

Kaiser, M.; Brell, J.; Spiegel, W.; Pohl, M.; Wen, T.; Jentschke, L.;
Bernhardt, D.; Graube-Kühne, F.; Kehr, T.; Beckmann, M.;
Geese, B.; Durwen, M.; Sauer, S. (2020)

**Assistenz- und Monitoringsystem zur
intelligenten Kesselreinigung im Kraftwerk
Schkopau**

In: Beckmann, M. und Hurtado, A. (Hrsg.): Kraftwerkstechnik 2020
Power Plant Technology, Freiberg: SAXONIA Standortentwicklungs-
und -verwaltungsgesellschaft mbH, 2020
S. 623-632

Assistenz- und Monitoringsystem zur intelligenten Kesselreinigung im Kraftwerk Schkopau

Autoren:

CheMin GmbH, Augsburg:

Dipl.-Ing. (FH) Marie Kaiser, Dipl.-Ing. (FH) Joos Brell, Dr. Wolfgang Spiegel

ENVERUM Ingenieurgesellschaft für Energie- und Umweltverfahrenstechnik mbH, Dresden:

Dr. Martin Pohl, Dr. Tao Wen, Dipl.-Ing. Lars Jentschke

TU Dresden, Dresden:

Dr. Daniel Bernhardt, Dipl.-Ing. Franziska Graube-Kühne, Dipl.-Ing. Torsten Kehr,

Prof. Michael Beckmann

Uniper Kraftwerke GmbH, Schkopau:

Bernd Geese, Michael Durween, Dipl.-Ing. Sylvio Sauer

1.	Ausgangssituation und Zielstellung.....	1
2.	Thermodynamisches Bilanzmodell	2
3.	Sensorik zur orts aufgelösten Ermittlung des Verschmutzungs Zustandes und Signalanalyse.....	3
3.1.	Sensorik	3
3.2.	Signalanalyse und Kennzahlbestimmung	4
4.	Ergebnisvisualisierung mittels Webdashboard	6
5.	Zusammenfassung und Ausblick	8
6.	Quellen	9

1. Ausgangssituation und Zielstellung

In der Ausgangssituation erfolgt die Ansteuerung der Reinigungsapparate im Kraftwerk Schkopau nach meist subjektiven Gründen durch das Kraftwerkspersonal in einem vorgegebenen Zyklus (Zeitschaltuhr). In der Regel werden dabei die gesamten Strahlungs-Wärmeübertragungsflächen nach Ebenen unterteilt gereinigt.

Für die auf den Wärmeübertragungsflächen vorliegende ungleichmäßige Kesselverschmutzung ist diese Reinigungsstrategie jedoch nachteilig, da an gering bzw. nicht verschmutzten Stellen zu viel bzw. an stark verschmutzten Stellen zu wenig gereinigt wird. Daraus resultieren Beschädigungen der Siedewasserrohre, ein beschleunigter Verschleiß von Membranwandabschnitten und Wirkungsgradverluste, die einen relevanten Betriebskostenfaktor darstellen. Zur Optimierung der Reinigung der Wärmeübertragungsflächen empfiehlt sich daher eine intelligente Steuerung der Wasserbläser, die die tatsächliche lokale Verschmutzungssituation berücksichtigt.

Zur Ermittlung der lokalen Verschmutzungssituation wurde als Ansatz die thermodynamische Bilanzierung mit einer Sensorik zur orts aufgelösten Ermittlung des Sauberkeitszustandes kombiniert. Beide Komponenten werden bereits in Biomasse- und Abfallverbrennungsanlagen mit unterkritisch betriebenen Dampferzeugern zur Ermittlung der Verschmutzungssituation erfolgreich eingesetzt (z.B. [1] [2] [3] [4]). In Kraftwerken mit überkritischem Dampferzeuger liegt hingegen keine Praxiserfahrung vor, sodass eine maßgeschneiderte Lösung mit entsprechender Anpassung der Modelle und Sensorik zu entwickeln war.

