

FEUERUNGS- UND FLAMMENBEWERTUNG MIT NEUEN MESSTECHNIKEN

von Dr. Steffen Griebe, Helmut Bischoff (VPC GmbH) und
Dr. Thomas Brunne, Gerd Stecklina, Frank Pache (Lausitz Energie Kraftwerke AG)

SONDERDRUCK

VGB

POWERTECH

96. Jahrgang – Heft 12/2016
Seite 58 bis 65

 **VPC**
Sustainable Engineering & Consulting

Feuerungs- und Flammenbewertung mit neuen Messtechniken

Steffen Griebe, Helmut Bischoff, Thomas Brunne, Gerd Stecklina und Frank Pache

Abstract

Evaluations of combustion and flames with new measurement technologies

Due to the increasing efforts on the operation of boilers with frequent load changes, the use of changing fuels to substitute fuels there is the requirement to keep the initial state of the combustion within the scope of the design over the whole lifetime. Deviations are the results from ageing and wearing and lead to interference in operation in terms of slagging, erosions or critical concentrations at the furnace walls. In this context it is necessary to generate additional information of the state of the combustion inside the boiler.

Within the scope of investigations on several boiler units are the suitability of two measurement techniques – flame detector and NIR-thermography – to determine the initial state of an overhauled combustor. It becomes apparent that basically with the flame detector and the NIR-thermography results of the evaluation and assessment of the initial state of the combustion can be gained. In terms of the use of the flame detector it is necessary to have additional systematic investigations within the framework of a development project. The NIR-thermography has been used successfully during several projects. The reasons for slagging in the burner zone of a lignite fired boiler unit could be cleared up and measures for optimization have been worked out. Furthermore the final implementation of the optimisations has been attended by NIR-thermography and the results have been documented for the operating company of the power plant. The findings could apply to combustors of other power plants successfully.

Hintergrund und Zielstellung

Für eine versorgungssichere Kraftwerksanlage ist der störungsfreie Betrieb der Dampferzeugerfeuerung eine essentielle Voraussetzung. Die Feuerung muss überwacht und optimal ausjustiert sein, um darüber hinaus weitere Anforderungen zu erfüllen. Dazu zählen beispielsweise

- eine sichere Zündung und ein vollständiger Umsatz des Brennstoffs,
- niedrige Emissionen an NO_x und CO,
- schnelle Umsetzung der korrosiven Brennstoffbestandteile (Chlor und Schwefel) und
- Erreichung eines hohen Dampferzeugerwirkungsgrads bei
- einer hohen Verfügbarkeit.

Auf Grund der zunehmenden Schwankungen des Stromangebots in den Übertragungsnetzen müssen die Kraftwerksanlagen eine hohe Lastdynamik aufweisen sowie den Betrieb von Niedriglasten absichern. Darüber hinaus treten beim Betrieb der Kraftwerksanlage Alterung und Verschleiß sowie wechselnde Brennstoffqualitäten bzw. Brennstoffe auf, die zu Betriebsbeeinträchtigungen führen oder Anpassungen der Betriebsführung erfordern. Um den Betrieb der Dampferzeugerfeuerung bestimmungsgemäß durchzuführen, wurden Messtechniken bzw. neue Funktionalitäten einschließlich deren Eignung geprüft und bewertet, die den Ist-Zustand der Feuerung eines kommerziellen Dampferzeugers erfassen und deren Optimierungen messtechnisch begleiten. Die Eignungstests wurden zum einen an der 30 MWth-Forschungsanlage von Vattenfall in Schwarze Pumpe [1, 2] und zum anderen in Dampferzeugerfeuerungen kommerzieller Kraftwerke durchgeführt.

In dem folgenden Beitrag werden die Messtechniken, die Ergebnisse und der Nutzen für den Dampferzeugerbetrieb vorgestellt.

Messtechniken zur Feuerungsanalyse – Neue Funktionalitäten und Einsatzgebiete

Die in den Kraftwerksanlagen installierte Betriebsmess- und Leittechnik ist darauf ausgerichtet, die für den Betrieb, die Überwachung und die Regelung der Anlage erforderlichen Betriebsgrößen zu erfassen

und entsprechend zu verarbeiten. Darüber hinaus gehende Parameter werden mit der Inbetriebnahme vom Hersteller bestimmt und in der Leittechnik hinterlegt. Dazu zählen beispielsweise die Brennstoffmassenstromanteile auf die je nach Feuerungskonzept vorhandenen jeweiligen Brenner bzw. Brennergruppen, die gemäß der Auslegung erforderliche Verbrennungsluft unter Berücksichtigung der Mühlenluft (Traggas- oder Primärluft), die Anteile der Rost- und Ausbrandluft an der Gesamtverbrennungsluft und weitere Größen. Treten auf Grund der unter Kapitel 2 beschriebenen Zusammenhänge Abweichungen von den Parametern des Feuerungsgrundzustands oder bei der betrieblichen Messtechnik auf (z.B. O₂-Gehalt nach Dampferzeuger), kann der aktuelle Zustand der Feuerung nicht voll umfänglich vom Betriebspersonal erfasst werden. Dies kann dazu führen, dass verstärkt Verschlackungen durch direkte Flammenberührungen an der Dampferzeugerinnenwand entstehen, dass Hochtemperaturkorrosionen durch Sauerstoffmangel an den Verdampferrohren zu Materialverlust führen oder ein zu hoher Abgasverlust gefahren wird und in Folge dessen der Anlagenbetrieb für Instandhaltungs- oder Wartungsmaßnahmen unterbrochen werden muss. Des Weiteren werden Schäden durch den Betrieb der Dampferzeugerfeuerung mit den beschriebenen möglichen Abweichungen vom Feuerungsgrundzustand häufig erst bei Durchführung von Revisionsarbeiten oder beim Ausfall der Anlage lokalisiert.

