

KOSTENOPTIMIERTE MINDERUNG VON HOCHTEMPERATURKORROSION AM BEISPIEL EINES KOHLEBEFEUERTEN 230 MW BLOCKS

Eike Martensen, Annika Heyer, Midhat Sikira, Azra Čamdžić

1	HOCHTEMPERATURKORROSION IN KOHLEKRAFTWERKEN	2
2	METHODISCHE PROZESSOPTIMIERUNG	3
3	METHODISCHE PROZESSOPTIMIERUNG AM BEISPIEL KRAFTWERK KAKANJ	4
3.1	Voranalyse	5
3.2	Versuchsplanung und -durchführung	5
3.2.1	Kohlemassenstrom	5
3.2.2	Luftmengen	7
3.2.3	Rauchgas	7
3.3	Online-Validierungsbetrieb	8
4	ERGEBNISSE DER PROZESSOPTIMIERUNG	8
5	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	10
6	QUELLEN	10

Bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe kommt es häufig zu Verschmutzungen, Verschlackung und Hochtemperaturkorrosion, welche zu Kesselschäden, verkürzten Reisezeiten und damit zu hohen Kosten führen. Als Gegenmaßnahme werden aufwändige Umbauten (z.B. Brennermodifikationen, Beschichtung der Heizflächen etc.) durchgeführt oder kostenintensive Diagnose-Systeme angeschafft, mit denen nur die Auswirkungen, nicht aber die Ursachen der Korrosion betrachtet werden. Im Rahmen dieses Beitrags wird eine Methodik zur Prozessanalyse vorgestellt, die es ermöglicht mit geringem Aufwand die Ursachen eines Problems aufzudecken, kostenoptimierte Maßnahmen abzuleiten und deren Wirkung direkt am Prozess zu quantifizieren.

Am Beispiel der Hochtemperaturkorrosion im Kraftwerk Kakanj wird das Vorgehen dieser Methodik verdeutlicht und die Möglichkeiten zur Optimierung der Verbrennung aufgezeigt, die eine Reduzierung der Problematik und eine Verlängerung der Reisezeit ermöglichen. Durch Änderungen der Betriebsparameter (Primärmaßnahmen) wurden Reduzierungen der CO-Konzentration an den Kesselwänden um bis zu 80% und damit eine deutliche Minderung der Korrosionsneigung erreicht. Dieses Anwendungsbeispiel verdeutlicht, wie durch die

beschriebene Methodik Prozessverbesserungen erreicht werden können, die eine kostengünstige Alternative zu Umbaumaßnahmen darstellen. Aufgrund des allgemeinen Charakters kann dieses systematische Vorgehen auf eine Vielzahl von Problemstellungen angewendet werden, große Einsparpotentiale aufdecken und aufwändige Eingriffe in den Prozess bewerten.

1 HOCHTEMPERATURKORROSION IN KOHLEKRAFTWERKEN

Korrosion allgemein ist definiert als „die Reaktion eines metallischen Werkstoffs mit seiner Umgebung, die eine messbare Veränderung des Werkstoffs bewirkt und zu einer Beeinträchtigung der Funktion eines mechanischen Bauteiles oder eines ganzen Systems führen kann“ [1]. Im Gegensatz zu Nasskorrosion, wie z.B. Rosten, findet Hochtemperaturkorrosion bei höheren Temperaturen statt und der Werkstoff reagiert mit der umliegenden Atmosphäre ohne vorhandene wässrige Elektrolytmedien [2].

Bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe kommt es häufig zu Verschmutzung, Verschlackung und Hochtemperaturkorrosion, welche zu Kesselschäden, verkürzten Reisezeiten und damit hohen Kosten führen [3]. Die Ursache für Korrosionen in Dampferzeugern sind häufig hohe lokale CO Konzentrationen, die die Oxidschutzschicht des Metalls abbauen und so die Korrosion ermöglichen [4]. Aggressive Rauchgase wie Chlor und Chlorwasserstoffe können ohne eine Schwächung der natürlichen Schutzschicht den Werkstoff nicht angreifen [4]. Anders als bei Korrosion durch heiße Rauchgase können bei Verschmutzungen und Verschlackungen Salzschnmelzen die Schutzschicht direkt angreifen [3]. Verfahrenstechnische Maßnahmen sind bei dieser Art der Korrosion Verringerung der Verschlackung durch Prozessführung, Reinigung der Heizflächen und Reduzierung der Dampfparameter [5].