Ziel des Forschungsprojektes war es, die Sensorik zur Ermittlung der orts aufgelösten Verschmutzungssituation sowie die thermodynamische Bilanzierung an die Gegebenheiten des Kraftwerks Schkopau anzupassen und auf Grundlage der daraus ableitbaren zusätzlichen Informationen ein Assistenz- und Monitoringsystem zu entwickeln und umzusetzen, sodass die Entwicklung der Verschmutzungssituation kontinuierlich überwacht und Handlungsempfehlungen zur Optimierung der Kesselreinigung ableitet.

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

2. Thermodynamisches Bilanzmodell

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

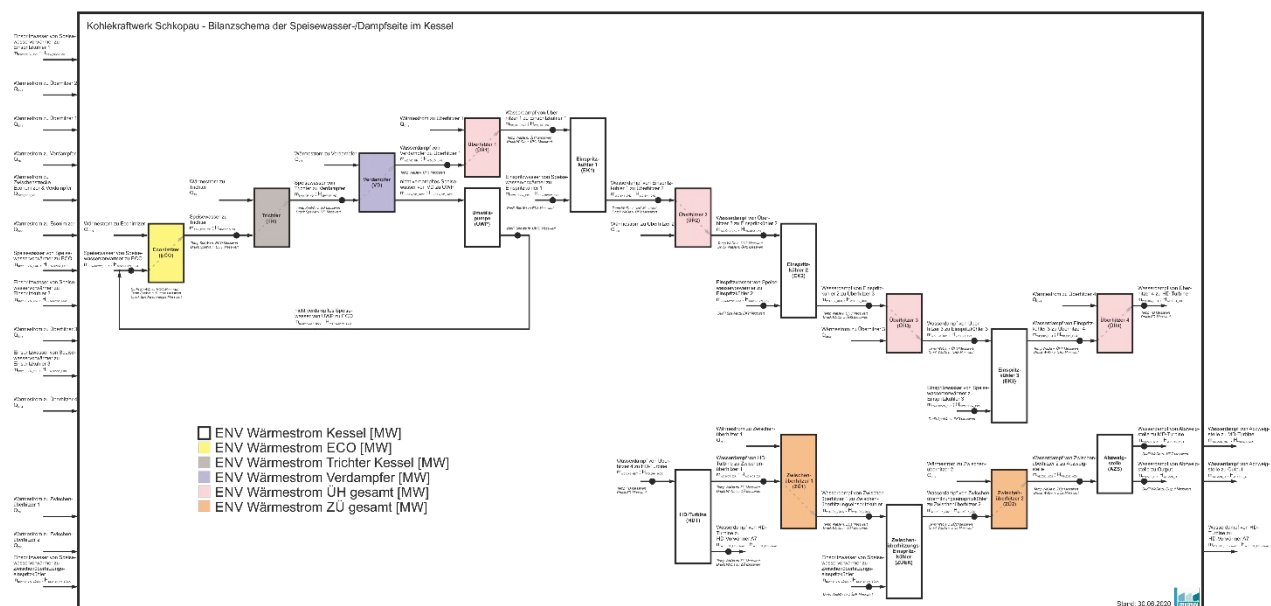


Abbildung 1: abgeleitetes Bilanzschema des Kessels für einen Block des Kraftwerks Schkopau.

Für jede Prozesseinheit wurden 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 wurde 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 spätere webbasierte Visualisierung der Ergebnisse.

Auf Basis des thermodynamischen Bilanzmodells kann die globale Verschmutzung der verschiedenen Wärmeübertragungsflächen des Dampferzeugers ermittelt werden. Aufgrund der ungleichmäßigen Kesselverschmutzung lassen sich daraus jedoch keine Aussagen zur lokalen Verschmutzungssituation ableiten. Das thermodynamische Bilanzmodell war daher durch eine geeignete Sensorik zur orts aufgelösten Ermittlung des Verschmutzungszustandes zu ergänzen.

