

Sichere und moderne Versorgung: Smarte FEGT erhöht die Anlagenverfügbarkeit am Standort Neurath

Timo Richter, Francesco Turoni, Michael Skomrock, David Bär und Piotr Olkowski

1.	Einführung	1
2.	Smarte Feuerraumendtemperaturmessung.....	2
2.1.	Zweidimensionale Temperaturmessung.....	2
2.2.	Bestimmung der maximalen Feuerraumendtemperatur	4
3.	Verfahrenstechnische Maßnahmen zur Anlagenoptimierung.....	4
4.	Umgesetzte Maßnahmen am Standort Neurath	7
4.1.	Ausgangssituation	7
4.2.	Entscheidungsfindung	7
4.3.	Systemaufrüstung	8
4.4.	Betriebsergebnisse	8
5.	Zusammenfassung und Ausblick.....	11
6.	Quellen	11

1. Einführung

Der Einsatz smarterer Online-Überwachungstools wie einer mehrdimensionalen Feuerraumendtemperaturmessung ermöglicht unter anderem eine präzisere verfahrenstechnische Beurteilung des Verbrennungsprozesses von biogen befeuerten Dampferzeugern. Dies erlaubt eine zielgerichtete Steuerung von relevanten Prozessparametern zur Belagsbildungskontrolle im Konvektivteil des Kessels. Dies bietet Chancen zur Maximierung der Reisezeit zwischen obligatorischen Reinigungsstillständen und zahlt sich in Bezug auf eine mögliche Verfügbarkeitssteigerung der Gesamtanlage aus. Gleichzeitig können Potenziale zur Reduzierung von Primäremissionen abgeleitet und umgesetzt werden.

Mit Unterstützung der virtuellen Bestimmung einer zweidimensionalen Feuerraumendtemperatur (FEGT) und der dazugehörigen Maximaltemperatur konnte die Belagsbildung in zwei der modernsten Kraftwerksblöcke des Rheinischen Braunkohlereviere am Standort Neurath unter Einsatz verfahrenstechnischer Maßnahmen deutlich reduziert und die Prozessverfügbarkeit gesteigert werden.

2. Smarte Feuerraumendtemperaturmessung

Die FEGT ist zusammen mit der Luft- und Brennstoffverteilung [1] [2] ein wesentlicher Parameter für den Betrieb und die Regelung von Dampferzeugern [3] [4] [5] [6]. Normalerweise wird diese Temperatur am Feuerraumende – vor dem konvektiven Teil – in einer oder mehreren Ebenen gemessen. Diese Temperatur ergibt sich aus der Wärmemenge, die durch die Verbrennung im Feuerraum frei wird, abzüglich der Wärmemenge, die an den Verdampfer abgegeben wird, und gibt Auskunft über die Wärmeübertragung nach der Brennkammer.

Die Feuerraumendtemperatur steht zusätzlich im direkten Zusammenhang mit den Belagsbildungsproblemen, die bei Festbrennstoffen auftreten, wie auch mit der Produktion von primären Stickoxidemissionen (thermisches NO_x). Die FEGT trägt direkt zur Verschlackungs- und Verschmutzungsbildung in den konvektiven Wärmetauschern bei. Deshalb wird die Feuerraumendtemperatur auch mit der Ascheschmelztemperatur von festen Brennstoffen verglichen [7].

Trotz ihrer Bedeutung wird die FEGT oft nicht ausreichend überwacht [4] [5] [6]: In der Praxis werden meist noch Thermolemente verwendet. Diese Sensoren messen in der Regel nur lokale Temperaturen an den Kesselwänden in verschiedenen Positionen. Leider helfen diese nur, Trends in den Temperaturänderungen zu verfolgen, können aber nicht die tatsächlichen durchschnittlichen und maximalen FEGT oder ihre räumliche Verteilung über den Kesselquerschnitt überwachen.

Obwohl die Pyrometrie (akustisch und optisch) von den Kesselherstellern noch nicht als Standardüberwachungsinstrument zur Messung zweidimensionaler (2D) Temperaturverteilungen definiert wird, ist sie derzeit in der Praxis die genaueste, smarte und anerkannte Technik zur direkten Messung der FEGT und ihrer Verteilung in modernen Kesseln [5].

Während *akustische* Pyrometer das Prinzip nutzen, die Temperatur eines Mediums anhand dessen temperaturabhängiger Schallgeschwindigkeit zu ermitteln, nutzen *optische* Pyrometer die Wärmestrahlung eines Gases (CO , CO_2), um mit dem Stefan-Boltzmann-Gesetz die Temperatur zu ermitteln [5].