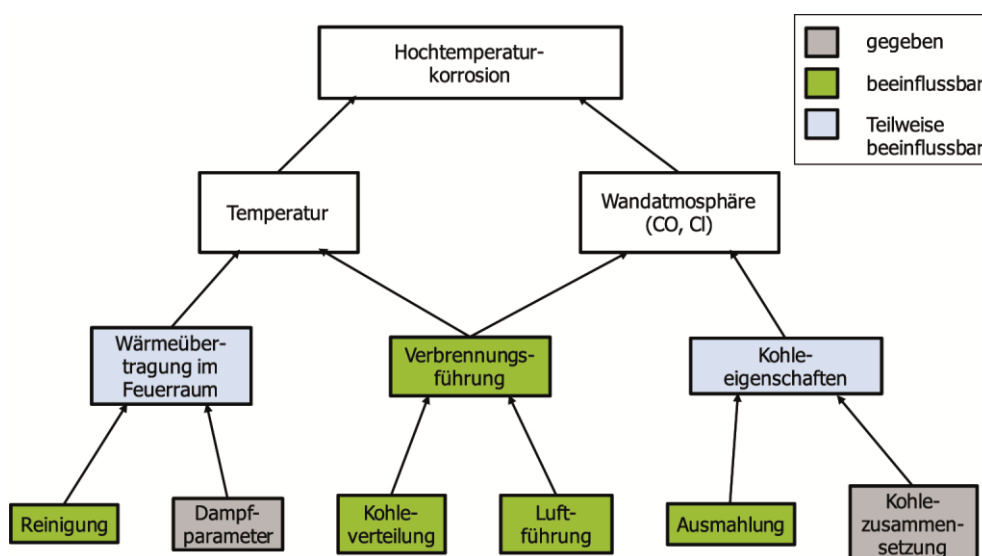


Abb. 1: Einflussgrößen und Mechanismen der Hochtemperaturkorrosion

Die möglichen Maßnahmen gegen Korrosionen sind aufgrund der unterschiedlichen Mechanismen abhängig von der jeweiligen Korrosionsstelle und den vorliegenden Umgebungsbedingungen und Eingriffsmöglichkeiten [6]. In Abbildung 1 sind die prinzipiellen Zusammenhänge der Hochtemperaturkorrosion bei der Kohleverbrennung dargestellt.

Farblich hervorgehoben ist jeweils, ob Einflussgrößen zur Korrosionsminderung verändert werden können oder durch Randbedingungen festgelegt sind. Die Temperatur der Wärmeübertragungsrohre ist im Wesentlichen durch die Dampfparameter festgelegt und wird in geringem Maße über die Reinigung der Heizflächen beeinflusst [3, 4]. Die chemische Zusammensetzung des Rauchgases und der Verschlackungen sind größtenteils durch die verwendete Kohle festgelegt [3]. Die Wandatmosphäre kann durch eine verbesserte Verbrennungsführung und erhöhte Ausmahlung hinsichtlich der Korrosionsneigung verbessert werden, indem die lokalen CO-Emissionen verringert werden [4]. Generell ist eine möglichst homogene Verbrennung anzustreben, um eine geringe Verschlackung mit geringen lokalen CO-Emissionen zu erreichen [4]. In unterstöchiometrischen Verbrennungsbereichen sollte ausreichend Luft für die Wandbereiche vorgesehen werden, um hohe CO-Konzentrationen zu vermeiden [7].

2 METHODISCHE PROZESSOPTIMIERUNG

Um gezielt der Hochtemperaturkorrosion im Kraftwerk Kakanj entgegenzuwirken, wurde die folgende systematische Herangehensweise verwendet.

1. **Voranalyse** - Identifikation potentieller Ursachen und Gegenmaßnahmen
2. **Versuchsplanung und –durchführung** - gezielte Identifikation von Schwachstellen und Problemen unter Einsatz mobiler Online-Messtechnik
3. **Online-Validierungsbetrieb** - Ableitung möglicher Maßnahmen und Online-Überprüfung der Wirkung am realen Prozess
4. **Auswertung der Prozessoptimierung** - Abschließende Benennung und Bewertung der Maßnahmen

Im ersten Schritt erfolgt eine Auswertung historischer Prozessdaten, Strukturinformationen und der verwendeten Regelungsstrategien. Dabei finden sowohl modellbasierte als auch statistische Auswertungstools Anwendung und werden unterstützt durch die Datenmanagementsoftware EU-MDM. Diese Datenanalysemethoden ermöglichen es eine Vielzahl von zusätzlichen Erkenntnissen aus den historischen Daten zu gewinnen, wie z.B. die Plausibilisierung von Messdaten mit Hilfe redundanter Informationen oder die Bestimmung fehlender Prozessmessgrößen durch die Nutzung physikalisch basierter Modelle (virtuelle Sensorik). Insbesondere können auch große Datenmengen verarbeitet werden sowie dynamische Effekte und Regelungsprobleme Beachtung finden. Diese erste Bewertung des Prozesszustandes liefert Hinweise auf mögliche Probleme des Prozesses und zusammen mit theoretischem Hintergrundwissen werden fundierte Vermutungen hinsichtlich der Ursachen und Lösungsmöglichkeiten aufgestellt.

