers,
- die Thermospannungen in der Belagsschicht bei der Abkühlung durch das relativ kalte Wasser.

Daraus resultiert, dass die Belageigenschaften, wie Struktur und Festigkeit sehr großen Einfluss auf den Effekt der Reinigungsmaßnahme haben können.

Die Belagsschichten können durch die Kondensation von anorganischen, flüchtigen Bestandteilen des Abgases, Anhaften von festen bzw. teilgeschmolzenen Flugaschepartikeln und Versintern oder Verschmelzen der bereits gebildeten Belagsschicht entstehen. Abhängig von dem Entstehungsmechanismus weisen die Belagsschichten unterschiedliche Struktur auf [8]. Welche der Mechanismen bei der Entstehung einer Belagsschicht eine Rolle spielen ist von den Prozessbedingungen, wie die Oberflächentemperatur, die Temperatur des Abgases und Strömungsverhältnisse im Kessel abhängig. Darüber hinaus werden die Menge und Art der belagsbildenden Spezies im Abgas durch die Brennstoffeigenschaften in Verbindung mit der Prozessführung bestimmt.

In dem ersten Schritt ist es wichtig einzuschätzen, welche Beläge von einem bestimmten Brennstoff entstehen können. Durch die Bestimmung der Brennstoffeigenschaften lassen sich Aussagen zu dem Belagsbildungspotential formulieren. Daher ist die Diagnose am Brennstoff ein wichtiger Bestandteil der Belagscharakterisierung [1, 2].

Der große Einfluss der Prozessführung und der konstruktiven Parameter der Anlage auf die Belagsbildung macht jedoch eine genaue Vorhersage der Belagssituation unmöglich. Daher sind Instrumente erforderlich, die Informationen über die aktuelle Belagssituation während des Betriebs liefern. Eines dieser Instrumente ist die Wärmestromdichtemessung. Bereits jetzt ist es möglich anhand der Messsignale, die lokale Belagssituation an den Strahlungswärmeübergangsflächen zu bewerten [7]. Künftig soll es auch möglich sein die Belageigenschaften anhand des Messsignals der Wärmestromdichtemessung während des Betriebs lokal zu bestimmen [4].

Für die betriebsbegleitende Charakterisierung der belagsbildenden Stoffe im Abgas und der stofflich-mineralischen Merkmale der Beläge wurden die Verfahren ASP-Klassierung, Belagssonde und Belagsmonitor entwickelt [9, 10].

Zum Monitoring der Prozessbedingungen in der Anlage ist die sog. Online-Bilanzierung [5] sehr gut geeignet. Mit diesem Instrument lassen sich zusätzliche Betriebsgrößen einschließlich der aktuellen Brennstoffparameter online ermitteln. Besonders beim Abfall kommt es zu großen zeitlichen Schwankungen der Zusammensetzung und des Heizwertes.

Eine bedarfsorientierte Online-Reinigung bedeutet eine Anpassung der Reinigungsparameter an die jeweilige Belagssituation, um einen möglichst guten Reinigungseffekt zu

erreichen. Gleichzeitig soll die Frage der Energieeffizienz beantwortet werden. Damit die Parameter der Reinigung an die jeweilige Situation angepasst werden können ist eine Reihe von Untersuchungen erforderlich. Die grundlegenden Fragen sind:

- das Verhalten des Wassers auf dem Weg zum Belag und an der Belagsoberfläche,
- die Wirkung des Wassers auf die Belagsschicht abhängig von den Belagseigenschaften, den herrschenden Temperaturen und den Parametern des Wasserstrahls.
- die Auswirkungen der Reinigungsmaßnahme auf den Prozess und auf die Anlageneffizienz.
- die Wirkung auf den Werkstoff der Membranwand
- die Wirkung auf das Arbeitsmedium in den Rohren der Kesselwände

In dem vorliegenden Beitrag werden davon zwei Aspekte herausgegriffen und betrachtet, nämlich das Verhalten vom Wasser auf dem Weg an die Wand und die Wirkung des Wassers auf die Belagsschicht.