Obwohl der Einsatz von moderner Pyrometrie bereits im industriellen Maßstab validiert wurde, gibt es in der Literatur nur wenige Informationen über das Betriebsverhalten solcher Systeme in großen Kesseln.

2.1. Zweidimensionale Temperaturmessung

Die räumliche Verteilung der Feuerraumendtemperatur über den Kesselquerschnitt gibt einen direkten Hinweis auf die Flammenlage und das Vorhandensein

von stationären, lokalen Extremstellen (z. B. Temperaturspitzen – Hot Spots). Idealerweise sollte die maximale Temperatur in der Mitte des Kessels und damit weg von den Wänden liegen. Andernfalls kann der Wärmestrom entlang der Kesselwände ungleichmäßig werden und zu Rohrbrüchen führen. Eine ungleichmäßige Temperaturverteilung im Kessel wirkt sich auch direkt auf die Verteilung der Dampfparameter und deren relative Regelung (z. B. Einspritzwassermenge) aus.

Mit den heutigen Last- und Brennstoffflexibilitätszielen wird die Echtzeit-Überwachung der zweidimensionalen Feuerraumendtemperatur immer wichtiger und ist daher entscheidend für den optimalen Betrieb und die Kontrolle der Wärmeübergangsverteilung, die beispielsweise durch Ascheablagerungen und/oder ungleichmäßige Verbrennung beeinflusst wird.

Die Bestimmung der zweidimensionalen (2D) Verteilung erfolgt durch die Kombination mehrerer, über den Kesselumfang verteilter Pyrometer, die ein Gitter in einer oder mehreren Ebenen bilden, und der Anwendung eines tomographischen Algorithmus, ähnlich dem, der im Bereich der medizinischen Computertomografie (CT) verwendet wird.

Aus den einzelnen Durchschnittsmessungen (Integralwerte entlang der Pfade, an denen jeder Sensor angebracht ist) wird das Gitter mit den verschiedenen Schnittpunkten mit dem oben genannten Algorithmus berechnet (Abbildung 1).

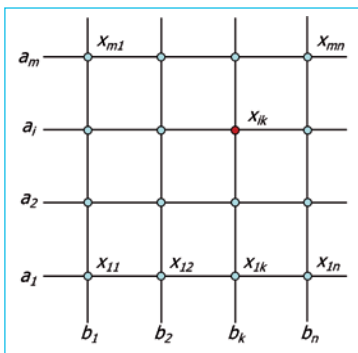


Abb. 1: Schnittpunktgitter

Für das überbestimmte lineare Gleichungssystem ist der grundlegende Algorithmus darauf ausgelegt, die Differenzen zwischen den zweidimensionalen Mittelwerten der Gitterpunkte und allen Mittelwerten im Pfad durch eine geeignete Norm, z. B. den Effektivwert, zu minimieren.

Bei Verbrennungsprozessen ist die korrekte Berücksichtigung der Randbedingungen von größter Bedeutung. Diese müssen die physikalischen Randbedingungen des Prozesses (z. B. die Eigenschaften der thermischen Grenzschichten zur Ableitung des nichtdimensionalen parametrischen Ausdrucks der Randapproximation) mit den Messdaten in Einklang bringen, ohne die Qualität der Ergebnisse zu beeinträchtigen.

Ein optimiertes algorithmisches Verfahren ermöglicht es, den *realen* Temperaturen des gesamten Kesselquerschnittes so nah wie möglich zu kommen.

2.2. Bestimmung der maximalen Feuerraumendtemperatur

Der tomographische Algorithmus ermöglicht es, aus den Werten an den Schnittpunkten und an den Kesselwänden durch einen mathematischen Interpolationsansatz die Temperaturen über die gesamte betrachtete Fläche zu berechnen.

Die Bestimmung von *realen* Temperaturinformationen (z. B. die Maximal- oder Minimaltemperatur sowohl als Wert als auch als Position) über den gesamten Kesselquerschnitt, auch zwischen den einzelnen Messpfaden, ist damit ermöglicht.

Diese Informationen können grundsätzlich durch den Einsatz von spezifischen und komplexen CFD-Simulationen validiert werden (Abbildung 2).