Aufbauend auf den erhaltenen Ergebnissen erfolgt eine gezielte Versuchsplanung, deren Ziel die Aufnahme zusätzlicher Informationen zur Überprüfung der vermuteten Problemursachen ist. Die individuell zugeschnittenen Versuche werden selektiv mit mobilen Online-Messtechniken wie Luft- und Kohlemassenstrombestimmung, Korngrößenverteilung oder mehrdimensionalen Temperaturmessungen unterstützt.

Nach der Verifikation der aufgestellten Annahmen werden die Effekte möglicher Maßnahmen abgeschätzt und die Wirkung am realen Prozess überprüft. Eine parallel erfolgende Auswertung der Versuchsdaten führt durch neu gewonnene Erkenntnisse in einem iterativen Prozess zur Optimierung der getesteten Maßnahmen.

Eine abschließende Auswertung der Messkampagne liefert eine strategische Planung von Maßnahmen für zukünftige Prozessverbesserungen unter Betrachtung der Wirksamkeit und Kosten. Diese Maßnahmen können sowohl verfahrenstechnisch als auch konstruktiv sein.

3 METHODISCHE PROZESSOPTIMIERUNG AM BEISPIEL KRAFTWERK KAKANJ

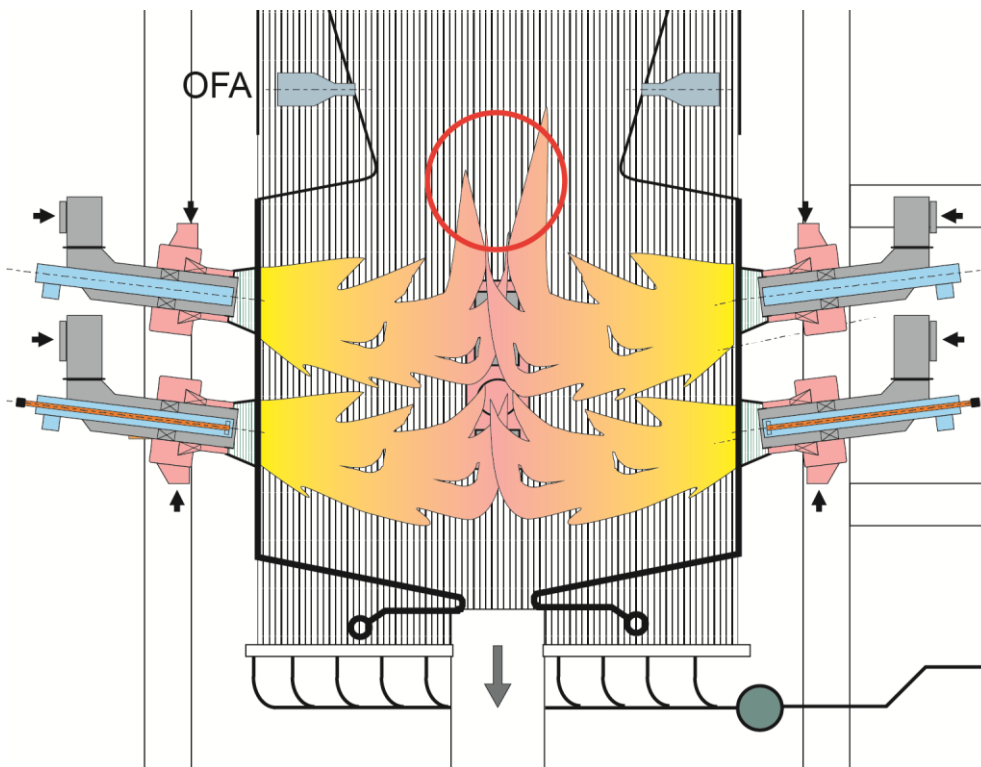


Abb. 2: Brennkammer mit hervorgehobener Korrosionsstelle, KW Kakanj, Bosnien Herzegowina

Das Beispiel dieser Studie ist ein kohlebefeuerter 230 MW Block (TE Kakanj, Bosnien Herzegowina). Der Dampferzeuger mit Schmelzkammerfeuerung verwendet acht Schlagradmühlen, die die Kohle mit einem Heizwert von ca. elf bis zwölf MJ/kg ohne Rauchgasrücksaugung trocknen. Die Kohle wird auf zwei Ebenen in einer Boxerfeuerung verbrannt. Der Kessel wurde nachträglich um eine ABL-Ebene und Wandluftdüsen erweitert. Das akuteste Problem des Dampferzeugers ist die Hochtemperaturkorrosion und die damit einhergehende Verringerung der Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit des Kraftwerks. Die Korrosion tritt an den Seitenwänden der Boxerfeuerung zentral oberhalb der Einschnürung der Schmelzkammer auf, wie in Abbildung 2 zur Verdeutlichung dargestellt.

