

Assistenz- und Monitoringsystem zur intelligenten Kesselreinigung

Martin Pohl, Tao Wen, Lars Jentschke, Willi Nitschke, Joos Brell, Markus Richter, Stephan Taubner und Andreas Lichtinger

- 1. Einleitung 1
- 2. Thermodynamisches Bilanzmodell..... 2
- 3. Temperatursensorik 4
- 4. Bewertung der Reinigungseffizienz von Rußbläsern 6
- 5. Ergebnisvisualisierung mittels Webdashboard 8
- 6. Zusammenfassung und Ausblick..... 9
- 7. Quellen 10

1. Einleitung

Aus ökologischer, aber auch aus ökonomischer Sicht ist es erforderlich, eine hohe Energieeffizienz und eine hohe Verfügbarkeit bei der Strom- und Wärmeerzeugung in mit Brennstoff befeuerten Kraftwerken zu erzielen. Vor allem beim Einsatz von Biomasse, Ersatzbrennstoffen und Abfällen stehen diesen Zielen u. a. die Belagsbildung und das damit verbundene Korrosionspotential gegenüber.

Zurückzuführen ist die Belagsbildung und das damit verbundene Korrosionspotential zunächst auf die mineralischen Brennstoff-Bestandteile, wie z. B. Alkalien und Schwermetalle, welche sich durch niedrige Dampfdrücke auszeichnen und somit bevorzugt gasförmig freigesetzt werden können, aber auch zu niedrigen Erweichungstemperaturen der bei der Verbrennung entstehenden Aschen führen können. Zu berücksichtigen sind demnach auch die jeweils stattfindenden Prozesse bei der Verbrennung der jeweiligen Brennstoffe, abhängig von der Prozessführung und abhängig von den anlagenbedingten konstruktiven Randbedingungen.

Die sich durch Ablagerung der bei der Verbrennung freigesetzten, mineralischen Bestandteile bildenden Beläge behindern die Wärmeübertragung und führen zu einer Erhöhung der Abgasverluste und somit zu einer Verringerung der Energieeffizienz und der Verfügbarkeit. Die Verfügbarkeit kann insbesondere durch stattfindende Abzehrungen der Dampferzeugerheizflächen – infolge von Korrosionsangriffen durch die gebildeten Beläge – stark reduziert werden.

Zur Reduzierung der Belagsbildung und des damit verbundenen Korrosionspotentials haben sich verschieden wirkende Maßnahmen in der Praxis etabliert. Neben dem permanenten Schutz der Wärmeübertragungsflächen durch aufgetragene Schutzschichten (Auftragsschweißen) oder keramische Schutzsysteme (keramische Plattensysteme) sind auch temporär wirkende Abreinigungssysteme, wie z. B. Sprengreinigungs-, Wasch-, Blas-, Schall-, Rüttel-, Klopff-, Kugelregen-, Bürsten- und Impulsschusssysteme) in den Anlagen installiert.

Ebenfalls entwickelt wurden Werkzeuge [1] [2] [3] [4] [5] zur erweiterten Prozessüberwachung- und -optimierung (z. B. Online-Bilanzierung zur permanenten Ermittlung des Anlagen-Ist-Zustandes, Wärmestromdichtemessung und Hochtemperatur-Kamerasonden zur visuellen Überwachung). Diese dienen u. a. dazu, die aktuelle Kesselverschmutzung zu ermitteln bzw. Handlungsempfehlungen hinsichtlich der Kesselreinigung abzuleiten.

Der vorliegende Beitrag fasst die Methoden zusammen und demonstriert die Anwendung des Assistenz- und Monitoringsystems anhand ausgewählter Praxisbeispiele.

Erste Entwicklungen wurden im Rahmen eines Forschungsvorhabens im Kraftwerk Schkopau durchgeführt, welche im Rahmen des Kraftwerkkolloquiums 2020 vorgestellt wurden [6]. Diese werden hier um weitere Beispiele ergänzt.