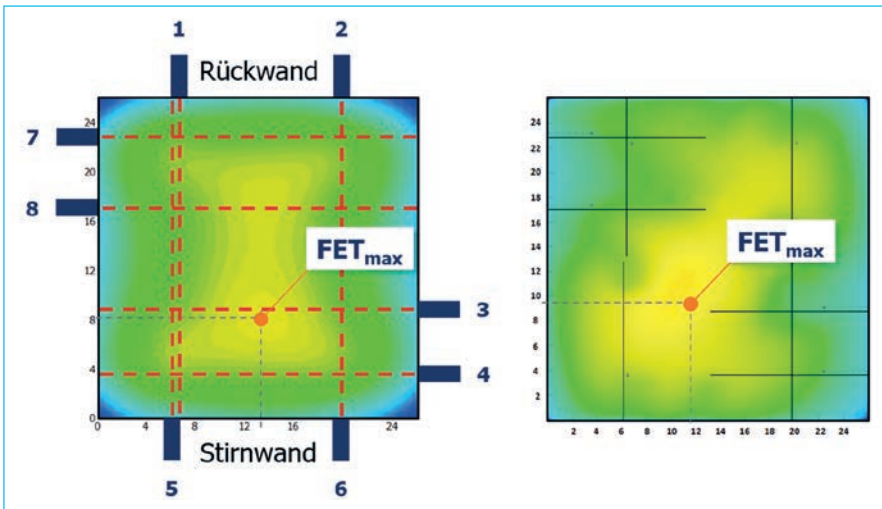


Abb. 2: FET_{max} berechnet mit tomografischem Algorithmus (links) und CFD-Simulation (rechts)

Auf diese Weise ist erkennbar, dass die alleinige Verwendung von Informationen aus lokalen Messungen irreführend sein kann. Die tatsächlichen Bedingungen im Kessel werden ggf. nicht wiedergegeben, wodurch eine effektive Kontrolle verhindert wird.

In diesem Fall wurde zum Beispiel festgestellt, dass die verfügbaren individuellen Betriebstemperaturen in einigen Situationen eine Abweichung (Unterschätzung) zu den mit dem tomografischen Algorithmus berechneten Spitzentemperaturen aufweisen. Die durch den Algorithmus berechneten Spitzentemperaturen stimmen mit den Ergebnissen aus mineralogischen Untersuchungen überein.

3. Verfahrenstechnische Maßnahmen zur Anlagenoptimierung

Die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit steht bei den heutigen Anforderungen des Energiemarktes an die Energieerzeuger immer mehr im Fokus. Kraftwerksbetreiber sind gezwungen, kurzfristige Laständerungen zu fahren. Kraftwerke, die ursprünglich zur Abdeckung der Grundlast konzipiert wurden, müssen sich anpassen, um wechselnde Anforderungen bedienen zu können.

Die heutzutage schnell wechselnden Verbrennungsbedingungen können schon in kürzester Zeit den Energiegewinnungsprozess beeinflussen. Zur Einhaltung der technischen sowie gesetzlichen Rahmenbedingungen bei fossilen Feuerungsprozessen stehen den Kraftwerksbetreibern verfahrenstechnische Maßnahmen zur Verfügung. Diese Maßnahmen unterstützen den Betrieb und helfen, die Anlagenverfügbarkeit als auch den Verbrennungsprozess zu optimieren [8].

Schwierigkeiten im Verbrennungsprozess aufzudecken ist essenziell, um wettbewerbsfähig zu bleiben. Durch die Untersuchung der Zusammensetzung der Verbrennungsrückstände, also dem Rauchgas inklusive der Asche als auch der Schlacke, ist es möglich, den vergangenen Verbrennungsprozess zu bewerten [9]. Auf diese Weise können Probleme der bereits abgelaufenen Verbrennung aufgedeckt werden, jedoch erlaubt diese Methode nur bedingt Rückschlüsse zu den Ursachen einer schlechten Verbrennung. Zudem ist durch dieses Verfahren eine Echtzeitüberwachung des Verbrennungsprozesses kaum möglich und somit die gezielte Echtzeitverbrennungsoptimierung nur erschwert umsetzbar.

Messtechniken, die den Verbrennungsfortschritt in Echtzeit überwachen, bieten weitaus mehr Möglichkeiten schnell und effektiv Parameter der Brennstoff- und Luftzufuhr zu verändern. Auf diese Weise kann der Verbrennungsprozess beobachtet und optimal geregelt werden. Temperaturmessungen der Rauchgase in der Brennkammer bieten eine solide Möglichkeit, um den gesamten Verbrennungsprozess zu überwachen. Über die Feuerraumendtemperaturen und deren Verteilung über den Querschnitt des Brennraums können Temperaturspitzen und Temperaturschiefen identifiziert werden. Unter bestimmten Bedingungen kann sogar der Verbrennungsfortschritt beurteilt werden. Anhand dieser Erkenntnisse können aktiv die Brennstoff- und Luftzufuhr sowohl horizontal als auch vertikal optimiert werden. Hilfreich sind hier weitere online Messverfahren der Brennstoffeigenschaften und Brennstoffmassenstromverteilung sowie der Luftzufuhr. Mit diesen verfahrenstechnischen Maßnahmen können das volle Potenzial des Kessels und der Brenner genutzt werden.