3.1 VORANALYSE

An den Korrosionsstellen liegt eine unterstöchiometrische Verbrennung aufgrund der Luftstufung vor. Eine ungleichmäßige Kohleverteiling mit höheren Kohlemengen auf den Seitenwandbrennern würde das Luftverhältnis noch weiter absenken und zu hohen CO-Emissionen an den Korrosionsstellen führen, die die Oxidschutzschicht abbauen und die Korrosion ermöglichen. Es liegt daher die Vermutung nahe, dass niedrige Luft-Brennstoff-Verhältnisse an den äußeren Brennern die Ursache für die Korrosion sind. Ein weiterer möglicher Einfluss ist die Verschlackung durch unverbrannte Bestandteile infolge von Wandberührungen der Flamme oder zu grober Ausmahlung der Kohle [4].

Bei einer ersten Auswertung der Daten konnten große Unterschiede zwischen der linken und rechten Seite des Kessels in Bezug auf die Emissions- und O₂-Überschuss-Werte identifiziert werden. Dieses Ungleichgewicht zeigte starke Abhängigkeit von der aktuellen Mühlenkonstellation, obwohl alle Mühlen mit gleichem Luft-Brennstoff-Verhältnis betrieben wurden. Dieses Phänomen weist auf eine ungleichmäßige Verbrennung hin. Außerdem zeigte sich eine Diskrepanz zwischen gemessenem und aus Kohlemenge und elektrischer Leistung berechnetem Heizwert – ein Indiz für fehlerhafte Messwerte.

Fehlende Eingriffsmöglichkeiten auf Stellgrößen zeigen technische Grenzen eines Prozesses auf und können die ordnungsmäßige Funktion der Regelung behindern. Außerdem spiegelt der vorhandene Spielraum das Potential für Prozessverbesserungen wieder. Zur Beeinflussung des Luft-Brennstoff-Verhältnisses an den Brennern war im betrachteten Fall sowohl an den automatisierten Gesamtluftklappen als auch an den manuellen Klappen in den Luftleitungen zu den einzelnen Brennern noch Spielraum vorhanden.

3.2 VERSUCHSPLANUNG UND -DURCHFÜHRUNG

Das festgestellte Ungleichgewicht der Verbrennung und die auftretende Hochtemperaturkorrosion können ihre Grundursache in fehlerhaften Luft- oder Kohlemessungen oder einer ungleichmäßigen Kohleverteiling haben. Es wurden daher zusätzliche Luft- und Kohlemessungen in der zweiwöchigen Messkampagne durchgeführt, um die Messungen zu überprüfen und die Luft-Brennstoff-Verhältnisse an allen Brennern zu bestimmen (siehe Kapitel 3.2.1 & 3.2.2).

Zur Bestätigung der Annahme, dass hohe CO-Emissionen die Ursache für die auftretenden Korrosionsschäden sind, werden die Emissionen und die Temperaturen an den Korrosionsstellen gemessen. Zusätzlich kann mit diesen Messungen die Effektivität von Prozessänderungen validiert werden (siehe Kapitel 3.2.3).

3.2.1 Kohlemassenstrom

Die Erfassung der Kohlemassenströme erfolgte mittels eines mobilen mikrowellenbasierten Messsystems (EUcoalflow), das kontinuierliche Online-Kohlemengen einzelner Leitungen liefert. Die drei Leitungen einer Mühle wurden dafür mit jeweils 5 Sensoren ausgestattet (Abbildung 3) und die Mühle in unterschiedlichen Lastpunkten betrieben. Auf diese Weise wurden nacheinander alle Mühlen vermessen.

