

# Energieeffizienz durch optimierte Reinigung

Slawomir Rostkowski und Michael Beckmann

1. Beurteilung der Belagssituation mittels WSD-Messung.....
2. Wirkung von einzelnen Wassertropfen auf Belagsschichten .....
- 2.1. Durchführung der Versuche.....
- 2.2. Ergebnisse .....
3. Untersuchung der Wasserwirkung auf Modellbeläge .....
4. Zusammenfassung und Ausblick.....
5. Literatur .....

Die Verfügbarkeit von Abfall-, Ersatzbrennstoff- und Biomasseverbrennungsanlagen ist deutlich von den Reisezeiten geprägt, die im Wesentlichen durch Abstaltungen zur Reinigung von Heizflächen begrenzt sind. Die Ablagerungen an den Heizflächen führen zu einer Verminderung der Wärmeübertragung vom Abgas in den Wasser-Dampf-Kreislauf und können außerdem die Korrosion der Heizflächen beschleunigen.

Um die gewünschten Reisezeiten einhalten zu können, werden die Heizflächen während des Betriebs gereinigt. Bei der Reinigung der Strahlungszüge finden heutzutage die sogenannten Wasserlanzenbläser Anwendung. Die Wirkung der Reinigung in den Strahlungszügen ist von den Reinigungsparametern und von den Eigenschaften der Belagsschicht abhängig. Die Reinigungsparameter sind: Wassermenge (durch Druck und Düsendurchmesser bestimmt), Verweilzeit des Wasserstrahls (abhängig von der Bewegung der Wasserlanze), Auftreffwinkel des Wasserstrahls und Reinigungszeitpunkt. Während die ersten zwei Parameter durch Auswahl und Einstellung des Reinigungssystems festgelegt sind und der Auftreffwinkel sich aus der Position der Wasserlanze gegenüber der zu reinigenden Wandfläche ergibt, wird der Reinigungszeitpunkt anhand der verfügbaren Betriebsdaten durch das Betriebspersonal bestimmt.

Zur Beurteilung des Verschmutzungsgrades des Dampferzeugers während des Betriebs und damit zur Bestimmung des Reinigungszeitpunkts wird heutzutage die Abgastemperatur genutzt. Diese steigt tendenziell mit wachsender Belagsschicht aufgrund der verschlechterten Wärmeauskopplung. Sie wird allerdings auch durch andere Faktoren beeinflusst, wie der Energieeintrag in den Dampferzeuger (Brennstoffdurchsatz, -heizwert) oder die Luftzufuhr.

Eine gezielte Reinigung der Stellen im Dampferzeuger, an denen die Ablagerungen einen für die Prozessführung relevanten, negativen Einfluss haben, ist anhand der herkömmlichen Betriebsdaten nicht möglich. Insbesondere in Abfallheizkraftwerken aufgrund des sehr inhomogenen Brennstoffes wäre eine Online-Reinigung vorteilhaft, die sich nach dem aktuellen Verschmutzungsgrad der einzelnen Heizflächen richtet.

## 1. Beurteilung der Belagsituation mittels WSD-Messung

Das Abfallheizkraftwerk (MHKW) Kassel wurde mit einem System zur Ermittlung der lokalen Wärmestromdichte in Dampferzeugerwänden ausgerüstet. Die Bestimmung der Wärmestromdichte erfolgt über die Messung der Temperaturdifferenz zwischen dem feuerraumabgewandten Steg und dem Scheitel der Membranwand [1]. Die Anordnung der Wärmestromdichtesensoren, der Online-Reinigungssysteme und der relevanten Temperaturmessstellen im Dampferzeuger der Linie 2 des MHKW Kassel ist in Bild 1 dargestellt.

Anhand des Messsignals ist es möglich, den lokalen Verschmutzungszustand und dessen Einfluss auf die Wärmeübertragung zu bewerten. Damit kann auch die Wirkung der Reinigung stellenbezogen bewertet werden.

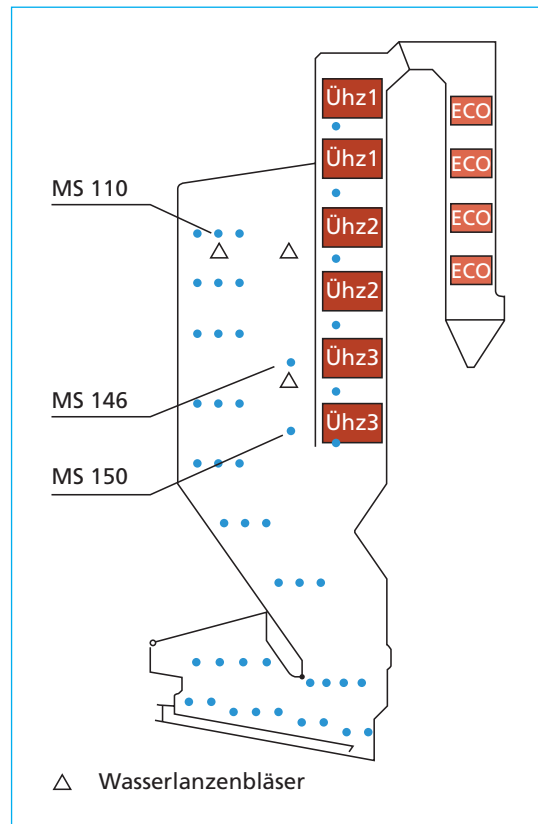


Bild 1:

Anordnung der Wärmestromdichtesensoren und der Online-Reinigungssysteme

Das Bild 2 zeigt den Signalverlauf der Messstelle MS 110 im 1. und im 11. Monat nach der Revision im Jahr 2011. Es ist zu erkennen, dass im 1. Monat der Reisezeit der Reinigungseffekt länger anhält (das Signal bleibt länger auf hohem Niveau) und das durchschnittliche Signalniveau höher ist als im 11. Monat (das Signal fällt sehr schnell nach einer Reinigung steil ab).

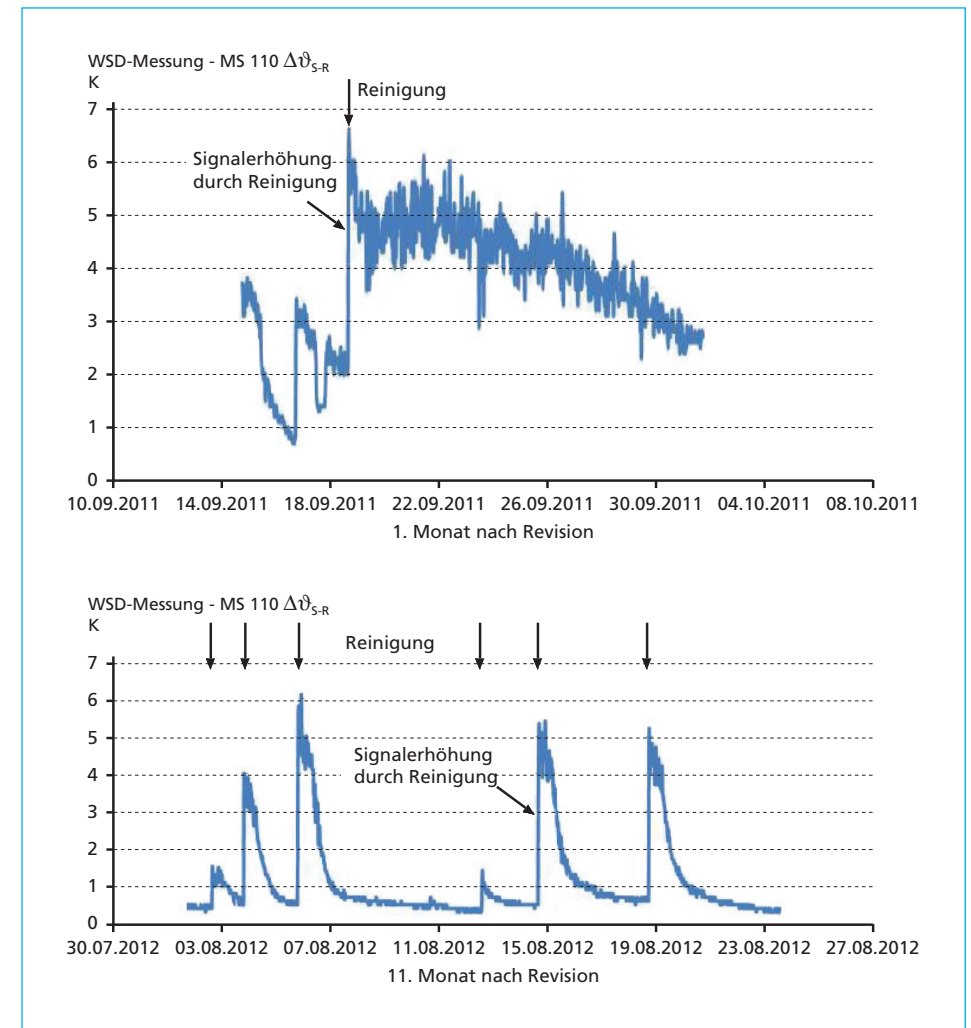


Bild 2: Unterschied im Verlauf der WSD-Signale am Beginn und am Ende der Reisezeit – 1. Monat der Reisezeit (oben); 11. Monat der Reisezeit (unten)

Ein Signalverlauf von einem anderen Zeitraum (Bild 3) zeigt, dass der Bereich der Messstelle MS 110 über lange Zeit nicht gereinigt wird, obwohl das Messsignal sich auf sehr niedrigem Niveau befindet. Die Reinigung bringt eine starke Signalerhöhung, wenn auch für eine relativ kurze Zeit.

Daraus ist es erkennbar, dass die Reinigung im Bereich der Messstelle MS 110 zur Erhöhung der Wärmestromdichte bewirkt, aber die Wand über lange Zeit sich im verschmutzten Zustand befindet, da die Reinigung nicht durchgeführt wird.