2. Thermodynamisches Bilanzmodell

Ausgehend von technischen Dokumenten (Anlagenzeichnungen, R&I-Fließbildern, Mess-stellenliste) und Kesselbegehungen werden die Prozesseinheiten des thermodynamischen Bilanzmodells, insbesondere des Kessels, festgelegt. Das daraus abgeleitete Bilanzschema (Abbildung 1) enthält alle durch Massen-, Stoff- und Energieströme verknüpften Prozesseinheiten [1].

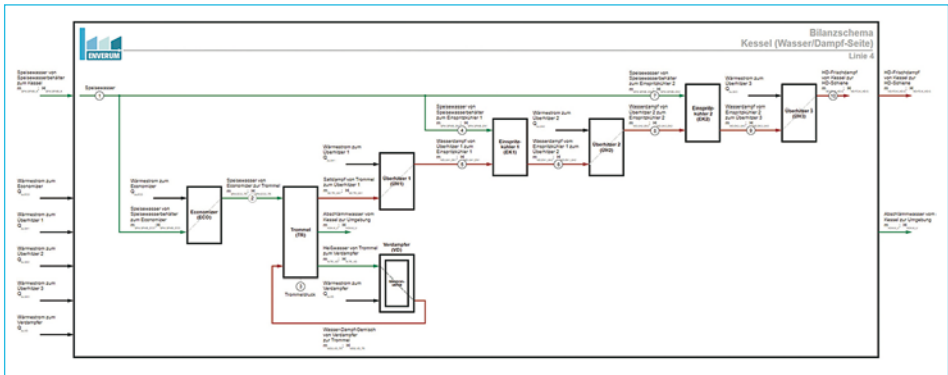


Abb. 1: Abgeleitetes Bilanzschema für einen Kessel zur thermischen Abfallbehandlung

Für jede Prozesseinheit werden die Massen-, Stoff- und Energiebilanzen formuliert. Basierend auf den Berechnungsgleichungen wurde ein Algorithmus abgeleitet, mit dem unbekannte Größen, hier v. a. die in den Heizflächen ausgekoppelten Wärmeströme, berechnet werden.

Nach erfolgreicher Überprüfung des Modells wird der Berechnungsalgorithmus in eine eigens entwickelte, anlagenspezifische Software überführt. Die zur Berechnung erforderlichen Prozessdaten werden mittels einer an das Prozessleitsystem angepassten Schnittstelle in die Software eingelesen und in einer Datenbankplattform gespeichert. Die Datenbankplattform ist die Grundlage für die webbasierte Visualisierung der Ergebnisse.

Auf Basis des thermodynamischen Bilanzmodells kann die globale Verschmutzung der verschiedenen Wärmeübertragungsflächen vom Verdampfer über die einzelnen Überhitzer bis zu den einzelnen Economizern des Dampferzeugers ermittelt werden (Abbildung 2). Anhand dieser Informationen kann die stattfindende Verschiebung der Wärmeübertragung visualisiert und bewertet werden.