3. Sensorik zur orts aufgelösten Ermittlung des Verschmutzungszustandes und Signalanalyse

3.1. Sensorik

Das Messprinzip beruht auf der kontinuierlichen Erfassung der Temperaturen an Steg und Rohrscheitel der Membranwand bzw. der daraus resultierenden Temperaturdifferenz ΔT . Für unterkritische Dampferzeuger mit konstanter Siedewassertemperatur ist die Temperaturdifferenz unmittelbar proportional einer Wärmestromdichte. Eine ausführliche Beschreibung des Zusammenhanges zwischen Temperaturdifferenz und Wärmestromdichte ist in [1] [5] [6] erläutert.

Im vorliegenden Fall eines überkritisch betriebenen Dampferzeugers ist die Fluidtemperatur im Verdampfer nicht konstant, sondern variiert in Abhängigkeit vom übertragenen Wärmestrom, der wiederum von den Belageigenschaften und der Last abhängig ist. Insofern ergibt sich der Wärmestrom und damit der Hinweis auf die Verschmutzungssituation nicht allein aus der Temperaturdifferenz, sondern aus der Verknüpfung von orts aufgelöster Temperatur, Temperaturdifferenz und Lastzustand bzw. der im Verdampferbereich ausgekoppelten Wärmemenge (thermodynamisches Modell). Daher bestand in dem Forschungsprojekt die Aufgabe, geeignete Algorithmen zur Abbildung der Zusammenhänge zwischen Temperaturdifferenz, Verschmutzung und Last zu entwickeln. Neben der Anbringung der Sensorik an dafür geeignete Stellen an der Membranwand waren daher auch neue Routinen zur Signalanalyse zu entwickeln.

Zur Beurteilung der lokalen Kesselreinigung sollte die Sensorik im Wirkbereich der Reinigungsaggregate installiert werden. Vor diesem Hintergrund sowie unter Berücksichtigung der bei Begehungen festgestellten örtlichen Gegebenheiten wurde das in Abbildung 2 dargestellte Messstellenkonzept realisiert.

Auf jeder Ebene werden die Signalleitungen der Sensoren in Schaltkästen zusammengefasst, die wiederum über Daten- und Stromversorgungsleitungen mit einem Datenerfassungs-PC verbunden sind, welcher die Daten in der Datenbankplattform speichert.