Für einen wirtschaftlichen Betrieb der Anlage ist es notwendig, chemische Energie optimal in thermische Energie, anschließend in mechanische und schließlich in elektrische Energie umzuwandeln. Hierfür muss der Reaktionsfortschritt der Verbrennung kontrolliert werden, sodass am Ende des Verbrennungsprozesses möglichst wenig unverbrannter Brennstoff mit dem Abgas und dem Ascherost ausgetragen wird. Ein weiteres Ziel der optimalen Verbrennung zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit der Anlage ist zwingend die Kontrolle der Belagsbildung im Kessel. Die Wirtschaftlichkeit ergibt sich dabei aus effektivem Wärmeübergang und längeren Reisezeiten [9] [10].

Mittels gezielter verfahrenstechnischer Maßnahmen kann der Verbrennungsprozess optimiert werden, um negative Situationen zu vermeiden, aber auch, um die gesetzlichen Rahmenbedingungen einzuhalten. Unterschieden wird zwischen Primär- und Sekundärmaßnahmen: Unter Primärmaßnahmen versteht man die gezielte Ansteuerung und Änderung der Parameter, welche einen direkten Einfluss auf die Verbrennung haben. Darunter fallen Einstellungsmöglichkeiten der Luftführung und des Brennstoffeinsatzes. Sekundärmaßnahmen sind chemischer Natur, bspw. Katalysatoren, und wirken den Ursachen der schlechten Verbrennung nicht entgegen [9].

Da in Bestandskraftwerken die Regelung der Luftführung und die Steuerung des Brennstoffeinsatzes generell zur Verfügung stehen, sind Primärmaßnahmen meist die erste Wahl und kosteneffizienter umzusetzen als Sekundärmaßnahmen. Durch den Einsatz von Primärmaßnahmen kann der Verbrennungsprozess optimiert werden. Nicht nur eine vollständige und emissionsarme (NO_x , CO) Verbrennung kann erreicht werden, es ist zusätzlich möglich Flammenschieflagen, lokale Temperaturspitzen und unerwünschte Verschlackungen zu vermeiden.

Die Maßnahmen beginnen vor dem eigentlichen Verbrennungsprozess. Die zu verbrennende Kohle wird in Kohlebunkern homogenisiert. Besonders innerhalb der Kategorie Braunkohle gibt es große Unterschiede bezüglich des Asche- und Sandgehalts, der Neigung zur Schlackebildung, aber auch des Wassergehalts und Heizwertes. Die Kohle wird bei der Zuführung in die Mühle vorgeheizt und in der Mühle zu einer definierten Korngröße zerkleinert. All die zuvor genannten Parameter haben einen Einfluss auf die Reaktionsfähigkeit des Brennstoffes [10].

Mit ausschlaggebend für den Reaktionsfortschritt der Verbrennung ist das Verhältnis von Brennstoff und Luft, das auf dem Reaktionsweg zur Verfügung steht. Ist dieses Verhältnis gestört, entsteht während des Verbrennungsprozesses nicht nur vermehrt NO_x , sondern auch die Gefahr von Flammenschieflagen und Temperaturspitzen steigt an. Die Folge sind wirkungsgradmindernde Wassereinspritzungen sowie thermischer Stress und die unkontrollierte Bildung von Verschlackungen. Schlimmstenfalls kommt es zu Kesselschäden und ungeplanten Stillständen.

Low- NO_x -Brenner sind in der Lage, den eingebrachten Brennstoff durch stufenweise Luftzuführung über einen verlängerten Brennweg bei abgesenkten Spitzentemperaturen zu verbrennen. Eine stufenweise Verbrennung findet nicht nur innerhalb der Brennerflamme statt. Ein Teil der Verbrennungsluft wird dem Brennstoff erst im Kessel zugeführt, um die gesamte chemische Energie möglichst gleichmäßig in thermische Energie umwandeln zu können. Diese so genannte Ausbrandluft wird auf höheren Ebenen in der Brennkammer dem Verbrennungsprozess zugeführt. Erst durch Einbringung der Ausbrandluft wird ein stöchiometrisches bzw. überstöchiometrisches Luftverhältnis zur Verfügung gestellt, um eine vollständige Verbrennung des Brennstoffes in der Brennkammer zu gewährleisten und keinen unverbrannten Brennstoff auszutragen [9]. Ähnlich zum Low- NO_x -Brenner kann dadurch eine stufenweise Verbrennung erzielt und Temperaturspitzen vermieden werden. Kesselschäden werden auf diese Weise verhütet.