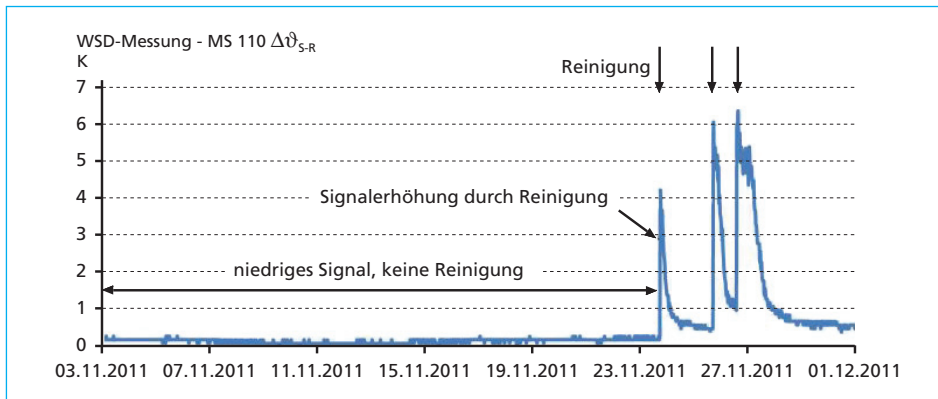


Bild 3: Lange Zeitintervalle ohne Reinigung bei niedrigem WSD-Signal

Die Betrachtung der Messstellen MS 146 und MS 150 im 2. Zug über längeren Zeitraum zeigt, dass die Online-Reinigung im Bereich der Messstelle MS 146 keine positive Wirkung hat. Das Messsignal sinkt kontinuierlich trotz mehrmaligen Reinigungsereignissen. Das Messsignal der Messstelle 150 befindet sich im gleichen Zeitraum auf hohem Niveau, das einem sauberen Zustand entspricht. Trotzdem wird der Bereich in dem Zeitraum mehrmals gereinigt (Bild 4).

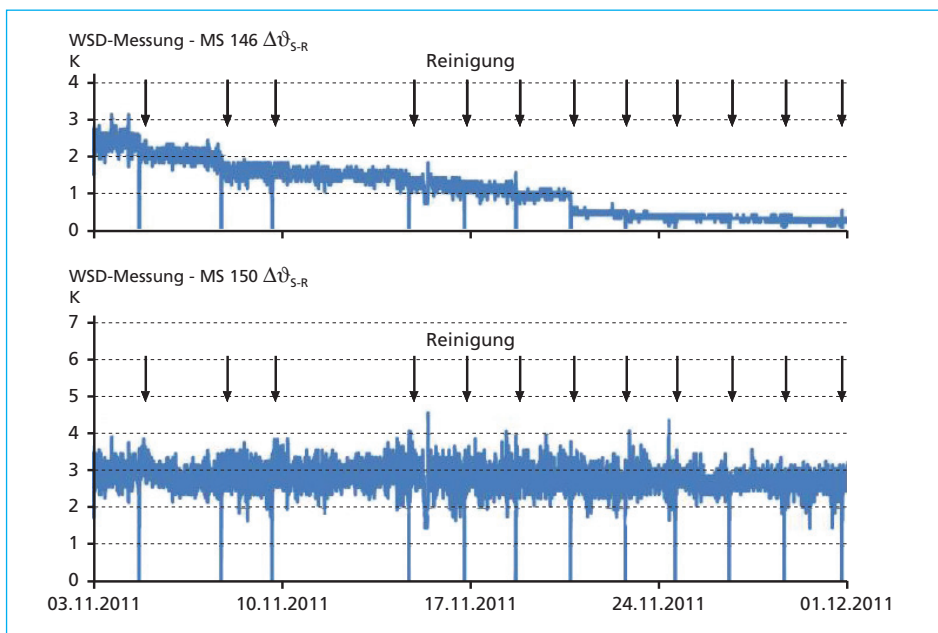


Bild 4: Reinigungswirkung im Bereich der Messstellen MS 146 und MS 150

Die Aufnahme der Belagssituation während einer Dampferzeugerbegehung im Stillstand hat gezeigt, dass während im 1. Zug und im oberen Bereich des 2. Zugs die Beläge überwiegend pulvrig und brüchig sind, bilden sich im unteren Bereich des 2. Zugs (Bereich der Messstellen MS 146 und MS 150) harte, kompakte Belagsschichten, die Stellenweise trotz der Reinigung von der Wand nicht entfernt werden.

Mit dem Ziel, die Wirkung des Wassers auf unterschiedliche Belagsschichten zu untersuchen, wurde eine Reihe von Experimenten mit realen Belägen, sowie mit künstlich präparierten Belagsproben durchgeführt. In den nächsten Kapiteln sind die Durchführung und die bisherigen Ergebnisse vorgestellt.