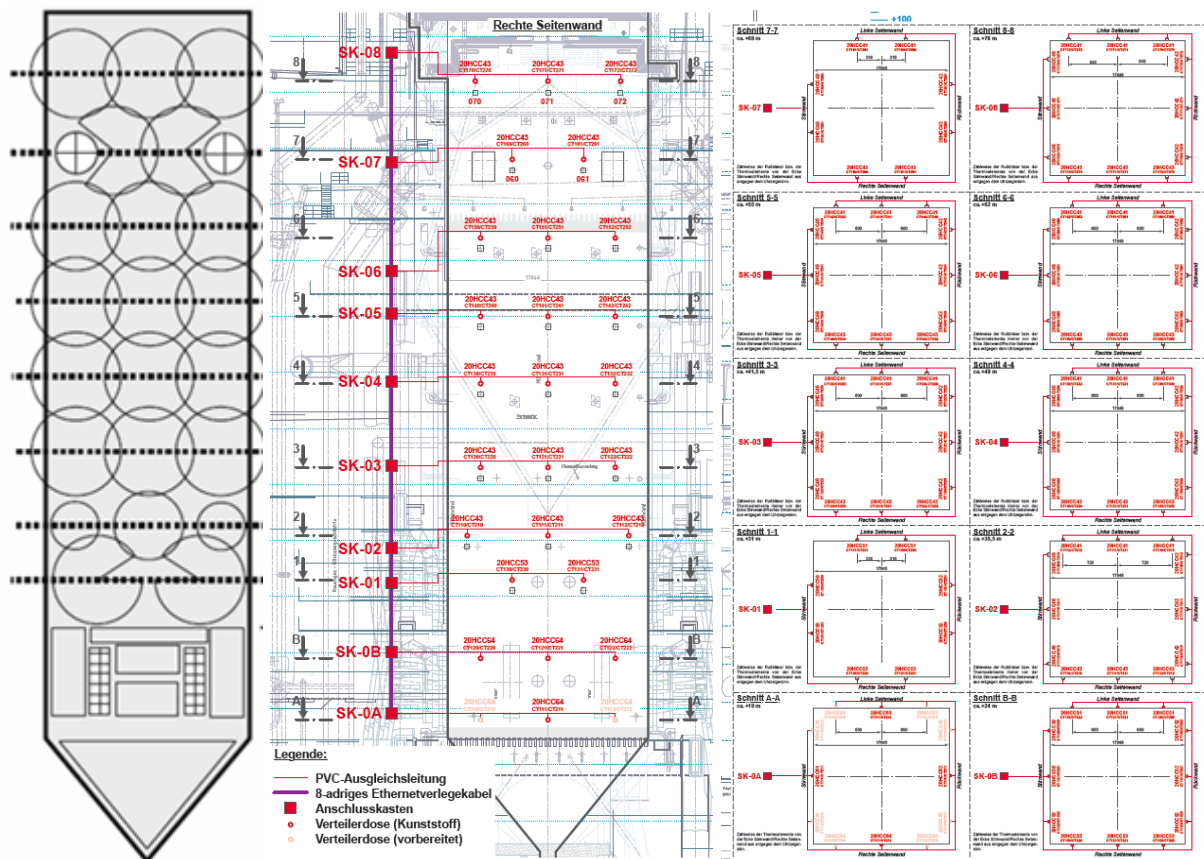


Abbildung 2: Reinigungsbilder der Reinigungsaggregate (links) und realisiertes Messstellenraster (rechts).

3.2. Signalanalyse und Kennzahlbestimmung

Wie Abbildung 3 zeigt, unterscheiden sich die aufgezeichneten Signalverläufe sowohl qualitativ als auch quantitativ. Ursächlich dafür sind unterschiedliche Lastzustände, Lastwechsel, Verschmutzung der Messposition sowie durch aktive und passive Reinigungs hervorgerufene Änderungen der Belagssituation. Aufgrund der großen Datenmengen und der Vielzahl an Einflussgrößen war ein automatischer Algorithmus zu entwickeln, der aus dem Signalverlauf die Verschmutzungssituation ermittelt. Wie erwähnt, mussten dabei die in überkritischen Dampferzeugern vorliegenden Zusammenhänge zwischen orts aufgelöster Temperatur, Temperaturdifferenz zwischen Steg und Rohrscheitel, Heizflächenverschmutzung und Last berücksichtigt werden.



Abbildung 3: Signalverläufe der ermittelten Temperaturdifferenzen je Seitenwand.

Zur Ableitung der neuen Signalanalyse zeigt Abbildung 4 den Signalverlauf exemplarisch für eine Messstelle in Abhängigkeit von dem mit dem thermodynamischen Bilanzmodell berechneten Dampfmassenstrom, und dem aus dem Prozessleitsystem aufgezeichneten Reinigungssignal (Wasserbläser an/aus). Daraus lassen sich folgende Interpretationen ziehen und Schlussfolgerungen ableiten:

1. Bei allen Reinigungen erfolgt im vorliegenden Beispiel eine sprunghafte Zunahme des Signals, die auf das Abreinigen des Belages zurückzuführen ist.
2. Je größer das Temperaturmaximum nach der Reinigung bei gleicher Last ist, umso „sauberer“ ist die Fläche.
3. Nach der Reinigung, d.h. dem Durchschreiten des Temperaturmaximums, nimmt der Verlauf stetig ab, was auf eine Zunahme der Verschmutzung zurückzuführen ist.
4. Im Teillastbetrieb ist die Signalabnahme flacher als im Vollastbetrieb, da die Fläche langsamer verschmutzt.
5. Je nach Verschmutzungszustand wirken sich darüber hinaus auch Lastwechsel auf das Signal aus. Bei gleicher Belagssituation ist der Signalwert bei höherer Last größer als bei Teillast.