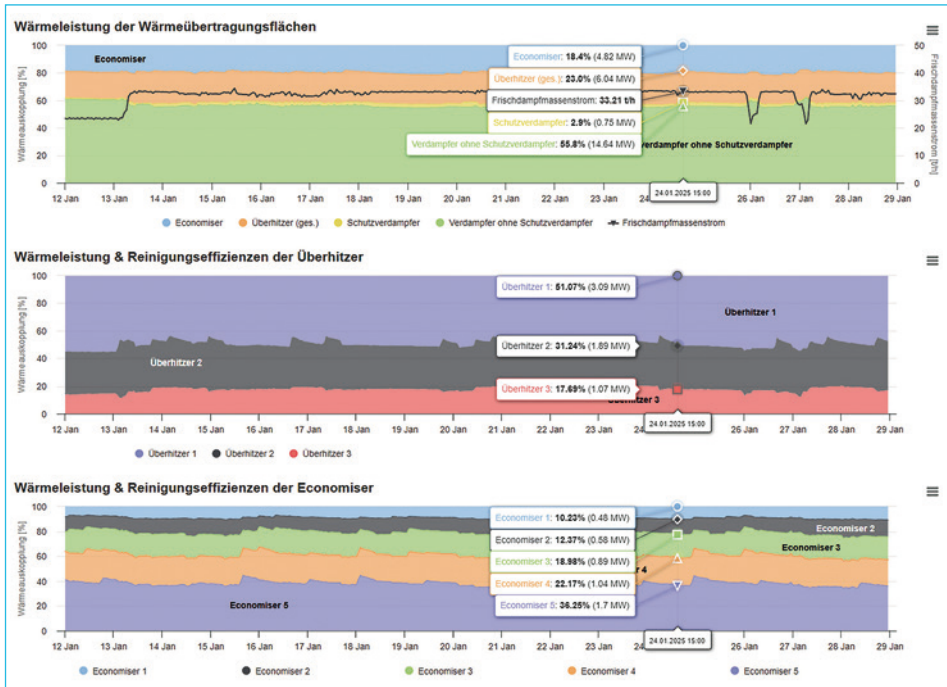


Abb. 2: Ergebnisse der Berechnungen des Kesselmodells

Nicht detaillierter darstellen lässt sich die Wärmeübertragung in den Verdampferheizflächen, da dort zu wenige messtechnische Stützgrößen in den meisten Anlagen verbaut sind. Das thermodynamische Bilanzmodell kann allerdings durch weitere Sensorik zur orts aufgelösten Ermittlung des Verschmutzungszustandes ergänzt werden.

3. Temperatursensorik

Das Messprinzip beruht auf der kontinuierlichen Erfassung der Temperaturen an Steg und Rohrscheitel der Membranwand bzw. der daraus resultierenden Temperaturdifferenz ΔT (Abbildung 3). Für unterkritische Dampferzeuger mit konstanter Siedewassertemperatur ist die Temperaturdifferenz unmittelbar proportional einer Wärmestromdichte. Eine ausführliche Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Temperaturdifferenz und Wärmestromdichte ist in [2], [3] und [4] erläutert.

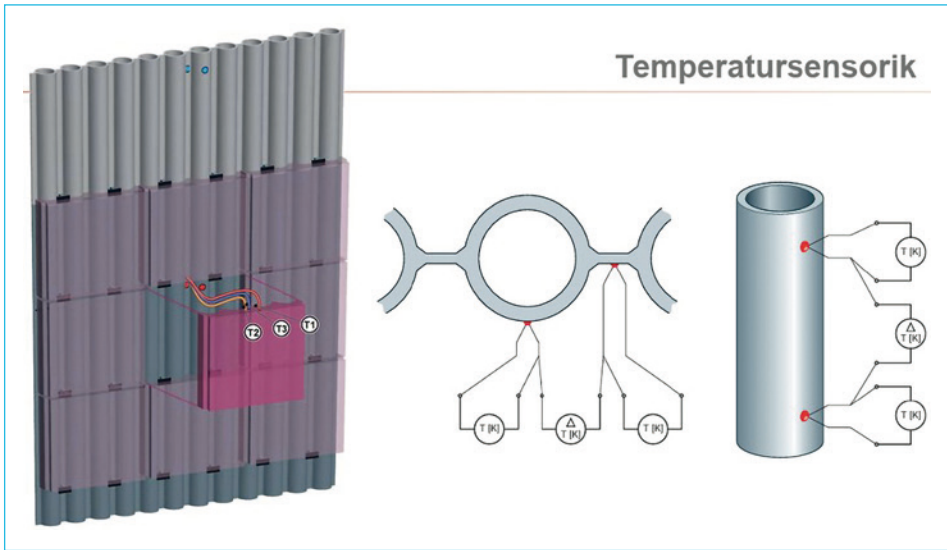


Abb. 3: CheMin-Tempersensensorik

Zur Beurteilung der lokalen Wärmeauskopplung wird die Sensorik bedarfsge-
recht hinsichtlich der Anzahl und des Ortes in der Anlage installiert. Unter Be-
rücksichtigung der bei Begehungen festgestellten örtlichen Gegebenheiten und
der jeweiligen Zielstellung wird das Messstellenkonzept realisiert.