## 2. Wirkung von einzelnen Wassertropfen auf Belagsschichten

Die Wirkung des Wassers auf reale, heiße Belagsschichten sollte möglichst ohne Abkühlung nach Entnahme aus dem Dampferzeuger und ohne Wiederaufheizung der Beläge untersucht werden. Eine eventuelle Veränderung der Festigkeit und der Struktur von den untersuchten Belagsschichten durch äußere Einflüsse sollte damit verhindern werden. Um dieses Ziel zu realisieren sollen die Versuche direkt am Dampferzeuger in einem beheizten Versuchsapparat stattfinden.

### 2.1. Durchführung der Versuche

Der Versuchsapparat besteht aus einer beheizten Kammer, in die von oben eine Vorrichtung zur Wasserdosierung eingeführt wird. Zur Kontrolle der Temperatur in der Kammer dient ein Thermoelement. Der Aufbau und die Funktionsweise des Versuchsapparats sind schematisch in Bild 5 dargestellt.

Der Versuchsapparat wird an einem Messstutzen der Dampferzeugerwand aufgestellt. Zur Entnahme der Beläge aus dem Dampferzeuger dient eine Sonde, die durch den Versuchsapparat in den Dampferzeuger hineingeschoben wird (Bild 5, oben). Der Belag setzt sich auf dem in den Dampferzeuger eingeführten Teil der Sonde ab. Nach einer festgelegten Zeit wird die Sonde zurückgezogen, so dass sich die gesammelte Belagsschicht in der Kammer des Versuchsapparates unter der Wasserdosierung befindet. Das Wasser wird auf die heiße Belagsschicht dosiert (Bild 5, unten). Die Wirkung des Wassers kann durch ein Sichtfenster beobachtet werden. Anschließend wird die Sonde vollständig aus dem Versuchsapparat herausgezogen und kann begutachtet werden.

Die Sonde besteht aus einem Metallrohr, das an dem in den Dampferzeuger einzuführenden Ende geschlossen ist. Durch das offene Ende wird in die Sonde ein Innenrohr hineingeschoben, durch das die Druckluft zur Kühlung der Sonde hineingeführt wird. Die Luft tritt an dem geschlossenen Ende der Sonde aus dem Innenrohr heraus und strömt im Innenraum der Sonde zwischen dem Innenrohr und der inneren Wandoberfläche der Sonde zurück. Dadurch wird die Sonde von innen her gekühlt.

An der inneren Wandoberfläche der Sonde werden Temperaturmessstellen angebracht, die zur Kontrolle zur Regelung der Temperatur der Sonde dienen. Der Aufbau und die Funktionsweise der Sonde sind in Bild 6 dargestellt.

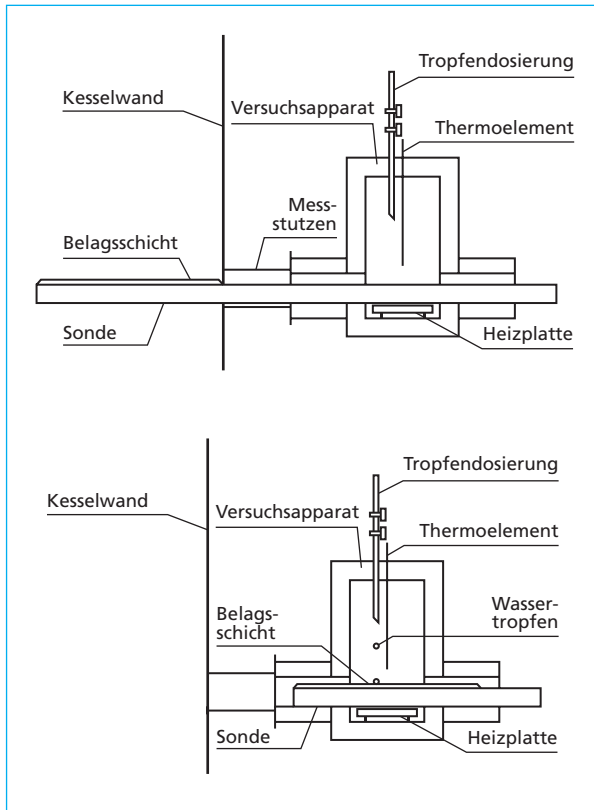


Bild 5:  
Aufbau und Funktionsweise des Versuchsapparats

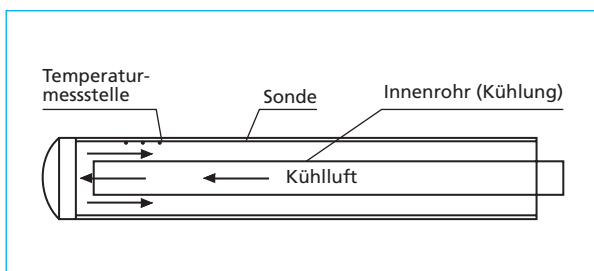


Bild 6:  
Aufbau und Funktionsweise der Sonde

Die Belagsentnahme und die anschließende Untersuchung der Wasserwirkung fanden an zwei Messorten statt (Bild 7):

- Messort 1: 1. Zug, 32,5 m,
- Messort 2: 3. Zug, 22,5 m.