Durch eine Echtzeitüberwachung der Feuerraumendtemperatur werden viele Informationen gewonnen, um den gesamten Verbrennungsprozess zu optimieren. Ist die tomographische Verteilung der Feuerraumendtemperatur über den Kesselquerschnitt bekannt, können lokale Ereignisse überwacht und Situationen, in denen Belagsbildungsprozesse einsetzen und zu hohe Temperaturen auftreten, durch gezieltes Gegensteuern vermieden werden. Hochtemperaturkorrosion sowie Materialstress werden reduziert. Dies hat einen direkten Einfluss auf die Verfügbarkeit der Anlage. Geringere Belagsbildung und Vermeidung von prozessstörenden Verschlackungen mit optimierten Reinigungsmöglichkeiten steigern die Anlagenverfügbarkeit. Durch die Kontrolle der Belagsbildung ist eine Reduzierung der Reinigungsstillstände möglich. Die Reisezeit eines Kessels kann somit gesteigert werden.

4. Umgesetzte Maßnahmen am Standort Neurath

4.1. Ausgangssituation

In diesem konkreten Projekt sind mehrere berührungslose Sensoren (optische Pyrometer) am Ende der Brennkammer bereits installiert. Diese waren, wie in Abbildung 3 schematisch dargestellt, an den vier Kesselseiten angeordnet.

Die maximale Feuerraumendtemperatur ($FEGT_{max}$) wurde aus den einzelnen Durchschnittsmesswerten (Integralwerte entlang der Pfade, an denen jeder Sensor angebracht ist) im Leitsystem ermittelt. Diese Temperatur wurde zur Belagsbildungskontrolle kontinuierlich beobachtet und angewendet.

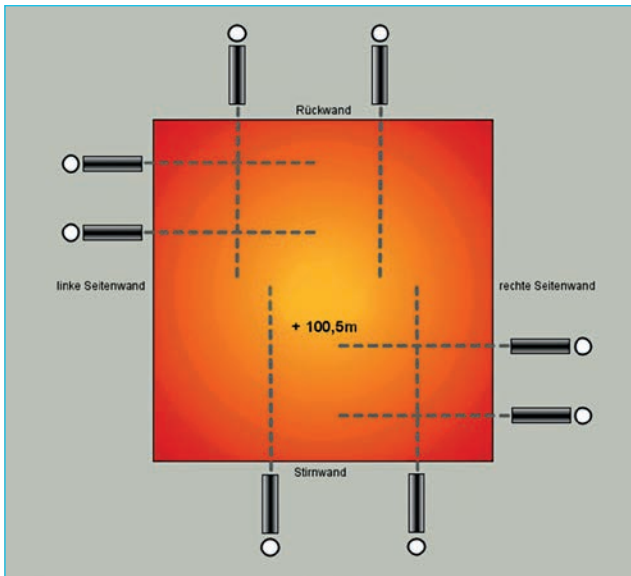


Abb. 3: Sensoranordnung in zwei der Kraftwerksblöcke am Standort Neurath

Durch mineralogische Untersuchungen wurde trotzdem festgestellt, dass im Schottwandbereich der Konvektionsstrecke teilweise Temperaturen oberhalb des Grenzniveaus erreicht wurden. Diese unerwünschten Bedingungen (d. h. verstärkte Ablagerungsbildung unter dem Einfluss einer hohen FEGT) erschwerten nicht nur die Reinigungsbemühungen/-prozesse, sondern beeinflussten auch die effektive Fahrzeit des Kessels negativ, sodass teilweise ungeplante Reinigungsstillstände notwendig wurden.

4.2. Entscheidungsfindung

Zu vorliegenden historischen Messdaten der installierten Pyrometer wurden mit einer geeigneten Software (tomographischer Algorithmus) die *realen* Feuerungstemperaturen und deren Verteilung über den Kesselquerschnitt berechnet.

Daraus konnten auch die punktuellen Maximaltemperaturen abgeleitet werden (siehe Kapitel 2.2.). Die Auswertung zeigte, dass in manchen Situationen eine Abweichung von den verfügbaren individuellen Betriebstemperaturen vorliegt. Die berechneten virtuellen Spitzentemperaturen stimmten wiederum mit den aus den mineralogischen Untersuchungen gewonnenen Werten überein.