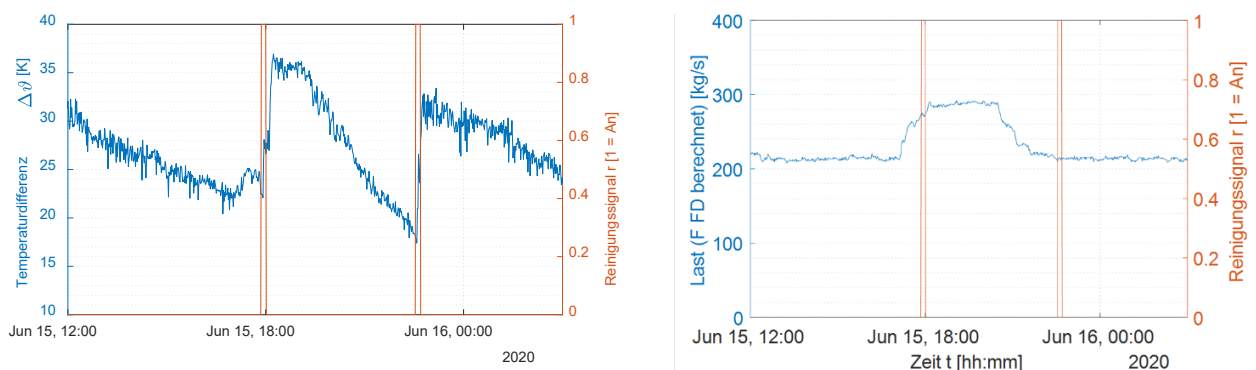


Abbildung 4: Signal Temperatur-Sensorik im Vergleich zum Lastverlauf und zur Reinigung.

Um diese Effekte zu berücksichtigen wurde ein Algorithmus entwickelt, der den Signalverlauf analysiert und Kennwerte ableitet, die mit dem aus dem thermodynamischen Bilanzmodell ermittelten Lastzustand verknüpft werden.

Im Sinne eines Key Performance Index (KPI) liefert der Algorithmus die beiden Kennzahlen Sauberkeit und Reinigungseffizienz, deren Verläufe beispielhaft in Abbildung 5 dargestellt sind. Quantitativ können beide KPIs nur Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Je größer der Wert, desto sauberer ist die Fläche bzw. umso effizienter war die Reinigung.

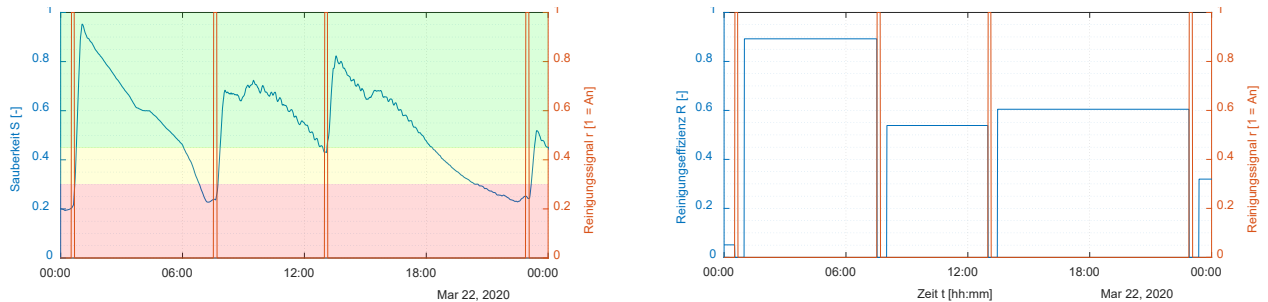


Abbildung 5: Verlauf von Sauberkeit und Reinigungseffizienz.