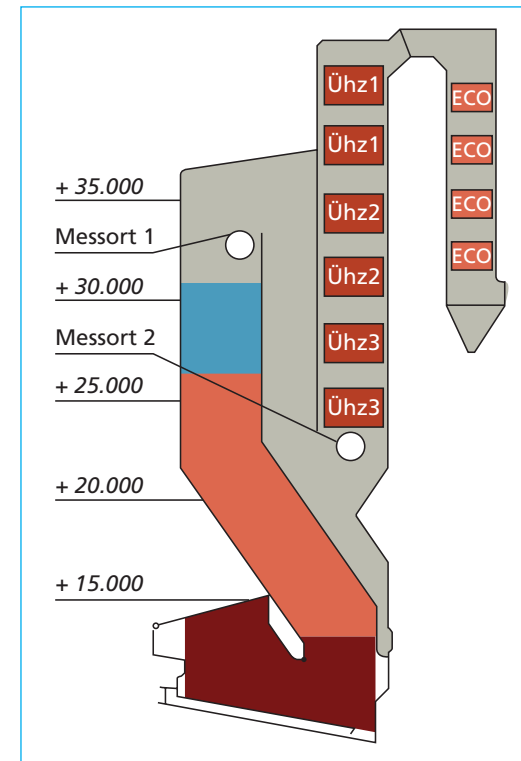


Bild 7:  
Anordnung der Messorte im Dampferzeuger

Für die Versuche wurden folgende Parameter festgelegt:

- Position der Wasserdosierung auf der Sonde: 60, 160, 260 mm von der Sondenspitze,
- Temperatur der Sonde (30 mm vom Sondenende): 260 °C,
- Tropfenzahl: 20,
- Tropfenfrequenz: 1 Tropfen/Sek.

Die Abgastemperaturen an den Messorten betragen im Durchschnitt:

- Messort 1: 790 °C,
- Messort 2: 690 °C,

Die Temperatur in dem Versuchsapparat lag bei 450 °C.

## 2.2. Ergebnisse

Nach der Belagsentnahme (Ablagern auf der Sonde) und nach der Wasserdosierung im Versuchsapparat kann die Belagsschicht charakterisiert und die Wasserwirkung bewertet werden. Das Bild 8 zeigt die Sonden nach den Versuchen von der Anströmseite. Die Stellen der Wasserdosierung sind mit Pfeilen und mit Nummern (1, 2, 3) gekennzeichnet.

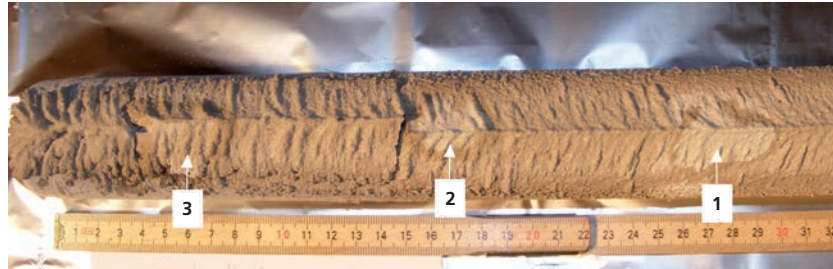




a) Messort 1, Belagsentnahme: 16 Stunden



b) Messort 1, Belagsentnahme: 40 Stunden



c) Messort 2, Belagsentnahme: 16 Stunden

Bild 8: Belagsschichten auf Sonden nach Belagsentnahme und Wasserdosierung

Die Belagsdicke der auf den Sonden gebildeten Belagsschichten an den drei ausgewählten Stellen ist der Tabelle 1 zu entnehmen. Aus den Werten folgt, dass die Belagsschicht am Messort zwei innerhalb von 16 Stunden in etwa gleiche Dicke erreicht, wie die Belagsschicht am Messort 1 nach vierzig Stunden. Die am Messort 1 innerhalb von 16 Stunden gebildete Belagsschicht ist deutlich dünner.

Tabelle 1: Dicke der Belagsschicht auf den Sonden

Messort	Dauer der Belagsentnahme	Belagsschichtdicke		
		Stelle 3	Stelle 2	Stelle 1
1	16 Std.	1 mm	4 mm	2 mm
	40 Std.	11 mm	14 mm	18 mm
2	16 Std.	14 mm	14 mm	13 mm

Nach 16 Stunden hat sich am Messort 1 eine krustenartige Belagsschicht mit hohem Salzanteil gebildet (Bild 8 a). In der Nähe der Spitze ist lediglich eine sehr dünne, helle Salzschicht vorhanden. Die Wassertropfen haben an den Stellen 1 und 2 die Belagsschicht gesprengt. Dabei wurden jeweils größere, Stücke des Belags abgetrennt. An der Stelle 3 löste das Wasser die dünne Salzschicht.