4.3. Systemaufrüstung

Die gewünschte Systemaufrüstung wurde ohne Austausch von bestehenden Anlagenkomponenten im Jahr 2020 implementiert und erfolgreich in Betrieb genommen.

Die angewendete Lösung, auf Basis des EUflame 2D Software-Pakets, ist vielseitig einsetzbar und brennstoffunabhängig. An vielen Stellen lässt sie sich mit bereits bestehenden Anlagenkomponenten (z. B. Sensorik, Datenerfassung usw.) kombinieren und bei Bedarf modular erweitern.

Im Wesentlichen werden vom Prozessleitsystem Betriebsdaten online zur Verfügung gestellt. Innerhalb der Softwareumgebung werden die einzelnen Temperaturmesswerte am Feuerraumende in Echtzeit analysiert und nach algorithmischer Aufarbeitung wieder ins Leitsystem rücktransferiert. Mithilfe der tomografischen Darstellung der Temperaturverteilung lassen sich beispielsweise Inhomogenitäten leicht aufzeigen und identifizieren.

Sowohl auf der Bedienoberfläche als auch im Leitsystem können die berechneten Zonentemperaturmittelwerte und -maximalwerte angezeigt und überwacht werden. Diese smarte Temperaturmessung ermöglicht die Überwachung der *realen* maximalen Feuerraumendtemperatur sowie der Lage des Flammenschwerpunkts in Echtzeit und liefert zudem diverse statistische Parameter.

4.4. Betriebsergebnisse

Die neu gewonnenen Informationen (FEGT_{max}, die zweidimensionale Temperaturverteilung, usw.) ermöglichen eine effizientere Steuerung der relevanten Prozessparameter zur Belagsbildungskontrolle am Feuerraumende und im Konvektivteil des Kessels. Durch die kontinuierliche zweidimensionale Temperaturmessung können Temperaturspitzen und Flammenschieflagen genauer identifiziert und gezielte Gegenmaßnahmen eingeleitet werden. Neben der Kontrolle der Belagsbildung wird durch das Verhindern von Temperaturspitzen Hochtemperaturkorrosion auch besser gesteuert/kontrolliert.

Die Feuerraumendtemperatur lässt sich als Hilfsgröße für eine schlackearme Fahrweise verwenden. Abbildung 4 zeigt, welchen Einfluss verfahrenstechnische Maßnahmen auf die maximale Feuerraumendtemperatur (FEGT_{max}) haben. Eine gezielte Luftstufung sowie die Einstellung des Luftüberschusses korreliert sehr gut mit einer Änderung der Feuerraumendtemperatur. Während des Validierungstests wurde die Spitztemperatur bei unterschiedlichen Kessel-einstellungen um etwa 30 Kelvin beeinflusst.

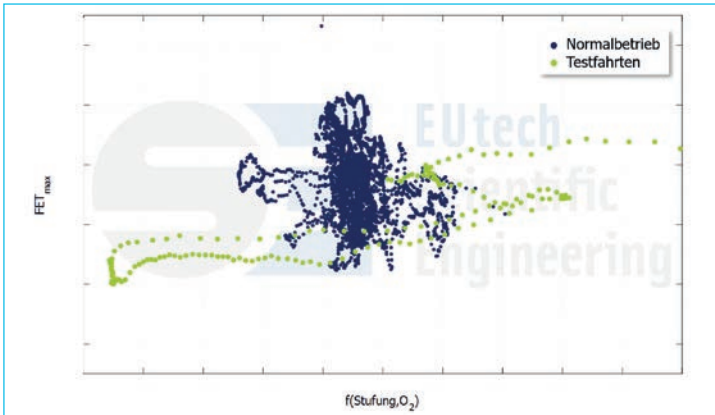


Abb. 4: FEGT_{max} in Abhängigkeit von Luftstufung und Luftüberschuss

Abbildung 5 zeigt die NO_x- und CO-Emissionen in Abhängigkeit von Luftstufung und Luftüberschuss. Trotz der schlackearmen Fahrweise können diese unter den gesetzlichen Vorgaben gehalten werden.