Um auf den ersten Blick eine einfache Bewertung der Verschmutzungssituation zu ermöglichen wurde das „Ampelprinzip“ umgesetzt. Dazu analysiert der Algorithmus über einen längeren Zeitraum die Signalverläufe mittels statistischer Methoden, und bestimmt daraus die Grenzen für die drei Bereiche „verschmutzt“, „mittel verschmutzt“ und „sauber“. Dass in Abschnitt 4 erläuterte Webdashboard zeigt den Verschmutzungszustand auf einen Blick in Form einer Heatmap und ermöglicht im Weiteren auch eine historische Auswertung der Verschmutzung des Dampferzeugers.

4. Ergebnisvisualisierung mittels Webdashboard

Um das Zusammenspiel der zuvor erläuterten Methoden als Assistenz- und Monitoringsystem in einer anwenderfreundlichen Umgebung umzusetzen wurde ausgehend von der Datenbank-Plattform, in welcher alle benötigten Werte (Anlagenmesswerte, berechnete Werte aus thermodynamischem Modell und Messwerte der installierten Sensoren) gespeichert sind, eine browserbasierte Lösung in Form eines Webdashboards (Abbildung 6) mit unterschiedlichen Tabs entwickelt.

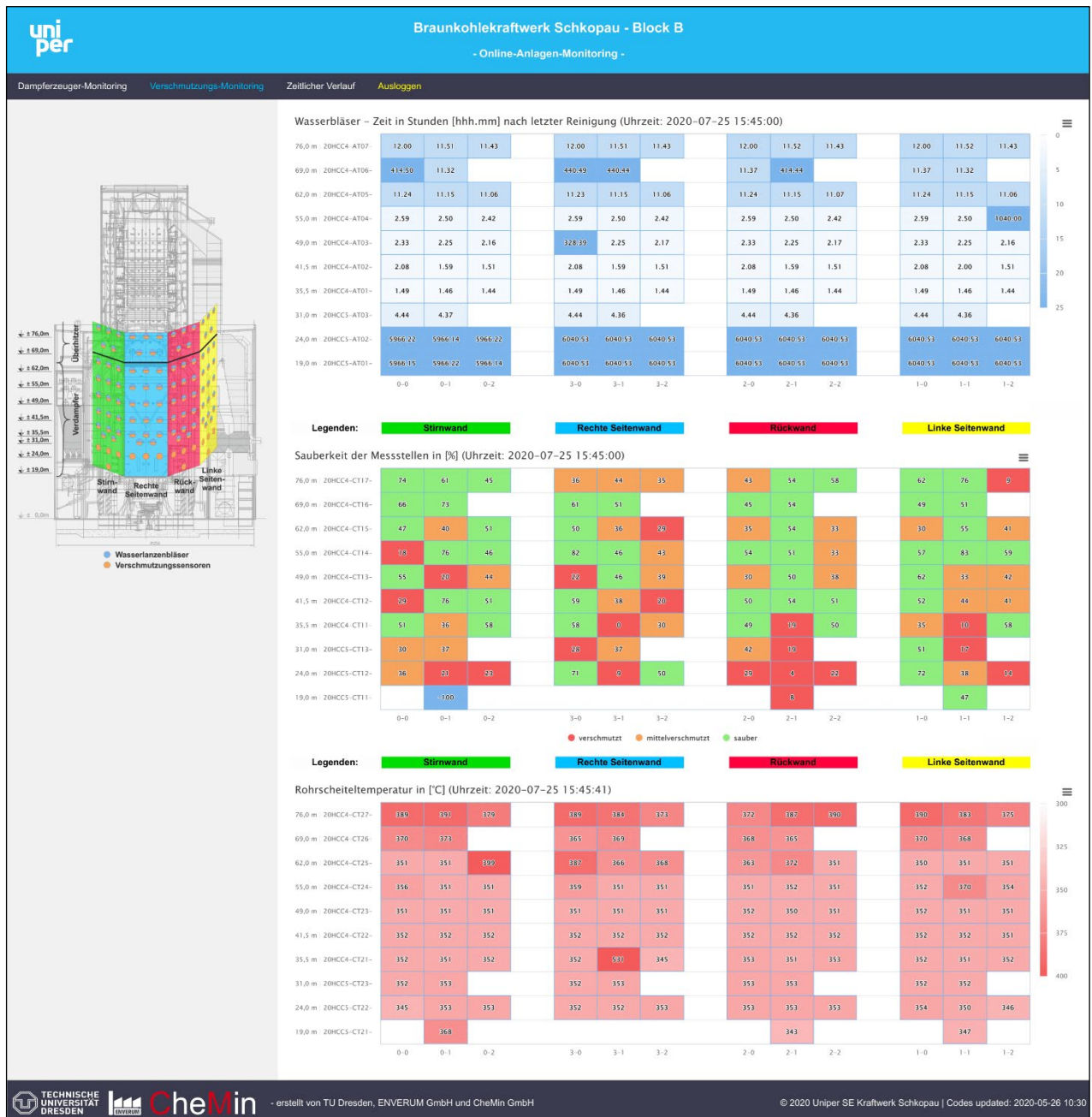


Abbildung 6: Webdashboard Tab: Verschmutzungs-Monitoring.

Das Webdashboard ist die Schnittstelle für den Anlagenfahrer. Neben dem Tab Dampferzeugermonitoring, in welchem die Leistungsverteilung der Wärmeübertragungsflächen (Economizer, Verdampfer, Überhitzer, Zwischenüberhitzer) dargestellt ist, wurde eine Tab für das Verschmutzungsmonitoring (Abbildung 6) entwickelt. Dieses zeigt den abgewickelten Kessel (4 Kesselwände), wobei unterschiedliche orts aufgelöste Daten in Form von Heatmaps dargestellt werden:

- Die oberen 4 Heatmaps zeigen die jeweilige Zeit nach der letzten Reinigung des zugehörigen Wasserbläfers an.
- Die mittleren 4 Heatmaps zeigen den Momentanwert der Sauberkeit und im Ampelprinzip den zugehörigen Verschmutzungszustand (sauber, mittelverschmutzt, verschmutzt).