Auf der vierzig Stunden lang, am Messort 1 im Dampferzeuger verbliebenen Sonde (Bild 8 b) hat sich ein mehrschichtiger Belag gebildet. Auf einer Grundschicht mit großem Salzanteil ist eine dickere Schicht aus größeren Aschepartikeln vorhanden. Der Aufbau der innerhalb von 16 Stunden am Messort 2 gebildeten Belagsschicht (Bild 8 c) ist ähnlich, wobei die Aschepartikel feiner sind. Auf die beiden dickeren Belagsschichten hatten die Wassertropfen keine sichtbare Sprengwirkung.

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist es zu beachten, dass in den hier vorgestellten Versuchen einzelne, nacheinander frei fallende Tropfen punktwise auf eine waagrecht angeordnete Belagsschicht treffen. Die Versuche zeigen lediglich, inwieweit die Sprengung einer bestimmten Belagsschicht durch Verdampfung der Wassertropfen bei den gegebenen Randbedingungen wirksam ist. Die Ergebnisse erlauben noch keine Aussagen zur Wirksamkeit einer Reinigung mit Wasser, bei der die Belagsschichten an einer senkrechten Dampferzeugerwand haften und großflächig mit einem Wasserstrahl beaufschlagt werden. In dem Fall gewinnen weitere Mechanismen der Wasserreinigung an Bedeutung, wie Rissbildung infolge von Thermospannungen im Belag, der Impuls des Wassers und letztlich die Schwerkraft, die zum Abfallen des Belags von der senkrechten Wandfläche beitragen kann.

### 3. Untersuchung der Wasserwirkung auf Modellbeläge

Die Wirkung der einzelnen Mechanismen bei der Reinigung mit Wasser (Sprengung, Thermospannung, Impulswirkung) ist von den eingestellten Parametern (Wasserdruck, Wassermenge, Strahleigenschaften, Beaufschlagungsdauer) und von den Belageigenschaften (Stoffeigenschaften, Temperatur) abhängig.



Bild 9: Eine befestigte Probe vor einem Versuch

Um den Einfluss der Parameter und der Belageigenschaften zuerst qualitativ zu untersuchen, wurden Versuche mit künstlich präparierten Proben (Modellbelägen) in einer Versuchsanlage durchgeführt, in der die Proben aufgeheizt und durch das Wasser beaufschlagt werden. Eine in der Versuchsanlage befestigte Probe vor einem Versuch zeigt Bild 9.

Zuerst wurden Modellbeläge mit unterschiedlichen Materialeigenschaften der Wasserwirkung ausgesetzt. Alle Proben wurden auf Temperaturen im Bereich 540 °C bis 570 °C aufgeheizt. Die Wassermenge blieb konstant und lag bei 0,63 l/s. Die Modellbeläge wurden aus drei unterschiedlichen Materialien angefertigt: Gips, Mischung aus Gips und Styroporspänen, Mischung aus Gips und Sand. Der Modellbelag aus reinem Gips ist hart, feinkörnig und hat keine sichtbare Porenstruktur. Beim Modellbelag aus der Gips-Styropor-Mischung verbrennen die Styroporspäne während der Aufheizung, was zur Bildung von größeren, geschlossenen Poren führt. Der letzte Modellbelag besteht aus größeren, mittels Gips gebundenen Sandkörnern und ist im Vergleich zu den anderen Modellbelägen relativ brüchig. Bild 10 zeigt die Modellbeläge nach Aufheizung und Einwirkung des Wassers.

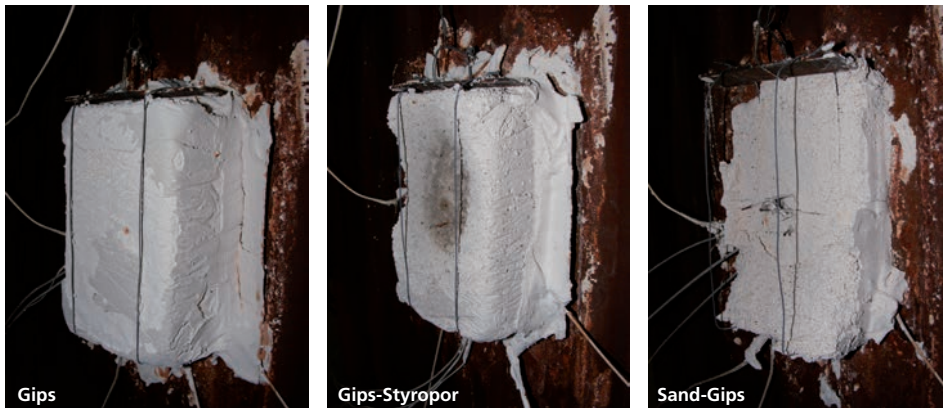


Bild 10: Wirkung des Wassers auf Proben aus Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften: a) Gips; b) Gips-Styropor; c) Sand-Gips.