Um Messwerte zur Bestimmung und Überprüfung der Betriebsparameter des Feuerungsgrundzustands und insbesondere Informationen über den gegenwärtigen Betriebszustand direkt aus dem Feuerraum eines Dampferzeugers zu generieren, wurden einerseits die NIR-Brennerthermografie (Ergebnisse und Informationen aus dem NIR-Spektralbereich der Flamme bzw. des Feuerraumes) und andererseits Flammenwächter, welche die „Licht“-Emissionen (UV- und IR-Bereiche) des Flammenkörpers erfassen, für die Aufgabenbearbeitung zur Feuerungsanalyse und -optimierung einbezogen. Die Messtechniken wurden dabei nicht speziell für diese Aufgabe entwickelt, sondern durch neuartige Auswertemöglichkeiten der erfassten Signale sowie in Kombination mit weiteren Messergebnissen von Versuchs- und Betriebsmessungen kombiniert eingesetzt. Abschließend

Autoren

Dr.-Ing. Steffen Griebe

Gruppenleiter Messungen/Optimierungen
VPC GmbH, Peitz, Deutschland

Dipl.-Ing. Helmut Bischoff

Projektingenieur Kesseltechnik
VPC GmbH, Veitschau, Deutschland

Dr.-Ing. Thomas Brunne

Leiter Kesselanlagen/Kesseltechnik
Vattenfall Europe Generation AG
Cottbus, Deutschland

Dipl.-Ing. Gerd Stecklina

Leiter Stab
Vattenfall Europe Generation AG
Peitz, Deutschland

Dipl.-Ing. Frank Pache

Betriebsingenieur Kesseltechnik
Vattenfall Europe Generation AG
Schwarze Pumpe, Deutschland

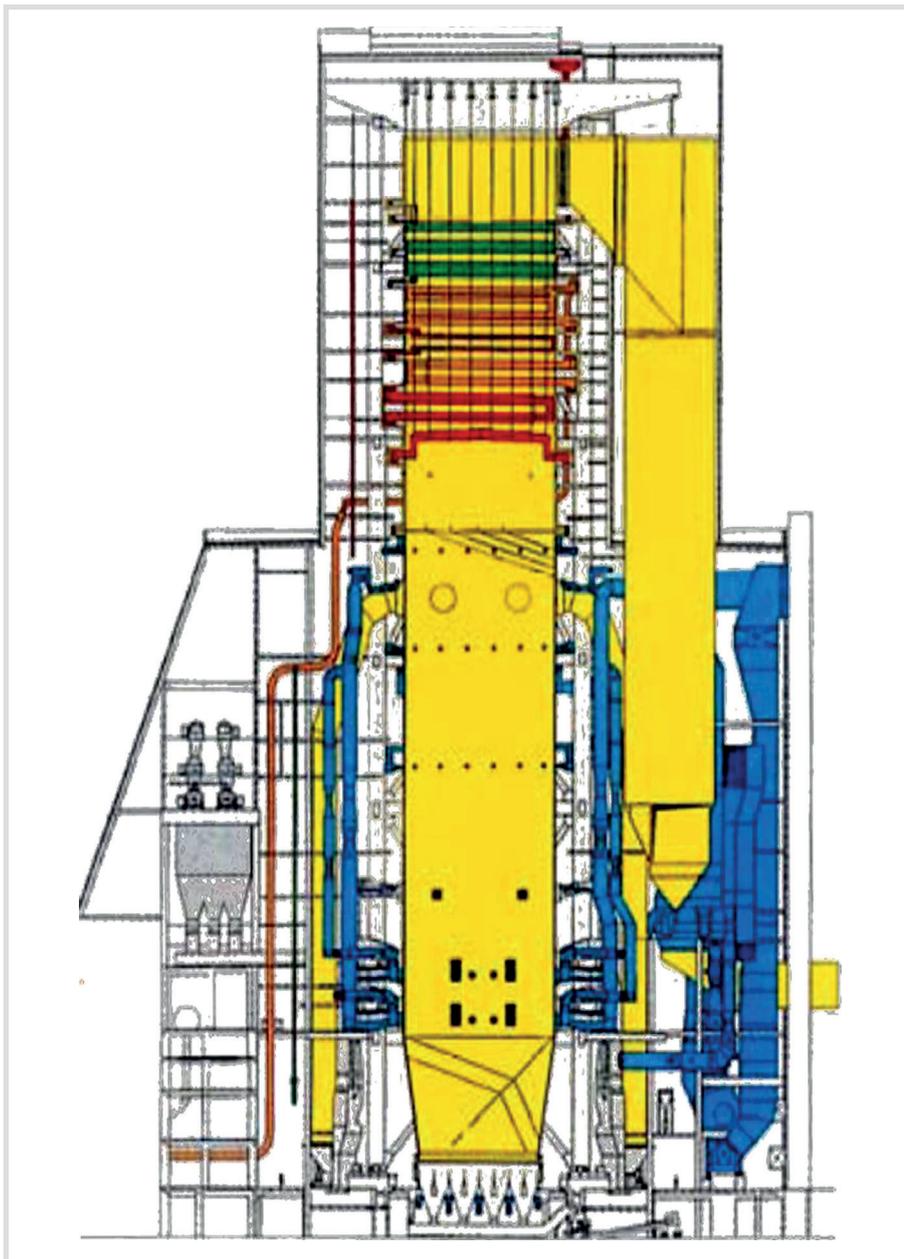


Bild 1. Dampferzeugerfeuerung des Kraftwerks Schwarze Pumpe.