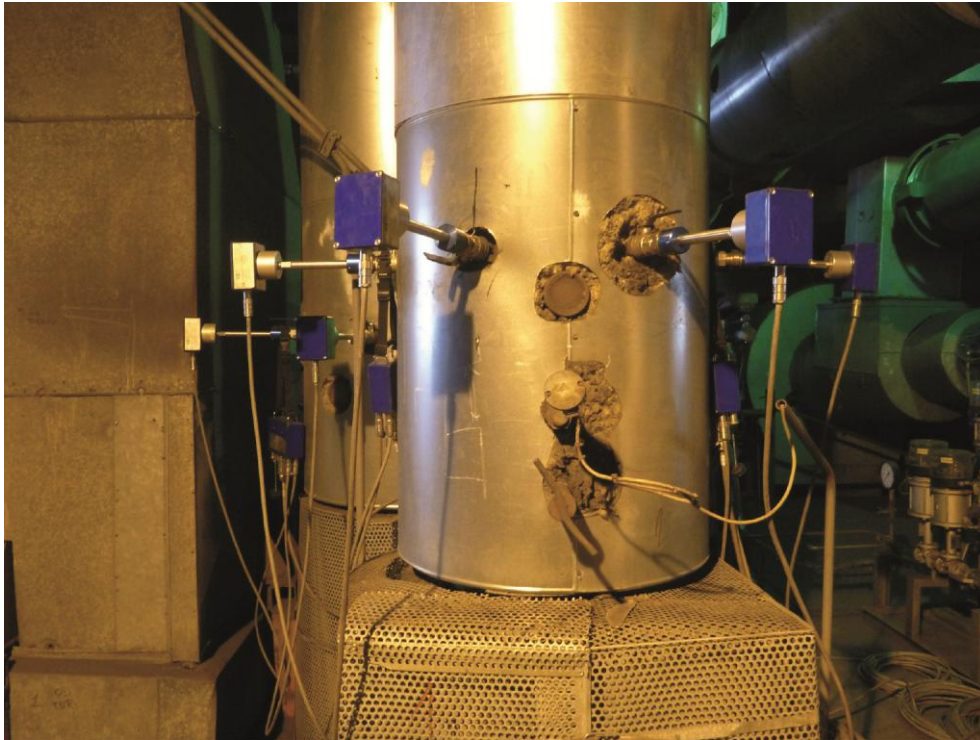


Abb. 3: Aufbau des mikrowellenbasierten Kohlemassenstrommesssystems

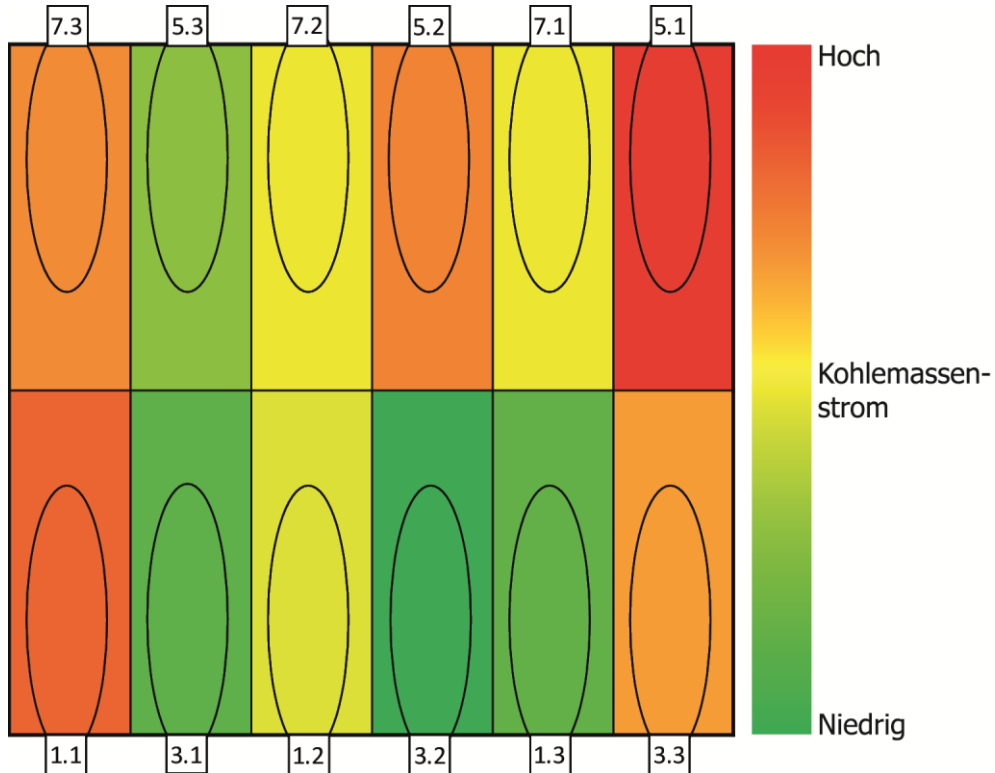


Abb. 4: Kohlemassenstromverteilung – Obere Brennerebene, 45% Zuteilerlast

Das Ergebnis dieser Messungen ist eine Momentaufnahme der Kohlemassenströme aller Brenner bei unterschiedlichen Zuteilerlasten. In Abbildung 4 ist die Verteilung für die obere

Brennerebene im oberen Lastpunkt von 45 % Zuteilerlast dargestellt. Es ist eine klare Ungleichverteilung mit deutlich höherem Kohlemassenstrom auf den äußeren Brennern zu erkennen.

3.2.2 Luftmengen

Die Überprüfung der Gesamt-Luftmengenmessungen pro Mühle wurde mit Hilfe von Prandtl-Messungen durchgeführt und zeigte keine auffällige Differenz zwischen Prandtl-Messungen und vorhandener Messtechnik.

Zur Bestimmung der Luft-Brennstoff-Verhältnisse an jedem Brenner wurden die Einzellüfte der Brenner benötigt, an denen keine physikalischen Sensoren vorhanden waren. Um diese Einzellüfte zu bestimmen wurde der Ansatz der virtuellen Sensorik verwendet, welcher über ein modellgestütztes Widerstandsnetzwerk die Volumenströme mit Hilfe vorhandener Messgrößen, u.a. den Klappenstellungen, berechnet. Abbildung 5 zeigt die resultierende Luftverteilung für die obere Brennerebene bei 45 % Zuteilerlast. Im Vergleich zu Abbildung 4 wird deutlich, dass von den äußeren Brennern mit hohem Massenstromanteil nur Brenner 5.1 auch entsprechend mehr Luft bekommt. Eine nähere Betrachtung der Luftverhältnisse der Brenner erfolgt in Kapitel 3.3.