In der Wirkung des Wassers auf die jeweiligen Proben ist ein deutlicher Unterschied erkennbar. Von der Probe aus reinem Gips wurde nur eine dünne Schicht flächig abgetragen (Bild 10 a). Eine stärkere Wirkung hatte das Wasser auf die poröse Gipsprobe (Bild 10 b), in der mittig eine Vertiefung entstanden ist. Die grobkörnige, brüchige Probe aus Sand und Gips wurde durch das auftreffende Wasser beinahe vollständig zerstört (Bild 10 c). Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Einfluss des Materials der Proben auf die Wirkung des Wassers

Material	Eigenschaften	Ergebnis	Bild
Gips	kompakt, hart, feinkörnig	nur eine dünne Schicht an der Oberfläche abgetragen	10, a)
Gips-Styropor	porös, hart, feinkörnig	gute Abtragung im Kernbereich des Wasserstrahls	10, b)
Sand-Gips	größere Sandkörner, locker gebunden, brüchig	im oberen Bereich Probe vollständig, bis zur Grundschrift, abgetragen.	10, c)

In einer weiteren Versuchsreihe wurde untersucht, welchen Einfluss auf die Wirkung des Wassers die Temperatur des Belags hat. In dem Fall wurden alle Proben aus der Sand-Gips-Mischung angefertigt.

Die Wassermenge blieb bei allen Proben gleich (0,36 l/s). Um die reine Impulswirkung des Wasserstrahls zu prüfen, wurde die erste Probe bei einer Raumtemperatur von etwa 20 °C durch das Wasser beaufschlagt. Weitere drei Proben wurden entsprechend auf Temperaturen 250, 325 und 540 °C vor der Wasserbeaufschlagung aufgeheizt. Bei diesen Proben spielen außer dem Impuls die Wasserverdampfung und die Thermo- spannungen eine Rolle.

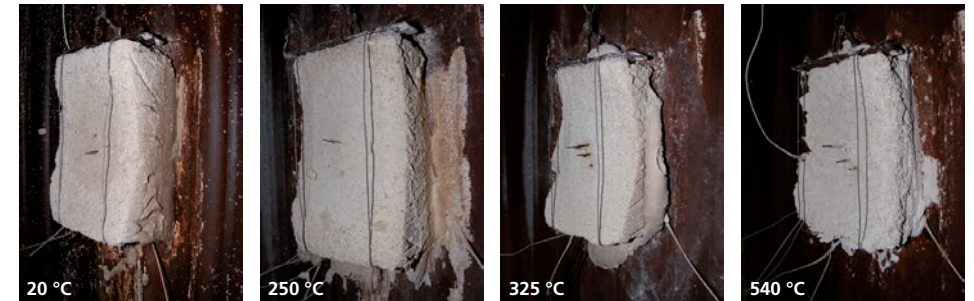


Bild 11: Wirkung des Wassers bei unterschiedlicher Temperatur der Proben aus gleichem Material: a) 20 °C; b) 250 °C; c) 325 °C; d) 540 °C

Wie in Bild 11 zu sehen ist, steigt die abtragende Wirkung des Wassers mit der Temperatur des Modellbelags. Die Ergebnisse fasst die Tabelle 3 zusammen.

Tabelle 3: Einfluss der Temperatur der Proben auf die Wirkung des Wassers

Temperatur Probe	Ergebnis	Bild
20 °C	abgetragene Schicht in der Mitte: 14 mm; Abtragung nur im zentralen Bereich der Probe	11, a)
250 °C	abgetragene Schicht in der Mitte: 20 mm; Abtragung auf größerer Fläche der Probe	11, b)
325 °C	abgetragene Schicht in der Mitte: 24 mm; Abtragung auf der ganzen Fläche der Probe	11, c)
540 °C	abgetragene Schicht in der Mitte: 40 mm; Abtragung auf der ganzen Fläche der Probe	11, d)

Die letzte Versuchsreihe sollte zeigen, welchen Einfluss die Erhöhung der Wassermenge auf die Zerstörung der Modellbeläge durch den Wasserstrahl hat. Alle Proben bestehen aus der Sand-Gips-Mischung. Da die zu verdampfende Wassermenge von der im Belag gespeicherten Energie sowie von dem Wärmeübergang zwischen dem Belag und Wasser, und damit von der Temperatur des Belags abhängig ist, wurde die Variation der Wassermenge für Proben mit zwei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Wassererhöhung bei der höheren Temperatur der Proben (540 °C) zu einer Verbesserung der abtragenden Wirkung des Wassers führt (Bild 12 a, b).



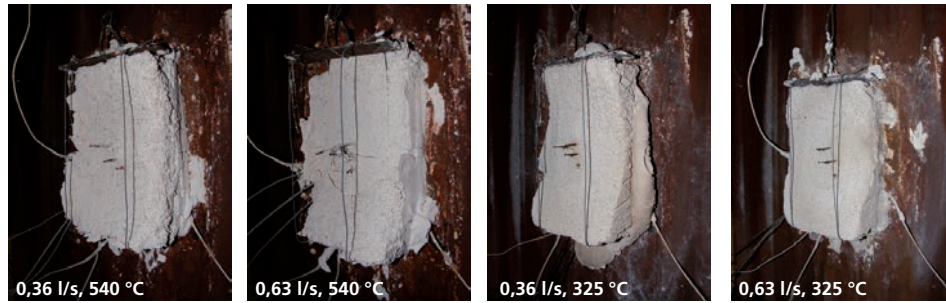


Bild 12: Wirkung des Wassers auf Proben mit Temperatur von 540 °C und 325 °C bei unterschiedlicher Wassermenge: a) 0,36 l/s, 540 °C; b) 0,63 l/s, 540 °C; c) 0,36 l/s, 325 °C; d) 0,63 l/s, 325 °C.