können auf der Basis der insgesamt generierten Ergebnisse die erforderlichen Justierungen und Optimierungen der Dampferzeugerfeuerungen durchgeführt und dokumentiert werden.

Flammenwächter

Der übliche technische Anwendungsbereich eines Flammenwächters ist das sicherheitsgerichtete Überwachen einer Brennerflamme. Das dabei generierte Signal gibt Auskunft über das Vorhandensein der Flamme und wird in der sicherheitstechnischen Leittechnikstruktur zur Freigabe bzw. Abschaltung der Brennstoffzufuhr verwendet. Die elektrische Signalgröße des Flammenwächters wird aus der detektierten pulsierenden Strahlungsintensität im UV-Bereich (0,22 µm bis 0,36 µm) oder im IR-Bereich (1,0 µm bis 1,7 µm) erzeugt. Eine Variante des Flammenwächters ist die Ausführung als

Doppelsensor, der in der Lage ist, beide Spektralbereiche gleichzeitig zu erfassen. Über die Software des Flammenwächters kann das Signal auf die Intensität verschiedener Frequenzbereiche (5 bis 160 Hz) hin analysiert werden. Dabei ist der von einer Flamme ausgestrahlte Frequenzbereich abhängig vom Flüchtiganteil des Brennstoffes (z.B. bei Gasflammen bis 100 Hz, bei Braunkohleflammen bis 40 Hz). Die Intensität der einzelnen Flammenfrequenzen wird prozentual dargestellt. Für den normalen Einsatz als Flammenüberwachung wird für eine charakteristische Frequenz in Abhängigkeit des eingesetzten Brennstoffes eine Intensität von > 70% ein EIN-Signal und < 30% ein AUS-Signal an die Leittechnik ausgegeben. Darüber hinaus wird durch die Software aus allen Frequenzen ein Effektivwert (RMS, Root-Mean-Square-Signal) gebildet, der Auskunft über die Stabilität der Flamme gibt.

Für die Überwachung der Flamme ist der Flammenwächter vorzugsweise schräg in Strömungsrichtung des ausströmenden Brennstoffs hinter dem Brenner angeordnet und detektiert mit einem Sichtwinkel von 8° das erste Drittel der Flamme ab Brennermund (Bild 2 und 3). In diesem Bereich der Flamme ist durch die prompte Verbrennung der flüchtigen Bestandteile des Brennstoffs mit einem starken Flackern zu rechnen. Im weiteren Verlauf der Flammenausbildung findet der Koksabbrand bei niedrigeren Frequenzen statt. In diesem Bereich kann es durch Fremdstrahlung von Kesselwänden und benachbarten Brennern zur Beeinflussung des Flammensignals kommen und somit eine Zuordnung zum jeweiligen Brenner und dessen Verbrennungsverhalten beeinflussen (Bild 3).

Aus den vom Flammenwächter gebildeten Signalen (Intensität der einzelnen Frequenzbänder und RMS-Signal) kann man Rückschlüsse auf das Verhalten der Flamme bezüglich Zündung, Verbrennung und



Bild 2. Typische Installationen von Flammenwächtern (links Brennkammerdecke und rechts Dampferzeugerwand).