- Die unteren 4 Heatmaps zeigen die Messwerte der Rohrwandtemperaturen der Temperatursensoren. Darüber lässt sich u.a. die Lage des Verdampfungspunktes ableiten.

Durch Auswahl eines Heatmap-Feldes erreicht man den in Abbildung 7 dargestellten zeitlichen Verlauf der ausgewählten Messstelle.



Abbildung 7: Webdashboard Tab zeitlicher Verlauf Messstelle.

Zur besseren Orientierung wird die Auswahlstelle hervorgehoben. Auf der rechten Seite sind drei Diagramme dargestellt:

- Frischdampfmassenstrom und Reinigungssignal des Wasserblägers,
- Temperaturverlauf der Rohrscheiteltemperatur der installierten Temperatur-Sensorik und
- Sauberkeit und Reinigungseffizienz.

Anhand der Darstellung von Abbildung 7 ist ersichtlich, dass die Wasserbläser nicht mehr wie in der eingangs erläuterten Ausgangssituation in einem vorgegebenen Zyklus (Zeitschaltuhr) in Betrieb genommen werden, sondern dass die Zeitabstände zwischen den Reinigungen jeweils verschmutzungsabhängig variieren und somit eine bedarfsorientierte Reinigung möglich ist.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Ausgehend von der bisherigen Kesselreinigung, die nach subjektiven und unspezifischen Gründen durch das Kraftwerkpersonal erfolgte, bei der entweder wenig verschmutzte Flächen zu häufig – erhöhter Verschleiß der Siedewasserrohre (Rohrreißer) – oder stark verschmutzte Flächen zu selten – Wirkungsgradverluste – gereinigt wurden, lassen sich nunmehr mit dem

installierten Assistenz- und Monitoringsystem lokale Kesselverschmutzungen detektieren, die dann gezielt durch die vorhandenen Wasserbläser gereinigt werden können. Im Gegensatz zur Ausgangssituation ermöglicht das neue System jetzt auch eine Bewertung der Reinigungswirkung, wodurch frühzeitig Fehlfunktionen der Reinigungsaggregate identifiziert und behoben werden können.