Die Erhöhung der Wassermenge bei Proben mit der niedrigeren Temperatur (325 °C) verbessert diese Wirkung dagegen nicht (Bild 12 c, d).

Die Versuche mit Modellbelägen führen zu folgenden Erkenntnissen:

- die Porosität, Korngröße und Festigkeit des Belags haben wesentlichen Einfluss auf die Wirkung des Wassers – auf feinkörnige, harte Beläge hat das Wasser viel schwächere Wirkung, als auf grobkörnige, brüchige Beläge
- die Verdampfung des Wassers an der Oberfläche bzw. im Belag spielt eine große Rolle bei der Abtragung der Belagsschicht; ein anderer Mechanismus der Zerstörung kann die Thermospannung sein
- eine Erhöhung der Wassermenge führt nur bedingt zur Verbesserung der Wirkung, die mit der zur Verdampfung verfügbaren Energie zusammenhängt

Aus den o.g. Erkenntnissen lässt sich schlussfolgern, dass für einen Belag mit bestimmten Materialeigenschaften und einem bestimmten Temperaturprofil eine optimale Wassermenge ausgewählt werden kann. Eine genauere Bestimmung der Abhängigkeiten zwischen Materialeigenschaften, Temperatur und eingestellten Parametern der Reinigung bedarf weiterer experimenteller sowie theoretischer Untersuchung.

## 4. Zusammenfassung und Ausblick

Anhand der Signale der WSD-Messung können der Grad der Verschmutzung und die Wirkung der Reinigungsmaßnahmen lokal sehr gut bewertet werden. Dabei zeigt sich, dass über lange Zeiten die WSD-Signale auf niedrigem Niveau liegen, was einem verschmutzten Zustand der Dampferzeugerwände und einer niedrigen Wärmestromdichte entspricht.

Während die lockeren Beläge in dem 1. Zug sehr gut durch Reinigung entfernt werden können, sind in dem 2. Zug Stellen vorhanden, an denen trotz Reinigung dickere, relativ harte Belagsschichten haften.

In dem Fall ist es notwendig durch Untersuchung der Wasserwirkung auf Beläge mit unterschiedlichen Eigenschaften zu prüfen, inwieweit sich durch eine Anpassung der Reinigungsparameter der Reinigungseffekt verbessern lässt. Dazu wurden die Versuche im Tropfenapparat direkt am Dampferzeuger mit echten Belagsschichten und in einer weiteren Versuchsanlage mit Modellbelägen durchgeführt.

Die Versuche in dem speziell dazu entwickelten Tropfenapparat haben unterschiedliche Wirkung der Wassertropfen auf verschiedene Belagsschichten gezeigt. Während dünne, krustenartige Schichten abgesprengt wurden, war bei den dickeren, aus miteinander verklebten bzw. versinterten Aschepartikeln bestehenden Belagsschichten keine Sprengwirkung durch Wassertropfen festzustellen.

Zur weiteren Untersuchung der Wasserwirkung auf Belagsschichten dienten die Versuche mit Modellbelägen im Technikum der TU Dresden. Die Ergebnisse zeigen einen großen Einfluss der Materialeigenschaften der Proben auf die abtragende Wirkung des Wasserstrahls. Dabei führte eine Erhöhung der Wassermenge nur bedingt zur Verstärkung dieser Wirkung. Darüber hinaus konnte der Einfluss der Wasserverdampfung (Sprengwirkung) als einer der wirkenden Mechanismen durch Variation der Proben-temperatur quantitativ bewertet werden.

Zur Optimierung der Dampferzeugerreinigung im Betrieb ist es sinnvoll die Signale der WSD-Messung zur Ansteuerung der Reinigungsgeräte zu nutzen. Wie die Ergebnisse zeigen, ist es bereits jetzt möglich anhand der Signale die Belagssituation und die Wirkung der Reinigungsmaßnahme quantitativ zu bewerten.

Um eine von dem jeweiligen Belagstyp abhängige Steuerung der Reinigungsgeräte zu realisieren, ist es erforderlich, die Zusammenhänge zwischen Materialeigenschaften, Temperatur und eingestellten Parametern der Reinigung durch weitere experimentelle Versuche sowie durch theoretische Modellierung der Wirkungsmechanismen fortzusetzen. Mit den dadurch gewonnen Informationen lässt sich anhand der im Stillstand aufgenommenen Belagssituation die Einstellung der Reinigungsparameter weiter optimieren.

## 5. Literatur

- [1] Krüger, S.: Wärmestromdichtemessung an Membranwänden von Dampferzeugern. Dissertation, TU Dresden. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2009