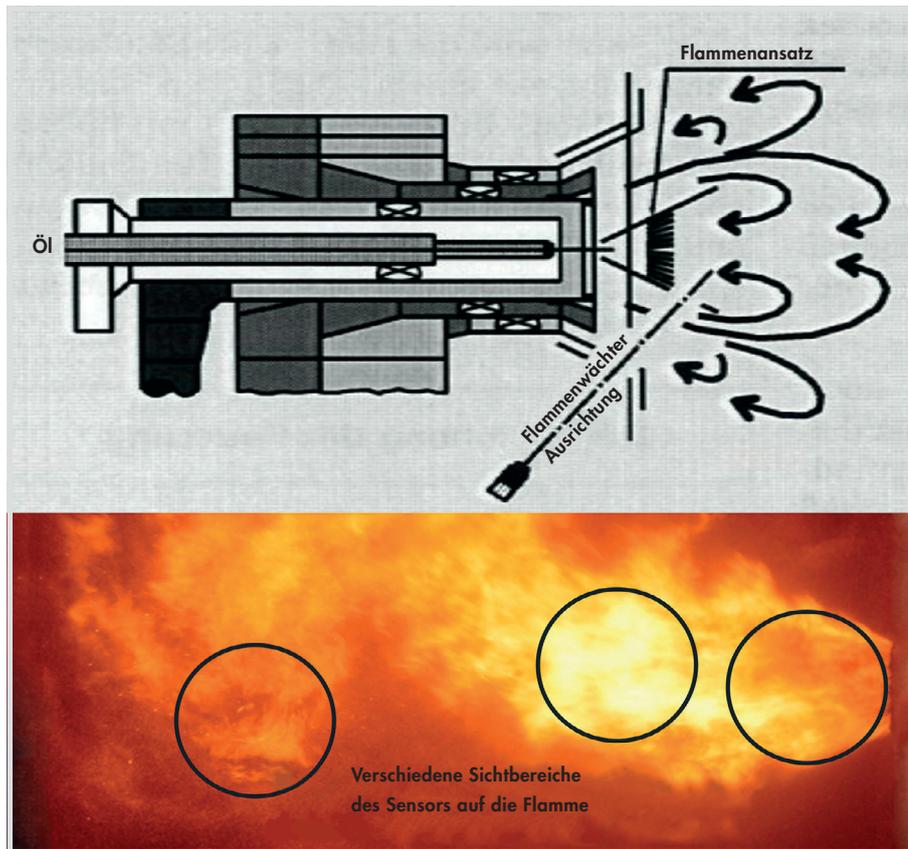


Bild 3. Anordnung [3] und Sichtbereiche eines Flammenwächters.

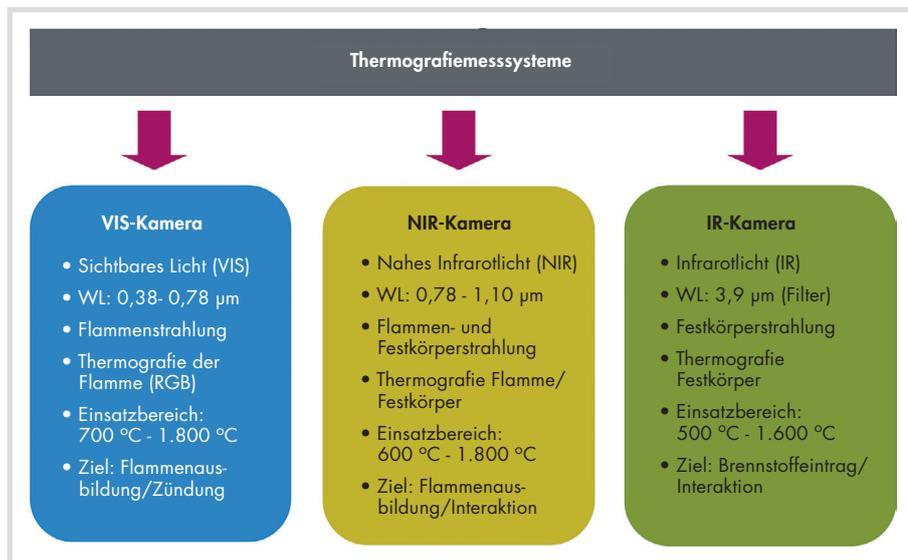


Bild 4. Übersicht zu Thermografiemesssystemen.

Ausbrand ziehen sowie Änderungen in der Zusammensetzung der Verbrennungsgase (NO_x und CO) bei Variation der Feuerungseinstellungen ableiten.

NIR-Brennerthermografie

Für Messungen von Brennerflammen und dem Zusammenwirken benachbarter Brenner in Dampferzeugerfeuerungen können prinzipiell verschiedene Thermografiemesssysteme zum Einsatz kommen (Bild 4). Die Auswahl richtet sich nach der Aufgabenstellung, dem Feuerungssystem, dem eingesetzten Brennstoff und dem

zu erwartenden Temperaturbereich. Zu berücksichtigen sind dabei ebenfalls die Zugänge in Form der Kesselluken zum Dampferzeuger.

Auf Grund des Messprinzips des Messensors ergeben sich unterschiedliche Bereiche der Brennerflamme, welche messtechnisch erfasst werden können. Messsysteme, die im sichtbaren Spektralbereich des Lichts (VIS) arbeiten, können bevorzugt zu Messungen im Brennernahfeld (Flammenstrahlung) eingesetzt werden. Physikalisch bedingt bzw. durch das Vorhandensein der Gasflamme als Volumenkörper und unter

Berücksichtigung der Gaszusammensetzung sowie des Aschegehalts des Brennstoffs besitzen VIS-Systeme eine geringe Durchdringung des Flammenkörpers im Feuerraum des Dampferzeugers [4, 5, 6]. Zur Temperaturmessung wird bei den VIS-Systemen die Verhältnisprometrie angewendet und entsprechend der Strahlungsintensität der Rot- und Grünanteil ausgewertet [6].

Messsysteme auf der Basis eines Infrarot-Sensors (Bolometer- oder Quantendetektoren, [4, 6]) werden für Messungen der Festkörpertemperaturen eingesetzt. Die Strahlungsintensität der bei der Verbrennung relevanten Gaskomponenten CO , CO_2 und H_2O ist bei der Wellenlänge von $3,8\mu\text{m}$ bis $4,0\mu\text{m}$ vernachlässigbar. Auf Grund dieser physikalischen Eigenschaft wird ein Schmalbandfilter bei $3,9\mu\text{m}$, dem als Transparenzfenster definierten Bereich, verwendet und die im Wesentlichen vorherrschende Gasflamme im Feuerraum quasi ausgeblendet. Auf dieser Grundlage besteht die Möglichkeit, Festbetttemperaturen einer Rostfeuerung, die Temperaturen des eintretenden Brennstoffmassenstroms eines Einzelbrenners oder die Temperaturen der Kesselinnenwände zu erfassen.