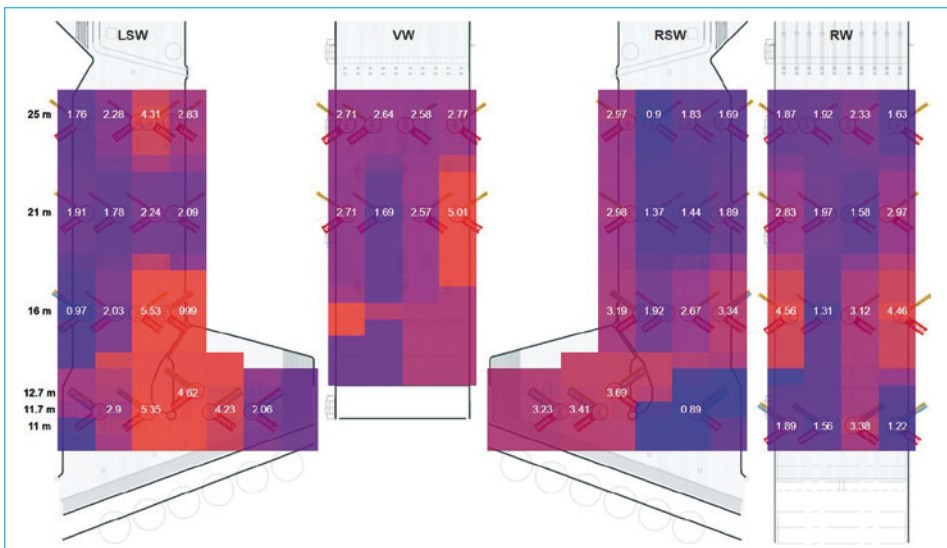


Abb. 4: Visualisierung der Wärmeauskopplung mittels zusätzlicher Sensorik

In Abbildung 4 ist ein Beispiel für eine Visualisierung der Messungen aus der zusätzlichen Sensorik dargestellt. Zu sehen ist der aufgespannte Kessel mit grafischer Hinterlegung der Temperatur-Differenz-Signale, welche von geringer Temperaturdifferenz (blau) bis hoher Temperaturdifferenz (rot) farblich hinterlegt sind.

Neben der Verschmutzung der Membranwände im ersten Zug können mit den Signalen Schiefagen der Feuerung, aber auch Rückschlüsse der Wärmeauskopplung über dem Rost in Verbindung mit dem derzeit verbrannten Abfall gezogen werden. Der Zusammenhang ist wieder in Verbindung mit dem weiter vorn vorgestellten thermodynamischen Modell möglich, welches ebenso den Heizwert und den derzeit verbrennenden Abfallmassenstrom online ermitteln kann (Abbildung 5).

Über dieser Zusammenhänge lassen sich Veränderungen der Wärmeübertragung durch Verschmutzung und durch Temperaturänderungen entkoppelt bewerten, worauf hier im weiteren jedoch nicht eingegangen wird.

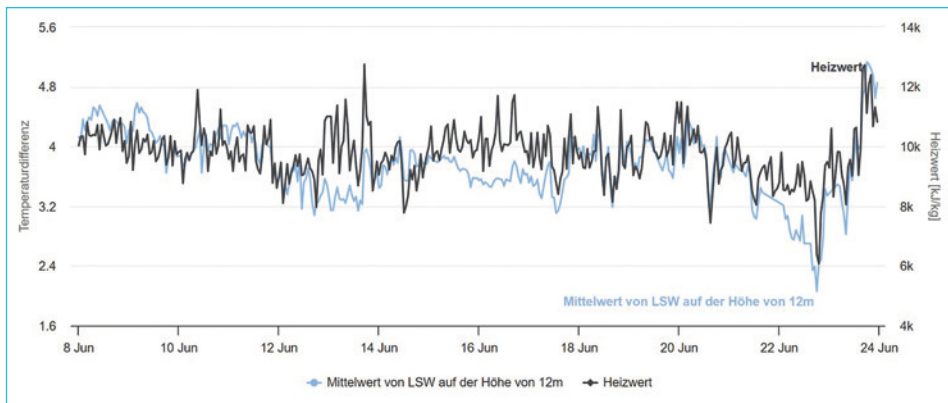


Abb. 5: Gegenüberstellung Heizwert und Temperaturdifferenz als Signal des übertragenen Wärmestroms