3. Theoretische Betrachtung des Tropfenverhaltens

Aus den im Kapitel 1 vorgestellten möglichen Wirkungsmechanismen von Wassertropfen auf die Belagsschicht resultiert, dass die Eigenschaften des an die Belagsschicht antreffenden Wassers von großer Bedeutung für den Reinigungseffekt sind. Die Masse und die Geschwindigkeit des Wassers bestimmen die Impulswirkung. Zusammen mit der Temperatur beeinflussen diese Eigenschaften die Abkühlung der Belagsschicht. Auf die Parameter des Wassers an der Belagsschicht haben die Anfangsparameter des Wassers am Düsenaustritt und die Verhältnisse in dem Kesselzug, wie Geschwindigkeit und Temperatur des Abgases einen Einfluss. Durch die Anfangsparameter wird vor allem der Zerfall des Wasserstrahls in Tropfen, die Tropfengröße und Geschwindigkeit beeinflusst. Die im Kesselzug herrschenden Verhältnisse beeinflussen die Aufheizung und die Verdampfung des Wassers auf dem Weg zur Belagsschicht.

Für die Online-Reinigung nach dem Schwandorfer Modell wird das Verhalten von Wassertropfen in [6] ausführlich diskutiert. Die Ergebnisse zeigen, dass ein hoher Anteil des Wassers auf dem Weg von der Düse an die Wand verdampft. Deswegen soll ein möglichst großer Tropfendurchmesser am Düsenaustritt angestrebt werden, um ausreichend viel Waschflüssigkeit für die Reinigung zur Verfügung zu stellen. Der Auftreffgeschwindigkeit der Tropfen wird hier geringe Bedeutung zugeschrieben.

Die folgende Modellierung wird für die Online-Reinigung mit Wasserlanzenbläsern durchgeführt. Im Unterschied zu dem Verfahren nach dem Schwandorfer Modell ist die Geschwindigkeit des Wassers in dem Fall höher. Die Verweilzeit des Wassers im Kesselzug ist damit geringer, was auf den verdampften Anteil des Wassers einen Einfluss haben kann. Außerdem ist der Impuls der Wassertropfen für die Reinigung möglicherweise von größerer Bedeutung. Das Ziel dieser Betrachtung ist es, den Zustand des Wassers beim Auftreffen auf die Belags- bzw. Wandoberfläche zu ermitteln, um eine Grundlage für die Untersuchung der Reinigungswirkung zu schaffen.

Es werden zwei Wassertropfen mit unterschiedlichem Anfangsdurchmesser betrachtet, die einen Kesselzug durchqueren. Dabei wird untersucht, wie sich die Masse, der Durchmesser, die Temperatur und die Geschwindigkeit der einzelnen Wassertropfen ändern. Es wird angenommen, dass die Wassertropfen aus einer waagrecht ausgerichteten Düse mit einer Anfangsgeschwindigkeit austreten, die dem Blasdruck von 5 bar entspricht. Das Abgas strömt senkrecht von unten nach oben. Die Randbedingungen sind in der Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Randbedingungen zur Berechnung der Eigenschaften von Wassertropfen

Größe	Symbol	Einheit	Wert
Blasdruck	Δp_D	bar	5
theoretische Austrittsgeschwindigkeit des Tropfens	$w_{T,0}$	m/s	31,6
Temperatur Tropfen am Düsenaustritt	$\vartheta_{T,0}$	°C	20
Temperatur Abgas	ϑ_{AG}	°C	700
Abgasgeschwindigkeit	$w_{AG,y}$	m/s	3,6

Zur Ermittlung der gesuchten Größen wird ein Gleichungssystem aufgestellt, das auf der Massen-, Energie- und Impulserhaltung sowie den Gesetzen der Wärme- und Stoffübertragung beruht:

Energiebilanz

$$m_T(t) \cdot c_{p,T} \cdot \frac{dT_T(t)}{dt} = \alpha_K(t) \cdot A_T(t) \cdot (T_{AG} - T_T(t)) + \alpha_{St}(t) \cdot A_T(t) \cdot (T_W - T_T(t)) - \dot{m}(t) \cdot \Delta h_{VD}$$

Stofftransport

$$\dot{m}(t) = \frac{\beta(t)}{R} \cdot \left(\frac{P_{s,H_2O}}{T_T(t)} - \frac{P_{H_2O,AG}}{T_{AG}} \right) A_T(t) \cdot M_{H_2O}$$

Massenbilanz

$$\frac{dm_T(t)}{dt} = - \dot{m}(t)$$

Impulserhaltung in x-Richtung

$$\frac{dw_{T,x}(t)}{dt} \cdot m_T(t) = - F_{W,x}$$

Impulserhaltung in y-Richtung

$$\frac{dw_{T,y}(t)}{dt} \cdot m_T(t) = F_G - F_A - F_{W,y}$$

Die Ergebnisse der Berechnung werden in Bild 1 bis 3, jeweils für eine Strecke von 10 m in die horizontale Richtung (x-Richtung) dargestellt. Der Anfangsdurchmesser der Tropfen hat einen großen Einfluss auf deren Aufheizung (Bild 1). Der kleinere Tropfen erreicht nach 4 m in die horizontale Richtung die Temperatur von rund 70 °C, die dann nahezu konstant bleibt. Der größere Tropfen hat in dem Punkt die Temperatur von 30 °C. Auch die Geschwindigkeitsabnahme in die horizontale Richtung ist von dem Anfangsdurchmesser der Tropfen stark abhängig (Bild 2). Die Temperatur und die Geschwindigkeit der Tropfen beeinflussen die Verdampfung des Wassers. Nach 4 m ist die Masseabnahme des Tropfens mit dem Anfangsdurchmesser 5 mm nicht erkennbar, während der Tropfen mit dem Anfangsdurchmesser 1 mm rund 10 % der Masse verliert (Bild 3).