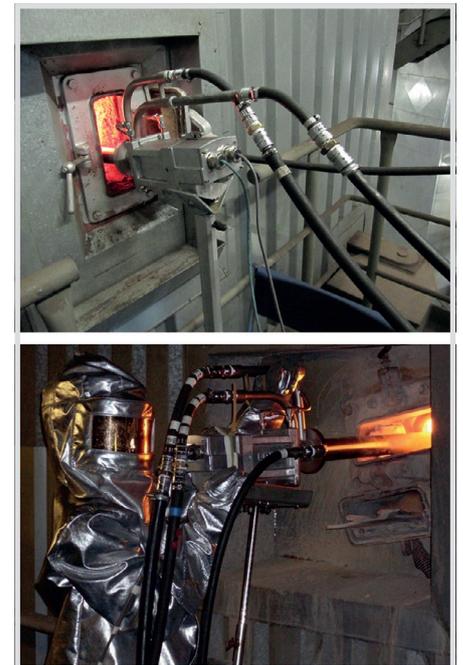


Bild 5. Stationärer und mobiler Messeinsatz eines NIR-Thermografiemesssystems.

Beim Einsatz eines NIR-Thermografiemesssystems werden Sensor-Arrays verwendet, welche die elektromagnetische Strahlung im spektralen Bereich des nahen Infrarots von $0,7\mu\text{m}$ bis $1,3\mu\text{m}$ detektieren [4]. Damit ergibt sich, dass Anteile der Flammen- und Festkörperstrahlung messtechnisch erfasst werden. Die Durchdringungstiefe im Feuerraum ist im Vergleich zum VIS-Bereich deutlich höher. Die Brennerflammen können vom Eintritt in

den Feuerraum bis hin zu den Interaktionen mit benachbarten Brennern und bei der Ausbildung der gesamten Flamme beispielsweise in der Brennebene gemessen werden. Es entsteht ein nahezu ganzheitliches Bild der Brennerflammen. Detaillierte und weiterführende Informationen zu den Grundlagen der Temperaturmessung in Feuerräumen können der Literatur entnommen werden [4, 5, 6 u.a.].

Auf der Basis von Ergebnissen aus Eignungsuntersuchungen an der Vattenfall-Forschungsanlage [1, 2] und weiteren kommerziellen Kraftwerken wurde für die Erfassung der Flammgeometrie bzw. der Flammnahe der einzelnen Brenner und zur Lokalisierung der Flammenlage in Mehrbrennerfeuerungen ein mobiles NIR-Thermografiemesssystem verwendet (Bild 5). Das NIR-System besitzt einen fotoelektrischen Detektor (Sensor-Array), welcher den NIR-Spektralbereich von 0,78 µm bis 1,10 µm erfasst. Die Auflösung des Sensor-Arrays beträgt 656 x 494 Pixel. Dieser befindet sich in einem wasser- und luftgekühlten Gehäuse. Das Objektiv mit einem Bildfeld von 90° x 67,5° ist ebenfalls in das Gehäuse bzw. in eine Lanze integriert. Der Temperaturmessbereich kann durch die Kalibrierung auf Basis der Schwarzkörpertemperatur entweder zwischen 800°C und 1.400°C oder 1.000°C und 1.800°C liegen. Die maximale Bildfrequenz des Sensor-Arrays beträgt 30 Hz, so dass 30 Messungen je Sekunde mittels der ca. 324.000 Pixel (kalibrierter Messpunkt) erfolgen. Mit einem Sondendurchmesser von 54 mm, dem wassergekühltem Gehäuse und einer Druckluftspülung des Objektivs, der in den Feuerraum eingebrachten Lanze, können Messungen in den meisten Anwendungsfällen über die Kesselluken der Verdampferwände durchgeführt werden.

Basis der konzeptionellen Vorgehensweise sind Einzelmessungen an jeder in brennernahe befindlichen Kesselluke (Bild 6). Innerhalb von Versuchszeiträumen von ein bis zwei Arbeitstagen werden Messungen an einem stationären Betriebspunkt des Dampferzeugers zur Bestimmung des Feuerungsstadiums durchgeführt. Die Messdurchführung an den jeweiligen Kessel-

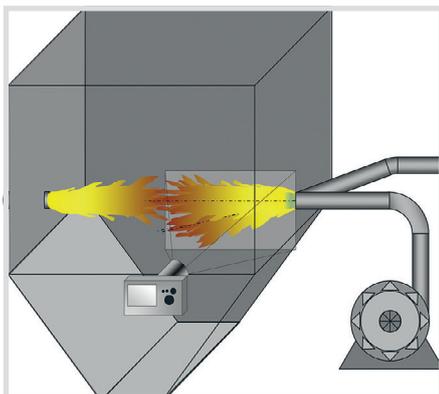


Bild 6. Prinzipielle Messanordnung der NIR-Brennerthermografie.

luken kann nacheinander erfolgen, was die bisherigen reproduzierbaren Projektergebnisse zeigen [7].