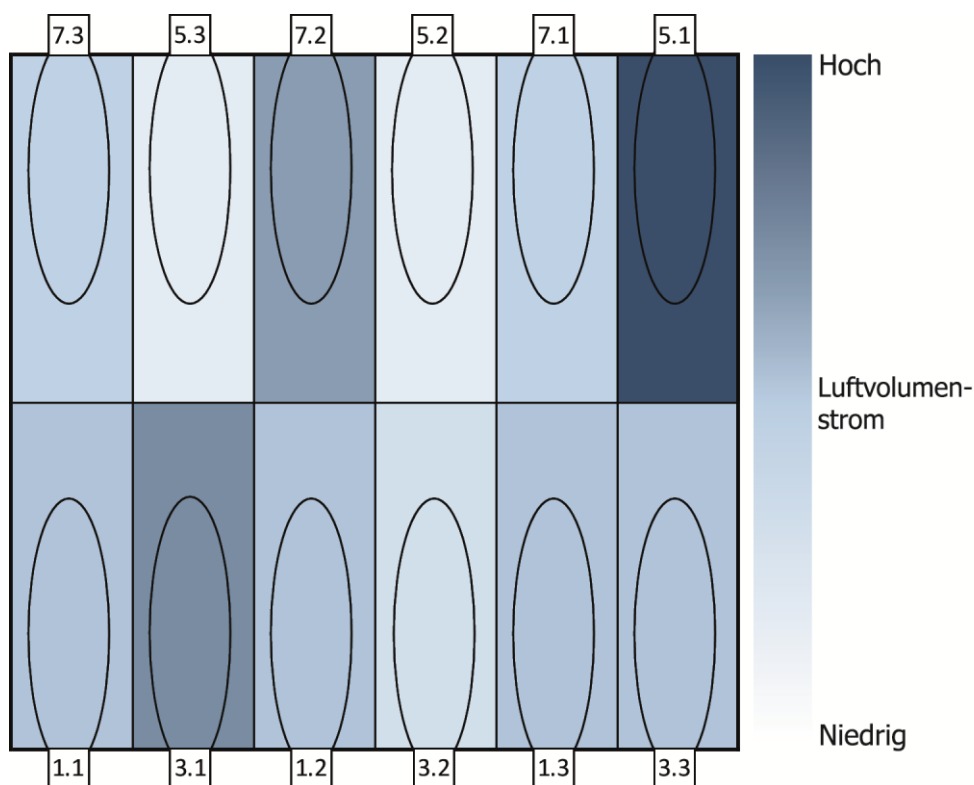


Abb. 5: Sekundärluftverteilung – Obere Brennerebene, 45% Zuteilerlast

3.2.3 Rauchgas

Zur Überprüfung der Ursache der Korrosion wurden an den betroffenen Stellen Temperatur- und Emissionsmessungen des Rauchgases vorgenommen.

Die gemessenen CO-Werte lagen mit über 11.000 ppm außerhalb des Messbereichs der verwendeten Ausrüstung (vgl. Abbildung 7). Die Temperaturen lagen bei ca. 1.500 °C mit geringer Variation von ca. +/- 40 °C auch bei sehr starken Prozessunterschieden. Diese Messergebnisse bestätigen die Annahme, dass die Ursache für die Hochtemperaturkorrosion hohe lokale CO-Emissionen sind.

3.3 ONLINE-VALIDIERUNGSBETRIEB

Die Luft-Brennstoff-Verhältnisse an den Brennern weisen deutliche Unterschiede auf, wobei insbesondere die äußeren Brenner ein fettes Gemisch besitzen (vgl. Abbildung 6 unten links). Zur Verringerung der Korrosion und zur Homogenisierung der Verbrennung wurde im Versuchsbetrieb eine Anpassung der Sekundärlüfte vorgenommen. Die Anpassung der manuellen Luftklappen in den Sekundärluftkanälen erfolgte entsprechend der gemessenen Kohlemengen an den einzelnen Brennern (vgl. Abbildung 6 oben). Die sich ergebende, signifikant verbesserte Verteilung der Luft-Brennstoff-Verhältnisse ist in Abbildung 6 unten rechts dargestellt.