4. Bewertung der Reinigungseffizienz von Rußbläsern

Während die Bilanzierung eine Gesamtbewertung liefert, zeigt die zusätzliche Temperatursensorik bzw. die auf Grundlage dieser zusätzlichen ermittelbaren Größen (z. B. Wärmestrom, Wärmedurchgangskoeffizient) die Wirkung der Reinigung an einzelnen Messpositionen im Detail. So kann festgestellt werden, ob die Reinigung gleichmäßig wirkt, ob Teilbereiche unzureichend gereinigt werden oder ob die Funktion des Reinigungsapparates (z. B. Wasserbläser, Rußbläser, Explosionsgeneratoren) eingeschränkt wirkt bzw. optimiert werden kann bzw. muss.

Bei der Bewertung einzelner Reinigungsapparate ist es zielführend, zunächst die Reinigungswirkung anhand der zusätzlichen Signale zu erkennen und daraus eine Effektivität der Reinigung zu bestimmen.

In Abbildung 6 ist dazu ein Beispiel dargestellt. Im oberen Diagramm sind einzelne Rußbläser dargestellt, hervorgehoben ist dabei Rußbläser 7. Ersichtlich ist über das untere Diagramm, dass immer dann, wenn Rußbläser 7 in Betrieb ist, die Wärmeauskopplung von Economizer 5 (lila) sprunghaft ansteigt (sauberer Zustand). D. h. Rußbläser 7 reinigt Economizer 5.

Aus diesem Anstieg lassen sich die Kriterien Sauberkeit und Reinigungseffizienz (rotes Dreieck) ermitteln. Die Reinigungseffizienz bleibt in diesem Beispiel in etwa gleich groß. D. h. die Wärmeübertragung geht nach der Reinigung wieder auf den Ausgangswert (Kriterium Sauberkeit) zurück, entsprechend effektiv ist diese Reinigung. Würde das Signal nicht wieder auf den Ausgangspunkt (sauberer Zustand) zurückgehen, wäre die Reinigung entsprechend weniger effektiv, d. h. der ECO würde langsam verschmutzen.

Um diese Effekte für alle Rußbläser zu berücksichtigen, wurde ein Algorithmus entwickelt, der den Signalverlauf analysiert und die Kennwerte ableitet. Im Sinne eines Key Performance Index (KPI) liefert der Algorithmus die beiden Kennzahlen Sauberkeit und Reinigungseffizienz und entsprechend Hinweise auf den Zustand der Verschmutzung und die Effektivität des Rußbläfers.