Aus den Messungen an den Einzelbrennern lassen sich Ergebnisse hinsichtlich der

- Flammgeometrie und des Temperaturverlaufs entlang des Ausbrandwegs,
- Ausbildung der Zündbereiche,
- Stabilitäten oder Instabilitäten austretender Verbrennungsluft und Brennstoff sowie
- Schiefagen in der Luft- und Brennstoffaufgabe

ermitteln. Die weiterführenden Auswertungen der Messergebnisse erfolgen im Büro mit insgesamt vier Bildschirm-Rechnereinheiten. Unter Berücksichtigung weiterer Betriebsmessgrößen (Brennstoffmassenstrom- und Primärluftverteilung, Sekundärluftvolumenströme u.a.) werden

- das Zusammenwirken benachbarter Brenner und direkte Einflüsse der Brennerimpulse auf Seiten- oder benachbarter Vorder- und Rückwände,
- Wandberührungen von Flammen und
- Aussagen zur Verschlackungsbildung

sowie abschließend schematische Grafiken zur Feuerlage der jeweiligen Versuchspunkte erarbeitet (Kapitel 5). Mittels der gesamten Ergebnisse kann der tatsächliche Ist-Zustand der Feuerung unter Berücksichtigung der Auswirkungen auf die Flammnahe der Einzelbrenner sowie deren Interaktionen mit benachbarten Brennern bestimmt werden.

Ergebnisse zum Einsatz der Flammenwächter

Der bisherige technische Anwendungsbereich eines Flammenwächters beschränkt sich auf die Überwachung der Flamme, so dass bei Vorhandensein einer definierten Strahlungs- bzw. Flackerintensität bei der Zündung die Brennstoffdosierung sicherheitsgerichtet freigegeben oder im entgegengesetzten Fall abgeschaltet wird. Im Rahmen der Untersuchungen zur Feuerungsanalyse einer Einzelbrennerflamme an der Vattenfall-Forschungsanlage wurden bereits Ergebnisse zum Einsatz eines Flammenwächters zur weiterführenden Analyse des Feuerungszustands des Brenners erzielt [2]. Die Zielstellung dieser Untersuchungen war es, Messdaten des Flammenwächters für die grundsätzliche Bewertung des Verbrennungsverhaltens eines Einzelbrenners (als Deckenbrenner ausgeführt) eines 30 MW_{th}-Dampferzeugers zu generieren. Es wurden mögliche Korrelationen zwischen den Signalen des Flammenwächters und den Betriebsparametern des Brenners wie

- der Brennerdrall,
- die Dampferzeugerleistung,
- die Brennerstöchiometrie,
- die Sekundärluftvertrimmung und
- die Flammenstabilitätsgrenze

untersucht. Dazu konnte der Messbereich des Flammenwächters in der Form konfiguriert werden, dass die Schwellenwerte der Intensität und Flackerfrequenz angepasst wurden.

Im Rahmen dieser Untersuchungen zur grundsätzlichen Eignung des Flammenwächters zur Feuerungsanalyse in Bezug auf die Bewertung der Betriebsparameter zeigten sich folgende zusammengefasste Ergebnisse [2].

- Die Intensität des Flammenwächtersignals verläuft proportional zur Dampferzeugerleistung bzw. der Brennerleistung.
- Das Flammenwächtersignal konnte den Änderungen des Brennerdralls und deren Auswirkungen auf das Verbrennungsverhalten nicht eindeutig zugeordnet werden.
- Eine Bewertung der Brennerluftzahl konnte auf Grund einer eindeutigen Zuordnung und Interpretation von damit verbundenen Signaländerungen dem Flammenwächtersignal zugeordnet werden. Es wurde insbesondere der Strahlungsanteil im UV-Spektrum als geeignet lokalisiert. Die Intensität stieg linear mit zunehmendem Luftverhältnis an. Der IR-Bereich zeigte nicht vergleichbare Ergebnisse bei Variation des Luftverhältnisses.
- Der Einfluss der Sekundärluftvertrimmung auf das Messsignal des Flammenwächters konnte nicht aufgezeigt werden.

In großtechnischen Dampferzeugerfeuerungen bestehen weitere Einflussfaktoren auf die Bewertung und Interpretation der Flammenwächtersignale hinsichtlich der Feuerungsbewertung der Einzelflammen. Es wurden weiterführende technische Untersuchungen zur Eignung in Mehrbrennerfeuerungen durchgeführt. Ein Schwerpunkt waren Untersuchungen von Korrelationen zwischen der Flammenintensität und der Abgasemission NO_x in einem kommerziellen Dampferzeuger, welcher mit Drallbrennern (mit Trockenbraunkohle (TBK) betriebenen) und Strahlbrennern ausgerüstet ist.

Es wurden Versuche zur Luftmengen-Vertrimmung zwischen den fünf in Betrieb befindlichen Brennern durchgeführt. In diesem Untersuchungsschritt wurde demzufolge die Brennerluftzahl an jeweils einem Brenner variiert und die Gesamtluftmenge an Verbrennungsluft weitestgehend konstant gehalten. Im Ergebnis der Untersuchungen wurde mit dem Anstieg der Flammenintensitäten hoher Frequenzen im UV-Spektrum eine Zunahme der NO_x-Emission (Betriebsmessung) lokalisiert, Bild 7. Bei Abnahme der Flammenintensitäten trat wiederum eine Verringerung der NO_x-Emission auf. Gleichzeitig wurde beim Absinken der Flammenintensität ein Anstieg der CO-Emission mittels der Betriebsmessung erfasst. Im IR-Spektrum waren diese