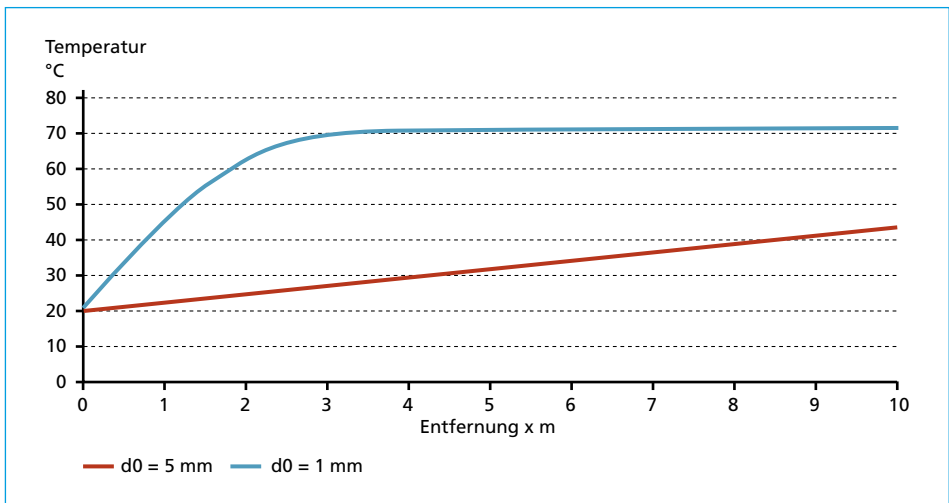


Bild 1: Temperatur der Wassertropfen

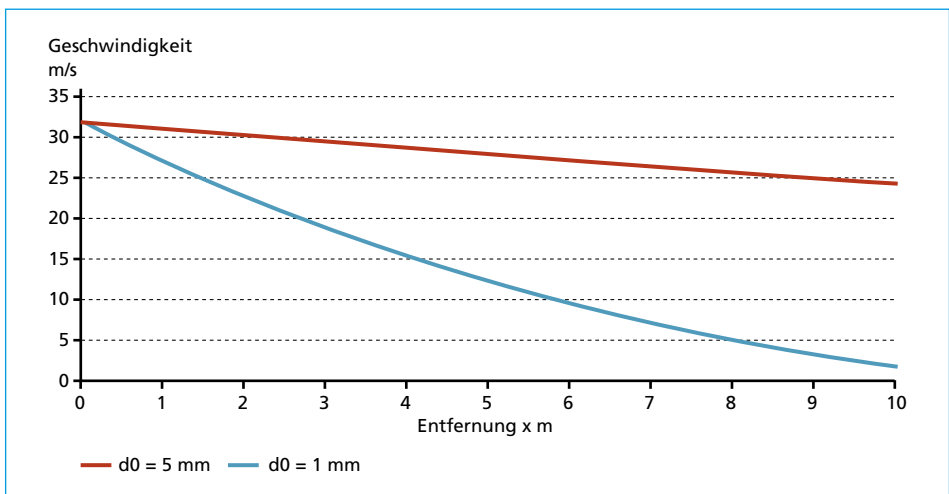


Bild 2: Geschwindigkeit der Wassertropfen

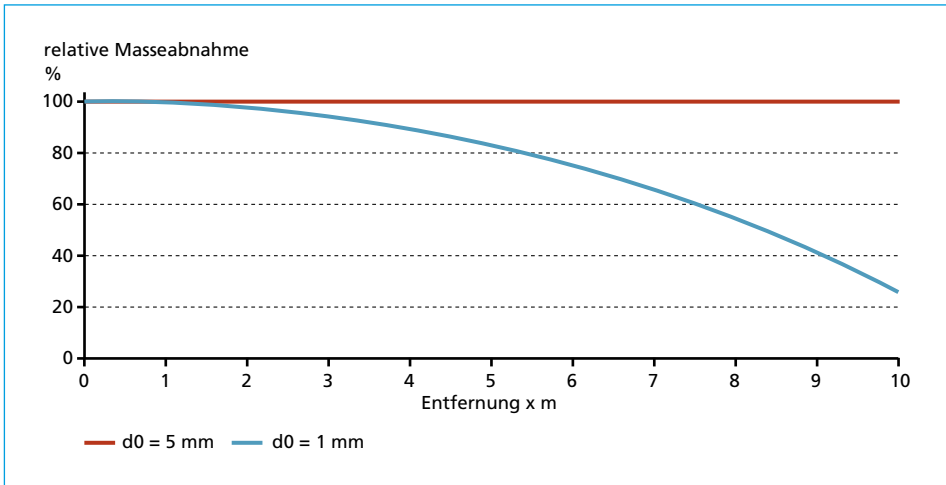


Bild 3: Masseabnahme der Wassertropfen

Das Wasser tritt aus der Düse in Form eines Strahls aus, der erst in einem gewissen Abstand abhängig von den Randbedingungen in Tropfen unterschiedlicher Größe zerfällt. Eine theoretische Beschreibung des Strahlzerfalls und damit der Tropfengrößenverteilung über den Abstand von der Düse ist beim heutigen Wissensstand nur begrenzt möglich [11]. Die hier vorgestellte, vereinfachte Betrachtung der einzelnen Tropfen unterschiedlicher Größe erlaubt jedoch einen Bereich zu bestimmen, in dem die jeweiligen Parameter des Wassers beim Auftreffen auf die Kesselwand liegen. Diese Information kann in die Untersuchung der Wechselwirkung zwischen dem Reinigungswasser und dem Belag einfließen.