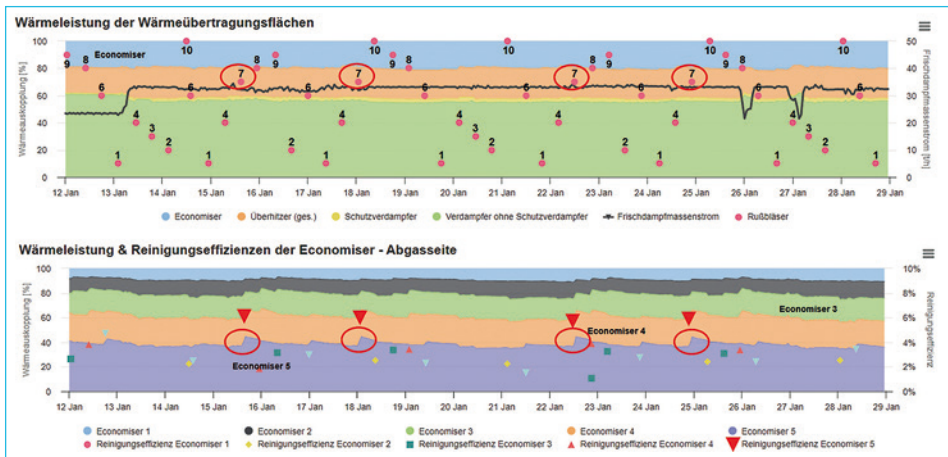


Abb. 6: Betrieb der Rußbläser und Wirkung auf die Wärmeübertragung

5. Ergebnisvisualisierung mittels Webdashboard

Eingebunden sind die zuvor genannten Methoden als Assistenz- und Monitoringsystem in einer anwenderfreundlichen Umgebung, bestehend aus einer Datenbank, in welcher alle benötigten Werte (Anlagenmesswerte, berechnete Werte aus thermodynamischem Modell und Messwerte der installierten Sensoren) gespeichert sind, und in Form eines Web-Dashboards zur Visualisierung der in Echtzeit ermittelbaren Ergebnisse (Abbildung 7).

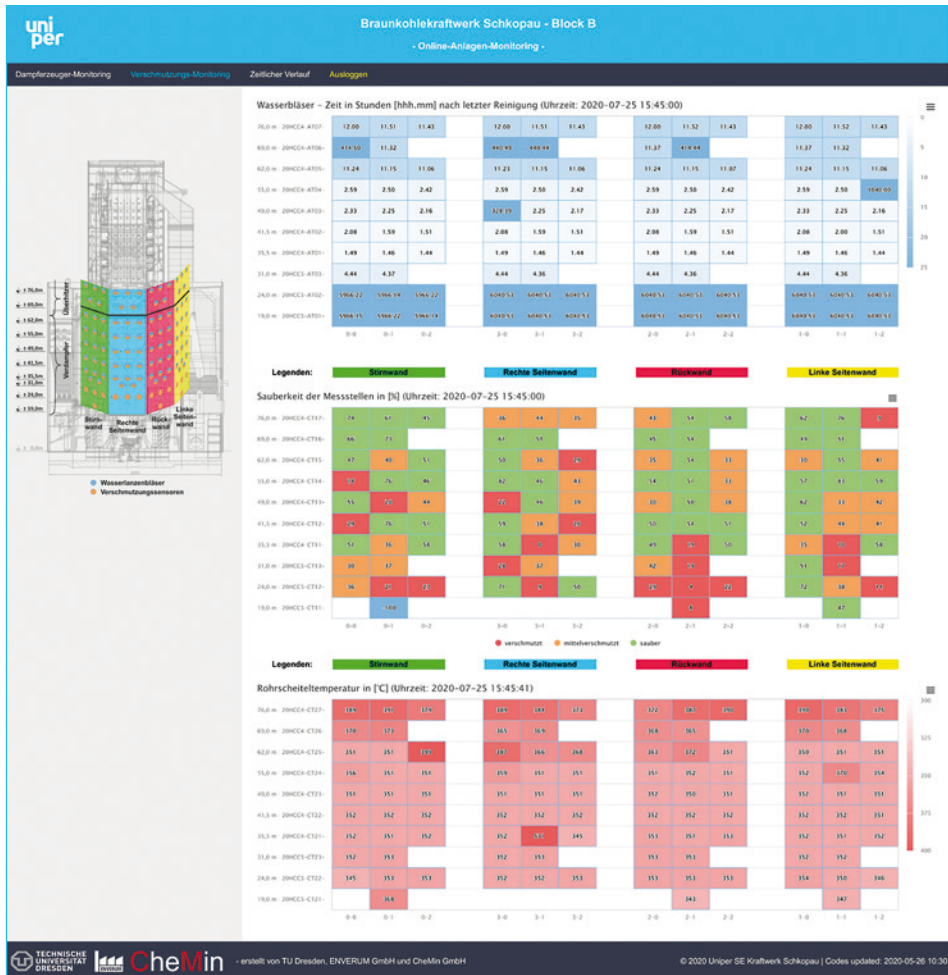


Abb. 7: Webdashboard Verschmutzungs-Monitoring am Beispiel Kraftwerk Schkopau

6. Zusammenfassung und Ausblick

Bei der Strom- und Wärmeerzeugung aus Biomasse, Ersatzbrennstoffen und Abfällen stellen Belagsbildung und Korrosion eine zentrale Herausforderung dar. Sie entstehen durch mineralische Brennstoffbestandteile (z. B. Alkalien und Schwermetalle), die bei der Verbrennung freigesetzt werden und zu Ablagerungen auf den Heizflächen führen. Dies verringert die Wärmeübertragung, erhöht die Abgasverluste und reduziert sowohl Effizienz als auch Verfügbarkeit der Anlagen.