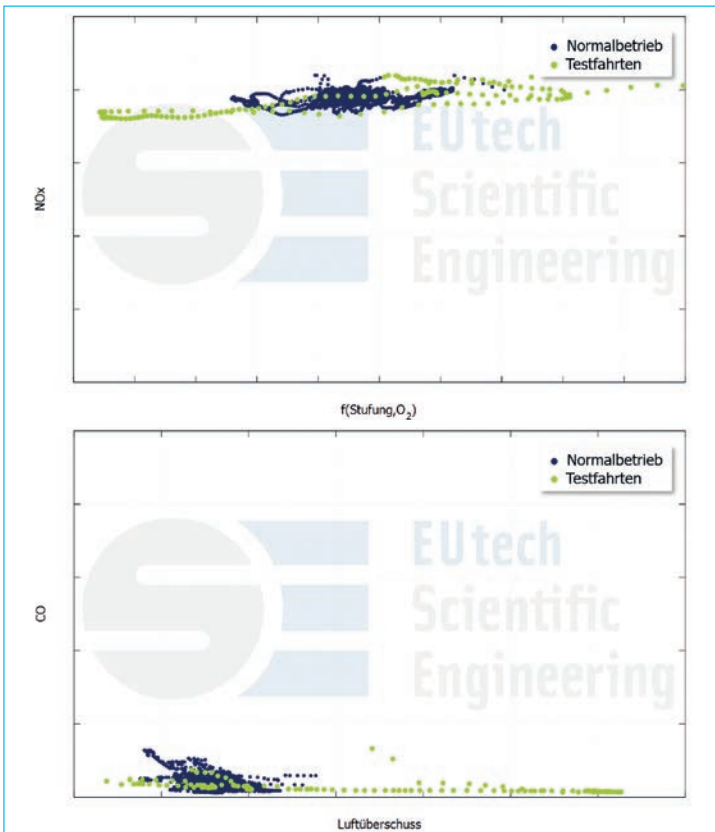


Abb. 5: Primäremissionen (NO_x, CO) in Abhängigkeit von Luftstufung und Luftüberschuss

Als verfahrenstechnische Maßnahmen wurden während der Validierungstests folgende Stellgrößen in verschiedenen Konfigurationen und regelmäßigen Abständen (Zeitintervall zwischen 5 und 15 Minuten) manuell verstellt:

- Eindüsert und Konfiguration der Ausbrandluftmengen (Ebene 1 und 2)
- Verbrennungsluftmenge
- O₂-Regler

Darüber hinaus wurden in einem gezielten Test die Vorteile von Zusatzinformationen wie beispielsweise des Brennstoffausbrandes für eine weitere und genauere Steuerung des Verbrennungsprozesses demonstriert. In diesem Fall wurden zwei der acht Sensoren vorübergehend durch EUflame Burnout-Sensoren (patentierter Sensor) ersetzt, die nicht nur die gewohnten Temperaturinformationen, sondern auch qualitative Informationen über den Zustand des Brennstoffausbrandes (Burnout) im Kessel liefern.

Die Ergebnisse stehen in Echtzeit zur Verfügung und eröffnen neue Möglichkeiten zur Überwachung und aktiven Steuerung der Verbrennung.

Wie in Abbildung 6 zu sehen ist, besteht ein enger Zusammenhang zwischen dem ermittelten Ausbrand und der *Verbrennungsqualität* (lokale und globale Lufteinstellungen und -stufung).