4. Tropfen-Versuche

4.1. Vorversuche im Labor

Die Laborversuche mit künstlichen Belägen hatten das Ziel, die Wirkung der einzelnen Wassertropfen auf Belagsschichten grundsätzlich zu prüfen. Dazu wurden Proben mit einer künstlich erzeugten Belagsschicht in einem Muffelofen auf Temperaturen von 500 bzw. 600 °C aufgeheizt. Die aufgeheizten Proben wurden dann in der Umgebungsatmosphäre der Wirkung der von oben frei fallenden Wassertropfen ausgesetzt.

In Bild 4 ist eine Probe vor und nach dem Auftreffen der Tropfen zu sehen. Am Anfang weist die Oberfläche des Belags keine Schäden auf. Die ersten Tropfen dringen in die Poren der obersten Schicht des Belags ein und verdampfen schlagartig. Kleine Stücke des Belags werden dadurch abgesprengt. Mit weiteren fallenden Tropfen bildet sich allmählich ein Krater in der Belagsschicht, bis die Oberfläche des Rohrstücks erscheint. Das Wasser dringt jetzt zwischen die Belagsschicht und das Rohrstück. Die Verdampfung des Wassers führt zur Abhebung der Belagsschicht und es bildet sich ein Riss quer zur Probe.



a) Probe vor dem Auftreffen der Tropfen



b) Probe nach dem Auftreffen der Tropfen

Bild 4: Wirkung der Wassertropfen auf die Belagsschicht – Versuche mit künstlichen Belagsschichten im Labor

Die Versuche haben gezeigt, dass die Sprengung beim schlagartigen Verdampfen des Wassers tatsächlich wirksam ist. Es ist ersichtlich, dass alleine dieser Mechanismus eine Zerstörung der Belagsstruktur bewirken kann, da die Impulswirkung der Tropfen beim Auftreffen auf die Belagsoberfläche vernachlässigt werden kann. Die Temperatur der Belagsoberfläche spielt dabei eine große Rolle. Mit der Abkühlung nimmt die Verdampfungsintensität ab. Bei zu starker Abkühlung ist die Sprengwirkung nicht mehr vorhanden. Weitere Wassertropfen verdampfen immer langsamer bis die Belagsschicht von dem Wasser benetzt wird. Übertragen auf einen echten Belag bedeutet das, dass zu hohe Wassermenge pro Zeit- und Flächeneinheit (Beaufschlagungsdichte) eine zu starke Abkühlung und Benetzung der Belagsschicht verursachen kann, was zum Lösen der in dem Belag enthaltenen Salze führen kann. Dies haben die im nächsten Abschnitt vorgestellten Versuche bestätigt.

4.2. Versuche in einer großtechnischen Anlage

4.2.1. Versuchsanlage

Das eigentliche Ziel ist es, die Wirkung des Wassers auf echte Beläge zu untersuchen, um den Abreinigungswiderstand dieser Beläge zu erfassen. Dabei soll die Abkühlung der Beläge durch die Umgebungsatmosphäre und durch die Abstrahlung nach Entnahme aus dem Kessel vermieden werden. Zwar wäre eine Wiederaufheizung möglich, dies würde aber die Struktur und damit die Festigkeit des Belags beeinflussen. Außerdem führt die Abkühlung während des Versuchs zur Beeinflussung der Wasserverdampfung, wie die bereits vorgestellten Vorversuche im Labor gezeigt haben. Deswegen sollen die Versuche, weiter auch als *Tropfen-Versuche* bezeichnet, direkt am Kessel in einer speziell dafür konzipierten Versuchsanlage durchgeführt werden. Die heißen Beläge werden direkt vom Kessel in einen beheizten Versuchsraum eingeführt, in dem die Dosierung der Wassertropfen erfolgt.

Die Funktionsweise der Versuchsanordnung ist schematisch in Bild 5 dargestellt. Die Versuchsanordnung wird an einem Messstutzen der Kesselwand aufgestellt. Zur Entnahme der Beläge aus dem Kessel dient eine Sonde. Diese besteht aus einem Metallrohr, das an einem Ende geschlossen ist und von innen her mit der Luft aktiv gekühlt wird. Sie wird durch die Versuchsanordnung durchgesteckt und mit dem geschlossenen Ende in den Kessel bis zum $\frac{3}{4}$ der Länge eingeführt. Die Beläge lagern sich an dem in den Kessel eingeführten Teil der Sonde ab.