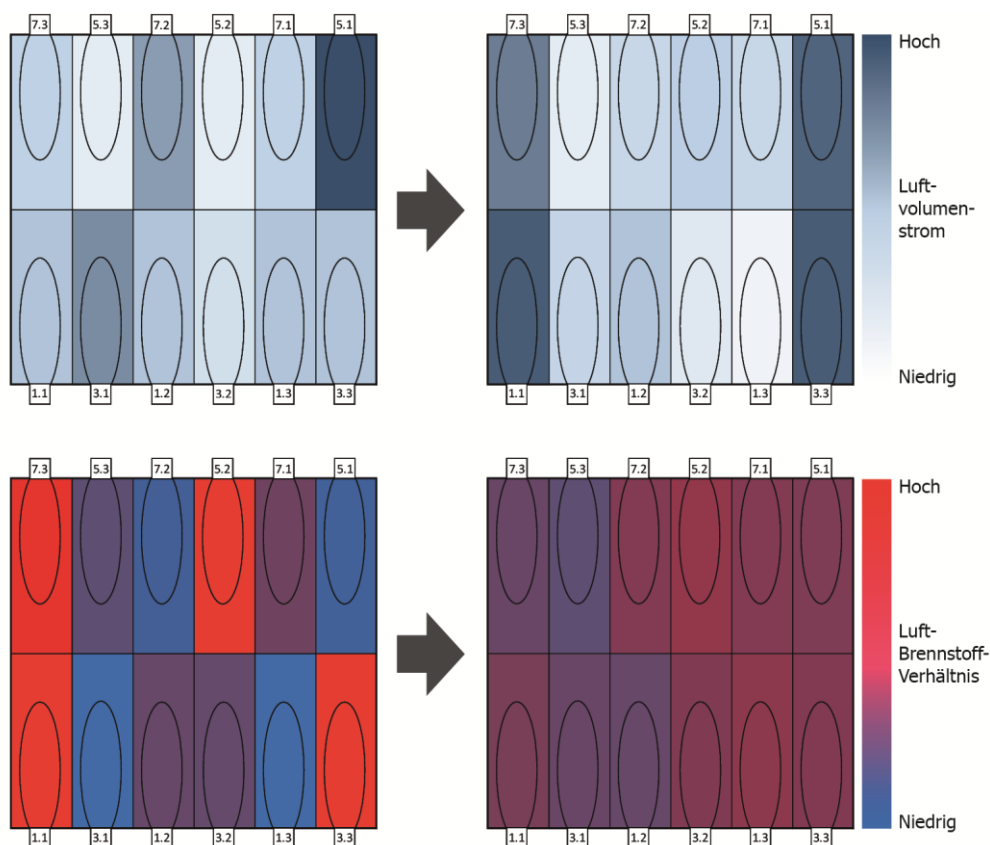


Abb. 6: Anpassung der Sekundärlüfte und Auswirkungen auf die Luftkohleverhältnisse an den Brennern – Obere Brennerebene, 45% Zuteilerlast

4 ERGEBNISSE DER PROZESSOPTIMIERUNG

In Abbildung 7 sind lokale CO- und NO_x-Messungen an der rechten Seitenwand sowie der O₂-Überschuss während des Versuchszeitraums dargestellt. Vor und nach den Anpassungen der

Sekundärlüfte liegen die CO-Emissionen mit 11.000 ppm am Anschlag des Messbereichs des verwendeten Messgeräts. Die vorgenommenen Anpassungen bewirkten eine deutliche Erhöhung der lokalen NO_x-Werte, die für einen besseren Ausbrand sprechen. Zudem konnten zeitweise Verringerungen der CO-Emissionen von über 80 % auf unter 2.000 ppm erreicht werden. Mit einer kontinuierlichen Messung der Kohleverteilerung an allen Mühlen könnten Anpassungen an Prozessschwankungen erfolgen und die CO-Emissionen auch langfristig in diesem Maße gesenkt werden.

Die gleichzeitige Homogenisierung der Verbrennung durch die Vergleichmäßigung der Luft-Brennstoff-Verhältnisse an den Brennern spiegelt sich auch in den globalen Rauchgasmessungen wieder. Die Unterschiede zwischen linker und rechter Kesselwand konnten während des Versuchszeitraums deutlich reduziert werden (siehe Abbildung 8).

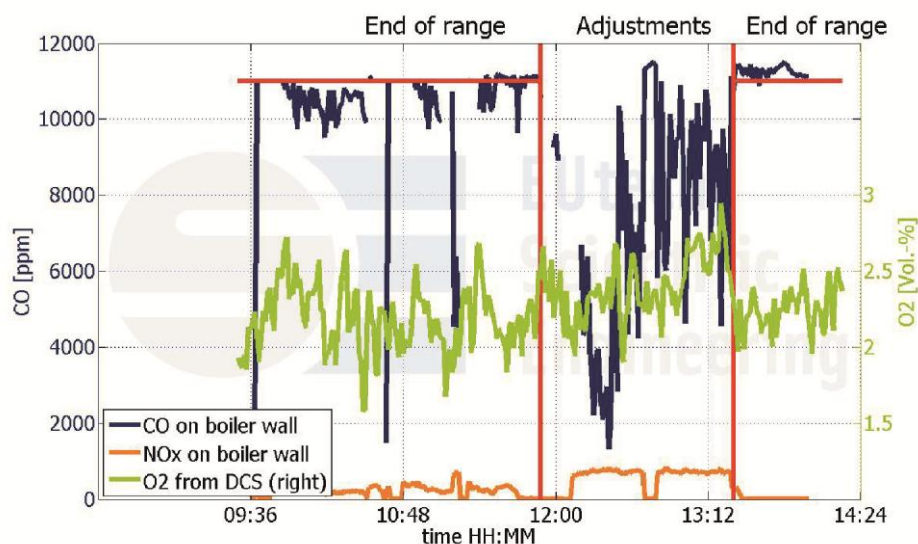


Abb. 7: Lokale Emissionen und O₂-Überschuss – Rechte Kesselwand – Versuchsbetrieb