Zur Reduzierung dieser Effekte werden verschiedene Maßnahmen eingesetzt:

- Schutzsysteme (z. B. Auftragsschweißen, keramische Platten),
- Abreinigungssysteme (z. B. Rußbläser, Spreng- und Waschreinigung, Schall- oder Klopfsysteme) sowie
- Überwachungs- und Optimierungswerkzeuge (thermodynamisches Bilanzmodell, Wärmestrommessungen, Hochtemperatursensorik, Kamerasonden).

Das thermodynamische Bilanzmodell von ENVERUM erlaubt eine Gesamtbeurteilung der Verschmutzung und Wärmeübertragung im Kessel. Ergänzend liefert die CheMin-Temperatursensorik detaillierte, orts aufgelöste Informationen über lokale Verschmutzungen und die Wirkung von Reinigungsapparaten. Daraus können Kennzahlen wie Sauberkeit und Reinigungseffizienz abgeleitet werden.

Alle Mess- und Berechnungsergebnisse werden in einem Web-Dashboard visualisiert. Dies ermöglicht eine gezielte und bedarfsgerechte Kesselreinigung, die Wirkungsgradverluste reduziert, den Verschleiß der Heizflächen minimiert und Fehlfunktionen der Reinigungsaggregate frühzeitig erkennbar macht.

7. Quellen

- [1] Pohl, M.; Wen, T.: *Modellbasierte Betriebsdatenanalyse zur Effizienzsteigerung – Verknüpfung von verfahrenstechnischem Modell und Sensor-Daten eines Kraftwerks*. In: Beckmann M., Hurtado A. (Hrsg.): KRAFTWERKSTECHNIK, 87–97, SAXONIA Standortentwicklungs- und verwaltungsgesellschaft mbH, Freiberg, ISBN: 978-3-934409-81-1, 2018.
- [2] Beckmann, M.; Krüger, S.; Spiegel, W.: *Charakterisierung und messtechnische Erfassung von betriebsspezifischen Wärmewiderständen an Membranverdampferwänden in Abfall und Biomasseverbrennungsanlagen*. In: Dampferzeugerkorrosion. Freiberg: SAXONIA Standortentwicklungs- und verwaltungsgesellschaft mbH, 2005, S. 273–288.
- [3] Krüger, S.: *Wärmestrommessung an Membranwänden von Dampferzeugern*. Dresden, TU Dresden, 2009.
- [4] Grahl, S.: *Charakterisierung von Ablagerungen an Membranwänden von Dampferzeugern*. Dresden, TU Dresden, 2013.
- [5] Schneider, D; Brell, J; Lichtinger, A; Müller, M; Riegel, F; *Luftgekühlte mobile Hochtemperatur-Kamerasonde zum flexiblen Einsatz in thermo-chemischen Prozessen*. In: Thiel, S; Thomé-Kozmiensky, E; Quicker, P; Gosten, A; Stengler, E (Hrsg.): Abfallwirtschaft und Energie, Band 2, Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, Neuruppin 2025, S. 371–405.
- [6] Pohl, M.; Wen, T.; Jentschke, L.; Kaiser, M.; Brell, J.; Spiegel, W.; Bernhardt, D.; Graube-Kühne, F.; Kehr, T.; Beckmann, M.; Geese, B.; Durwen, M. und Sauer, S. (2020): *Assistenz- und Monitoringsystem zur intelligenten Kesselreinigung im Kraftwerk Schkopau*. 52. Kraftwerktechnisches Kolloquium, 06.-07. Oktober, Dresden, In: Beckmann, M.; Hurtado, A. (Hrsg.): Kraftwerkstechnik 2020, Power Plant Technology, Freiberg: SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH, S. 623–632.