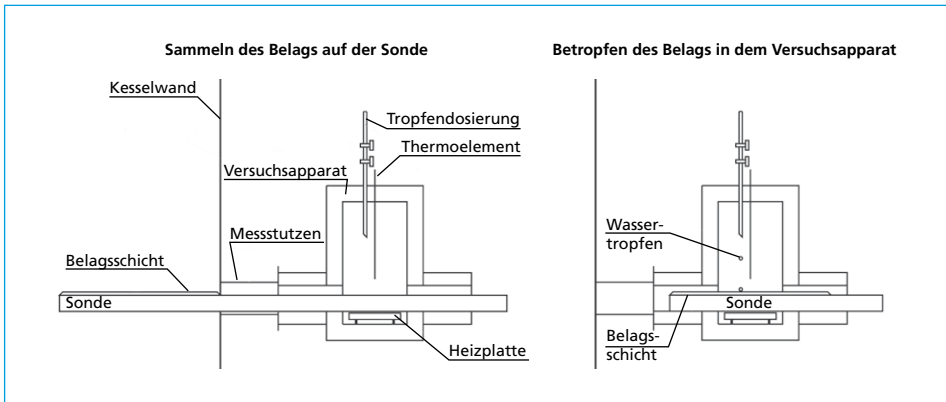


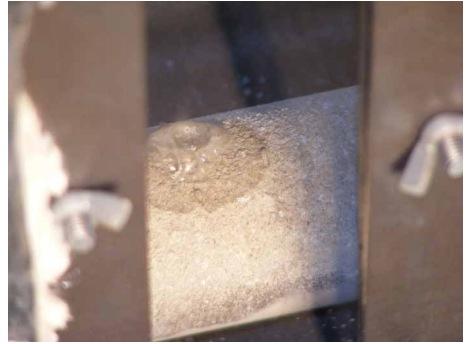
Bild 5: Aufbau und Funktionsweise der Versuchsanordnung

Durch Auswahl eines entsprechenden Werkstoffes und dank der Kühlung ist es möglich, mit der Sonde, die an einer Kesselheizfläche herrschenden Bedingungen zu simulieren und damit die Belagsbildungsprozesse in einem definierten Zeitfenster sowie im jeweiligen Kesselbereich realitätsnah abzubilden.

Nachdem sich eine Belagsschicht an der Sonde gebildet hat, wird die Sonde aus dem Kessel herausgezogen, so dass der Teil der Sonde mit der Belagsschicht sich in der Versuchsanordnung befindet. Der Innenraum der Versuchsanordnung wird beheizt, um eine Abkühlung der Belagsschicht zu vermeiden. Auf die nicht abgekühlte heiße Belagsschicht werden Wassertropfen dosiert. Die Wirkung der Wassertropfen auf die Belagsschicht kann durch ein Sichtfenster beobachtet werden.

4.2.2. Praxiseinsatz der Versuchsanordnung im MHKW Kassel

Die ersten *Tropfen-Versuche* mit der dazu entwickelten Versuchsanordnung konnten im MHKW Kassel durchgeführt werden. Die Sonden wurden am Anfang des 3. Zuges eingeführt. Die Abgastemperatur in dem Bereich des Kessels lag zwischen 600 und 650 °C. In Bild 6 a) ist die erste Sonde beim Herausziehen aus dem Kessel zu sehen. Auf der Sonde hat sich eine helle kompakte Belagsschicht gebildet. Die Sonde wird direkt in die Versuchsanordnung eingeführt, in der die Wassertropfen dosiert werden. Durch das Sichtfenster kann dann u.a. ein siedender Wassertropfen auf der Belagsschicht beobachtet werden (Bild 6 b).