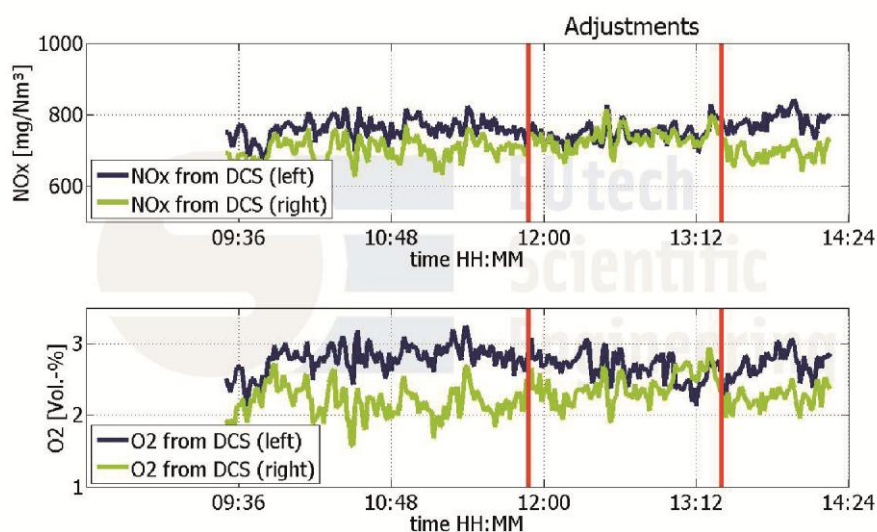


Abb. 8: Globale NO_x-Emissionen und O₂-Überschuss – Versuchsbetrieb

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Rahmen dieser Studie wurde die Grundursache für die Hochtemperaturkorrosion im Kraftwerk Kakanj aufgedeckt, geeignete Gegenmaßnahmen aufgezeigt und deren Effektivität direkt im Rahmen des Versuchsbetriebs validiert. So konnten nicht nur Verringerungen von über 80 % der lokalen CO-Emissionen erreicht werden, sondern ebenfalls eine Vergleichmäßigung der gesamten Verbrennung.

Zur dauerhaften Reduzierung der CO-Emissionen und Korrosionsneigung an den Seitenwänden sowie Homogenisierung der Verbrennung wird eine kontinuierliche Regelung der Luft-Brennstoff-Verhältnisse an den Brennern empfohlen, um Schwankungen des Prozesses zu kompensieren.

Die vorgestellte Vorgehensweise ist grundsätzlich auf eine Vielzahl von Problemstellungen anwendbar. Die verfügbaren Datenmengen in Kraftwerken sind bereits immens und werden immer größer. Viele Erkenntnisse können so bereits vor der Durchführung von Messkampagnen gewonnen werden und die Versuchsdurchführung auf diese Weise gezielter und effizienter gestaltet werden, wie am Beispiel der nur zweiwöchigen Messkampagne gezeigt. Bei diesem Vorgehen stehen die Identifizierung der Grundursache und eine wirtschaftliche Lösung im Vordergrund. Durch Nutzung vorhandener Informationen können kostenintensive Umbauten so bereits im Vorfeld bewertet und ggf. durch einfache Alternativen sogar vermieden werden.

6 QUELLEN

- [1] DIN EN ISO 8044:1999-11: Korrosion von Metallen und Legierungen - Grundbegriffe und Definitionen (ISO 8044:1999)
- [2] Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik, Hans Jürgen Maier, Thomas Niendorf, Ralf Bürgel, 2015
- [3] Power Generation from Solid Fuels, Hartmut Spliethoff, 2010
- [4] Dampferzeugung, Helmut Effenberger, 2000
- [5] Rauchgasseitige Hochtemperatur-Korrosion in Müllverbrennungsanlagen, C. Schroer und J. Konys, 2002
- [6] Fireside corrosion and erosion problems in coal based power plant, A.S. Khanna, National Workshop on Boiler Corrosion, 11-12th April, 1995, NML Jamshedpur, India
- [7] Simulation von Kraftwerken und wärmetechnischen Anlagen, Bernd Eppel, Reinhard Leithner, Wladimir Linzer, Heimo Walter (Hrsg.), 2009