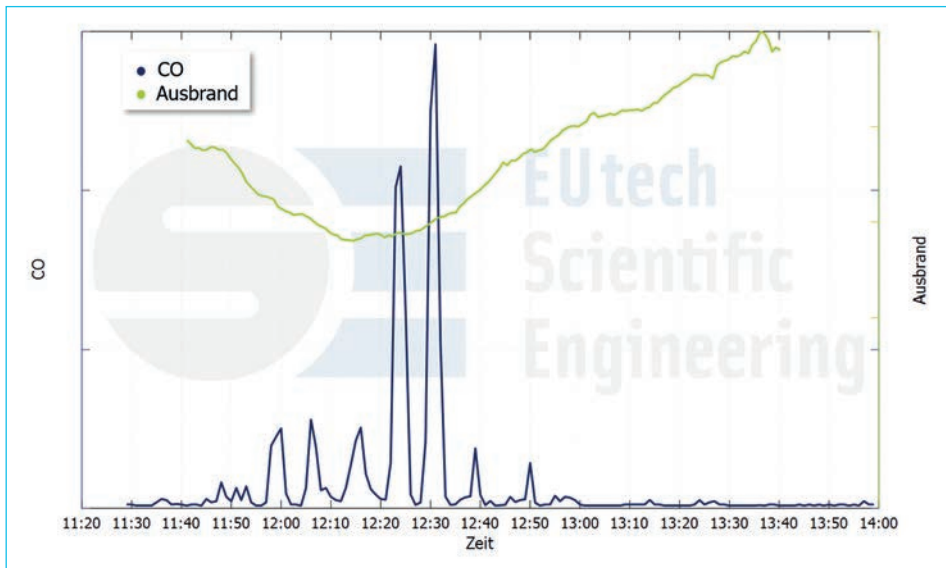


Abb. 6: Zusammenhang von Ausbrandverhalten und *Verbrennungsqualität*

Auch hier stehen die Messwerte in Echtzeit zur Verfügung und eröffnen neue Möglichkeiten zur aktiven Überwachung und Steuerung des Verbrennungsprozesses direkt im Kesselraum und nicht erst am Ende des Prozesses (z. B. unverbrannter Brennstoff in der Asche usw.), wie es derzeit der Normalfall ist.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Mehrere berührungslose Sensoren (optische Pyrometer) wurden in zwei der modernsten Kraftwerksblöcke des Rheinischen Braunkohlereviere am Standort Neurath seit Jahren zur Beobachtung der maximalen Feuerraumendtemperatur eingesetzt.

Mineralogische Untersuchungen weisen darauf hin, dass die Betrachtung von einzelnen Messwerten (Integralwerte entlang der Pfade, an denen jeder Sensor angebracht ist) teilweise zur Unterschätzung der maximalen Feuerraumendtemperatur geführt hat.

Eine Aufrüstung der bestehenden Anlagenkomponenten mithilfe eines modularen Software-Pakets (EUflame 2D Software) ermöglichte die zuverlässige und robuste Online-Bestimmung der zweidimensionalen Temperaturverteilung sowie der *realen* maximalen Feuerraumendtemperatur.

Die in den Monaten seit der Implementierung dieser Lösung gesammelten Erfahrungen haben gezeigt, dass die $FEGT_{max}$ in den meisten Fällen durch primäre Maßnahmen und ohne die Notwendigkeit einer Lastreduzierung geregelt werden kann.

Durch die kontinuierliche Überwachung und aktive Nutzung der *realen* Temperaturen konnte die Belagsbildung durch verfahrenstechnische Maßnahmen deutlich reduziert und damit auch die Prozessverfügbarkeit erhöht werden.

Schließlich wurde auch getestet und demonstriert, wie eine weitere Aufrüstung der Sensorik (EUflame Burnout) einfach in die aktuelle Lösung integriert werden kann, sodass nicht nur die Temperatur, sondern auch der Brennstoffausbrand (Burnout) im Kessel überwacht und geregelt werden kann. Diese weitere Messgröße eröffnet neue und weitere Möglichkeiten zur aktiven Überwachung und optimalen Steuerung des Verbrennungsprozesses direkt im Kesselraum.

6. Quellen

- [1] Blondeau, J.; Kock, R.; Mertens, J.; Eley, A.; Holub, L.: Online monitoring of coal particle size and flow distribution in coal-fired power plants: dynamic effects of a varying mill classifier speed. *Appl. Therm. Eng.* 98, (5), 2016.
- [2] Blondeau, J.; Rijmenans, L.; Annendijck, J.; Heyer, A.; Martensen, E.; Popin, I.; Wijitongruang, A.; Holub, L.: Burner air-fuel ratio monitoring in large pulverised-fuel boilers using advanced sensors: case study of a 660 MW_e coal-fired power plant. *Thermal Science and Engineering Progress* 5, 2018.
- [3] Kitto, J.; Stultz, S. (Eds.): *Steam 41*. The Babcock and Wilcox Company, 2005.
- [4] Chandok, J.; Kar, I.; Tuli, S.: Estimation of furnace exit gas temperature (fegt) using optimised radial basis and back-propagation neural networks. *Energy Convers. Manag.* 49, 2008.
- [5] Lockwood, T.: *Advanced Sensors and Smart Controls for Coal-Fired Power Plants*. Tech. Rep. CCS/251, IEA Clean Coal Centre, 2015.
- [6] Zhang, S.; Shen, G.; An, L.: Online monitoring of furnace exit gas temperature in power plants. *Appl. Therm. Eng.* 147, 2019.

- [7] Sarkar, D.: Thermal Power Plant: Design and Operation. Elsevier, 2015.
- [8] Lucas, K.: Thermodynamik – Die Grundgesetze der Energie- und Stoffumwandlung. Berlin: Heidelberg: New York: Springer-Verlag, 2006.
- [9] Effenberger, H.: Dampferzeugung. Berlin: Heidelberg: New York: Springer-Verlag, 2000.
- [10] Strauß, K.: Kraftwerkstechnik: Zur Nutzung fossiler nuklearer und regenerativer Energiequellen. Berlin: Heidelberg: New York: Springer-Verlag, 2009.