a) Herausziehen einer Sonde mit Belag

b) Wassertropfen auf der Belagsschicht

Bild 6: Versuche mit echten Belagsschichten am Kessel des MHKW Kassel

Die Sonden verblieben im Kessel 13 Std. (Sonde Nr. 1) und 5 Stunden (Sonde Nr. 2). Dementsprechend haben sich unterschiedlich dicke Belagsschichten gebildet. Die Wirkung der Wassertropfen auf die Belagsschichten ist in Bild 7 zu sehen. In der 5 mm dicken Belagsschicht auf der Sonde Nr. 1 haben die Wassertropfen eine Mulde gesprengt (Bild 7 a). Die Einwirkung der Wassertropfen auf die 1mm dicke Belagsschicht auf der Sonde Nr. 2 hat flächige Abplatzungen des Belags von der Metalloberfläche und Rissbildung im Belag verursacht (Bild 7 b).

Trotz der Beheizung des Versuchsraumes führte die Dosierung von mehreren Wassertropfen nacheinander zur Abkühlung der beprobten Stelle. Nachdem die Verdampfung dadurch nachgelassen hatte, benetzte das Wasser die Belagsschicht. Die hellen runden Verfärbungen des Belags (Bild 7) weisen auf Lösen der Salze durch das flüssige Wasser hin.



a) Mulde – Sonde Nr. 1

b) Abplatzungen und Risse – Sonde Nr. 2

Bild 7: Wirkung der Wassertropfen auf die Belagsschichten

Die Versuche haben die Wirkung von Wassertropfen auf echte Belagsschichten gezeigt. Selbst bei relativ kompakten Belagsschichten kommt es zur Sprengung des Belags durch das verdampfende Wasser. Bei dickeren Belagsschichten werden die obersten

Teilschichten des Belags durch die einzelnen Wassertropfen abgelöst. In dünnen Belagschichten entstehen beim Kontakt mit dem Wasser, höchstwahrscheinlich infolge von Thermospannungen, Risse. Durch die Risse dringt das Wasser unter die Belagsschicht und sprengt diese von der Metalloberfläche ab.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Über die mathematische Modellierung lässt sich abschätzen, in welchem Zustand das Reinigungswasser die Belagsoberfläche erreicht. Mit dieser Information kann im nächsten Schritt die Wechselwirkung zwischen dem Wasser und dem Belag hinsichtlich der Wärmeübertragung und der mechanischen Wirkung auf die Belagsstruktur sowohl theoretisch als auch experimentell untersucht werden. Im Rahmen der experimentellen Untersuchung wurde zuerst die Sprengwirkung der Wassertropfen in Laborversuchen mit künstlichen Belagsschichten bestätigt. Zur Untersuchung von echten Belagschichten wurde eine spezielle Apparatur aufgebaut und getestet. Diese ermöglicht die Wirkung der Wassertropfen auf heiße Belagsschichten direkt nach deren Entnahme aus dem Kessel zu untersuchen. Damit kann die Veränderung der Belageigenschaften durch Abkühlung und Einwirkung der Luftfeuchtigkeit zwischen der Entnahme und dem Versuch ausgeschlossen werden.

Die Versuchsapparatur soll unter möglichst vielfältigen Bedingungen von Brennstoff, Feuerung und Kessel eingesetzt werden. Bei stets gleichen Randbedingungen (Verweilzeit der Sonde im Kessel, Anzahl der Tropfen etc.) kann die Auswirkung auf den Belag, also die Impaktwirkung, optisch qualifiziert werden (Tiefe und Größe des Kraters, Abplatzungen etc.). Die Befunde können einer relativen Skala zugeordnet werden, von *keine sichtbare Einwirkung* bis zu *völlige Abreinigung des Belags*, analog zu der Mohs'schen Härteskala. Damit können Beläge untereinander vergleichbar eingestuft werden. Auf diese Weise lässt sich mit der Versuchsapparatur der Abreinigungswiderstand eines Belags erfassen und einordnen.