Ziel des Forschungsprojektes war die Entwicklung und Umsetzung eines Assistenz- und Monitoringsystems mit dem die lokale Verschmutzungssituation kontinuierlich überwacht wird und das darüber hinaus Handlungsempfehlungen zur Optimierung der Kesselreinigung liefert. Dazu wurde erstmals eine Kombination aus thermodynamischer Bilanzierung und einem Temperatursensorik-Netzwerk an einem Kraftwerk mit überkritischem Dampferzeuger in der Praxis realisiert. Aus den im entwickelten System ausgewerteten Mess- und Berechnungsdaten wird die lokale Verschmutzungssituation und die Effizienz der Reinigungsaggregate mittels der zwei Kennzahlen Sauberkeit und Reinigungseffizienz bewertet.

Die Anwendung des Systems in der Praxis zeigt, dass im Verdampfer- und Überhitzerbereich eine Reinigungsoptimierung mit den vorhandenen Mitteln zu erreichen ist, das über die Ansteuerung der Wasserbläser nur die verschmutzten Stellen behandelt werden.

Die Analyse der Verläufe von Sauberkeit und Reinigung zeigt darüber hinaus, dass nicht jede Reinigung einer verschmutzten Stelle zu einer Verringerung der Verschmutzung führt. Um dies zu erreichen, ist eine an die Belageigenschaften angepasste Reinigungsstrategie notwendig. Im Rahmen einer Dissertation [7] wird gerade ein sogenannter Belagssensor entwickelt, der das Signal des Wärmestromsensors mit Hilfe eines mathematisch-physikalischen Modells genauer ausgewertet um die Belageigenschaften abschätzen zu können. Ein weiterer Ansatz zur Optimierung der Reinigung betrifft die Auswertung aller Signalverläufe mittels Methoden des maschinellen Lernens, über die mit bloßem Auge nicht sichtbare Zusammenhänge zwischen Kohlequalität, Betriebsverhalten, Verschmutzung und Reinigung identifiziert und zur Optimierung herangezogen werden können. Auch hierzu werden gerade im Rahmen einer Dissertation [8] die erforderlichen Grundlagen gelegt.

Danksagung

Die Projektbeteiligten bedanken sich an dieser Stelle für die Förderung und Unterstützung des Forschungsvorhabens durch die Uniper Kraftwerke GmbH.

6. Quellen

- [1] 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.
- [2] Beckmann, M.; Rostkowski, S.: Optimierung von Biomasse- und Abfallverbrennungsanlagen durch Monitoring. In Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall – Band 7. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2010, S.3–18. ISBN 978-3-935317-46-7
- [3] Rostkowski, S.; Beckmann, M.; Tanner, N.: Optimierung der Online-Reinigung. In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M. (Hrsg.) Energie aus Abfall – Band 9. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2012, S. 337-344. ISBN 978-3-935317-78-8

- [4] 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.
- [5] Krüger, S.: Wärmestrommessung an Membranwänden von Dampferzeugern. Dresden, TU Dresden, 2009.
- [6] Grahl, S.: Charakterisierung von Ablagerungen an Membranwänden von Dampferzeugern. Dresden, TU Dresden, 2013.
- [7] Graube-Kühne, F.: Methode zur Online-Diagnose der Verschmutzungen von Dampferzeugermembranwänden. Dresden, TU Dresden, Einreichung 07/2020.
- [8] Kehr, T.: Reinigungsmonitoring und -optimierung in Dampferzeugern mittels maschinellen Lernverfahren. Dresden, TU Dresden, Einreichung 12/2020.