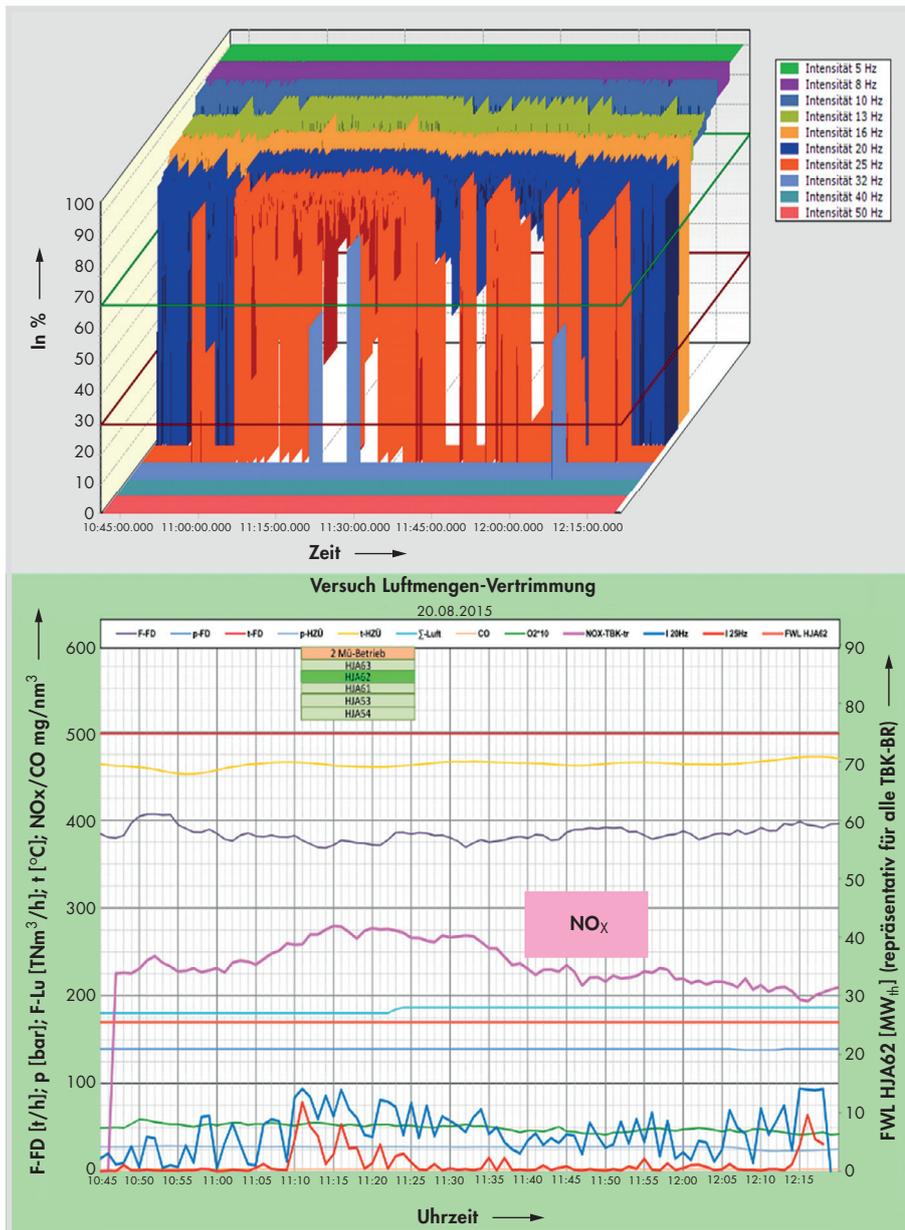


Bild 7. Verlauf der NO_x-Konzentration und Flammenintensität bei 20 und 25 Hz.

Korrelationen nur in geringem Maße zu verzeichnen. Dies zeigt die bekannten Zusammenhänge der NO_x-Bildung und -minderung unter Berücksichtigung der CO-Konzentration bei Veränderungen der Brennerluftzahl (reduzierender und oxidierender Betrieb).

Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf weitere Brennerflammen in der Dampferzeugerfeuerung war möglich. Für die Überwachung des gesamten Feuerraums mit mehreren Brennern ist es notwendig, für jeden Brenner einen Flammenwächter zu installieren und die einzelnen Daten den jeweiligen Brennern zuzuordnen und auszuwerten.

Ergebnisse zum Einsatz der NIR-Brennerthermografie

Im Rahmen der Eignungstest wurden alle drei möglichen Thermografiemesssysteme

[7] und anhand der Ergebnisse wurde die NIR-Brennerthermografie als geeignet ausgewählt. Es wurden wiederholt erfolgreiche Untersuchungen zum Verbrennungsverhalten in Dampferzeugerfeuerungen durchgeführt. Gegenstand der Aufgabestellungen waren dabei die Analyse und Bewertung des Ist-Zustands der Feuerung in Abhängigkeit der jeweiligen Feuerungsart, der konstruktiven Gegebenheiten des Dampferzeugers und des eingesetzten Brennstoffs. Bei der Bewertung des Ist-Zustands der Feuerung werden sowohl die Einzelbrenner als auch deren Zusammenwirken im gesamten Brennergürtelbereich des Dampferzeugers analysiert. So kann das Verbrennungsverhalten (Zündung, Flammenstabilität, Ausbrand) der Flamme bewertet werden und in Kombination mit Ergebnissen aus weiteren Versuchsmessungen (z.B. Mühlenmessung, Verbrennungsluftmengenmessung) und Betriebsmessdaten die Ursachen für ein eventuell auffälliges Verhalten ermittelt werden.