Andere Wege zur Erfassung von Belageigenschaften, wie z.B. die chemische oder mineralische Zusammensetzung, die Porosität oder die Härte sind keine Eigenschaften, die für sich genommen den Abreinigungswiderstand beschreiben können. Demgegenüber ermittelt die Versuchsapparatur, ohne Überprägung durch Abkühlung, unmittelbar und reproduzierbar diese Belageigenschaft.

Die Erkenntnisse über den Abreinigungswiderstand unterschiedlicher Beläge sollen zusammen mit den Informationen über die Belags- und Prozesssituation in der Anlage einen optimalen Einsatz der Nassreinigung in den Strahlungszügen ermöglichen.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Herrn Geschäftsführer Karl-Heinz Schreyer und Herrn Dr. Tanner für die fachliche Zusammenarbeit und die Unterstützung bei der Durchführung der Versuche im MHKW Kassel, sowie bei der Fa. CheMin, insbesondere bei Herrn Geschäftsführer Dr. Spiegel, für den wissenschaftlichen Austausch und die Betreuung der Masterarbeit von Herrn Rinderle.

6. Symbole und Indizes

Lateinische Zeichen

A	Fläche
c_p	spezifische Wärmekapazität
F	Kraft
Δh_{VD}	Verdampfungsenthalpie
m	Masse
\dot{m}	Massenstrom
M	molare Masse
p	Druck; Partialdruck
\bar{R}	universelle Gaskonstante
t	Zeit
T	Temperatur (Kelvin-Skala)
w	Geschwindigkeit

Griechische Zeichen

α	Wärmeübergangskoeffizient
β	Stoffübergangskoeffizient

Indizes

A	Auftrieb
AG	Abgas
G	Gravitation
K	Konvektion
St	Strahlung
T	Tropfen
W	Widerstand

7. Literaturverzeichnis

- [1] Beckmann, M.; Pohl, M.; Bernhard, D.; Gebauer, K.: Criteria for solid recovered fuels as a substitute for fossil fuels – a review. In: Waste Management & Research. April 2012, vol. 30, S. 354-369
- [2] Beckmann, M.; Krüger, S.; Gebauer, K.; Pohl, M.; Spiegel, W.; Müller, W.: Methoden der Korrosionsdiagnose bei der Verbrennung schwieriger Brennstoffe. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 6. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2009, S. 443-460
- [3] Born, M.; Beckmann, M.: Korrosionsschutzmaßnahmen in MVA – Auswertung der Betreibererfahrung. In: SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH (Hrsg. und Verlag): Dampferzeugerkorrosion 2011. Freiberg, 2011, S. 143-157
- [4] Grahl, S.: Charakterisierung von Ablagerungen an Membranwänden von Dampferzeugern. Technische Universität Dresden, unveröffentlichte Dissertation, 2012
- [5] Horeni, M.: Möglichkeiten für die energetische Optimierung von Müllverbrennungsanlagen – Entwicklung, Erprobung und Validierung eines Online-Bilanzierungsprogramms. Papierflieger, 2007, Dissertation an der Technischen Universität Clausthal-Zellerfeld
- [6] Krüger, J.: Verhalten von Tropfen bei der Online-Kesselreinigung mit Wasser. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 7. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2010, S. 313-325
- [7] Krüger, S.: Wärmestromdichtemessung an Membranwänden von Dampferzeugern. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2009, Dissertation an der Technischen Universität Dresden

- [8] 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.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 9. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2012. S. 373-390
- [9] Spiegel, W.; Herzog, T.; Jordan, R.; Magel, G.; Müller, W.; Schmidl, W.: Korrosion durch Einsatz von Biomasse- und Ersatzbrennstoffen: Bedarf für belagsgestützte Korrosionskenngrößen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 2. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2007. S. 585-602
- [10] 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.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 3. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2007. S. 235-258
- [11] Wozniak G.: Zerstäubungstechnik: Prinzipien, Verfahren, Geräte. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2003