Im Folgenden werden Ergebnisbeispiele von mit Braunkohle befeuerten Dampferzeugern dargestellt. Es wurden Messungen an allen Einzelbrennern durchgeführt. Im Bild 8 ist eine Ergebnisaufnahme eines Strahlbrenners mit zusätzlichen Diagrammen der gekennzeichneten Temperaturmesspfadlinien dargestellt. Der Strahlbrenner besteht aus zwei Hauptbrennern und einem Nachreaktionsbrenner (darüber befindlich angeordnet und nicht im Bild gezeigt). In dem Ergebnisbild sind die Eintrittskanäle der Ober-/Zwischen- und Unterluft zu erkennen. In der Nähe der unmittelbaren Einmischung der Sekundärluft in den Bereich der Brennstoff-Traggasströmung befinden sich Bereiche mit höheren Temperaturen. Entlang des Reaktionswegs der Strahlbrennerflamme findet ein kontinuierlicher Temperaturanstieg statt. Die Anstiege der Temperaturmesspfadlinien

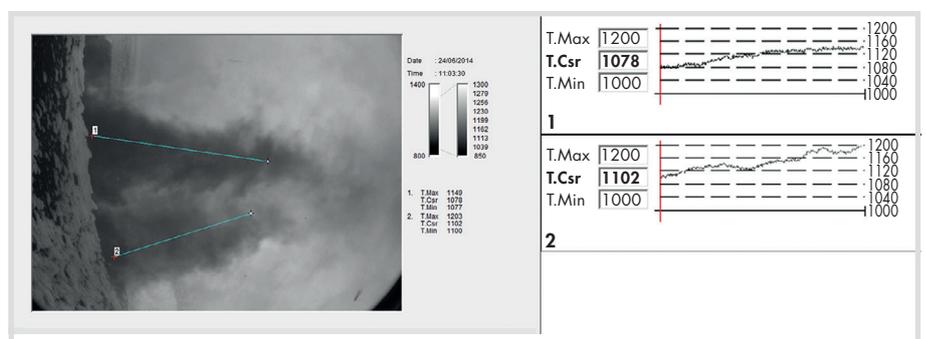


Bild 8. Ergebnisbild der NIR-Thermografiemessung eines Strahlbrenners (Anordnung des NIR-Messsystems gemäß Bild 6).

der Übersicht aus Bild 4 im Dampferzeuger einer Einzelbrenneranlage (Vattenfall-Forschungsanlage) und in einem kommerziellen Dampferzeuger auf ihre Einsatzfähigkeit für die Bearbeitung von Aufgabestellungen der Feuerungsbewertung und -optimierung getestet [1, 2]. Für die ausgearbeitete konzeptionelle Vorgehensweise

und das Temperaturniveau vom oberen und unteren Hauptbrenner sind unterschiedlich ausgeprägt. Das deutet darauf hin, dass auf Grund von unterschiedlichen Brennstoffanteilen die Luftzahlen ungleich ausgebildet sind und/oder unterschiedliche Partikelgrößenverteilungen auf den jeweiligen Hauptbrenner nach Mühlen-



Bild 9. Lokalisierung von Wandberührungen der Brennerflammen an der Rückwand.

sichter vorliegen, die sich unmittelbar auf das Zünd- und Verbrennungsverhalten der Einzelbrenner auswirken.

Auf Grund der Lanzendimension (Kapitel 3.2) und der Größe der Kesselluken kann das NIR-Messsystem nach unten und oben sowie seitlich ausgerichtet werden. Bei Messungen in Richtung Brennkammertrichter von beiden Seiten der Hauptbrenner wurden direkte Wandberührungen von Brennerflammen oder Teilströmen lokalisiert (Bild 9). In den beiden oberen Ergebnisbildern im Bild 9 ist die, von den an der gegenüberliegenden Rückwand befindlichen Hauptbrennern strömende Brennerflamme auf Höhe des Trichterübergangs zu erkennen. Nach dem Auftreffen an der Vorderwand wird die Brennerflamme abgelenkt und strömt auf Grund der im Brennkammertrichter aufgegebenen Rostluft zunächst entlang der Vorderwand unterhalb der Hauptbrenner (untere Ergebnisbilder Bild 9).

An der Dampferzeugerfeuerung traten verstärkt Verschlackungen im Bereich des Brennergürtels auf. Durch die in der Wandnähe ablaufenden Verbrennungsreaktion entsteht lokal eine erhöhte Temperatur, die Partikel treffen direkt auf die Dampferzeugerwand und es werden der Sauerstoff verbraucht sowie kritische Konzentrationen an CO gebildet.

Um eine Reproduzierbarkeit der mittels NIR-Thermografie gewonnenen Ergebnisse hinsichtlich der Wandberührung von Brennerflammen im Brennergürtelbereich zu bestimmen und um die Konzentrationen an O₂ und CO in Wandnähe in die Bewertung einzubeziehen, wurden Wandatmosphärenmessungen an vorhandenen Messstützen im Bereich der Stege der Dampferzeugerwand durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten in Übereinstimmung

mit der NIR-Thermografie, dass Wandberührungen von Brennerflammen stattfinden und der Sauerstoff in Wandnähe entlang des Strömungswegs durch die Verbrennungsreaktion bereits aufgebraucht war (Bild 10). Des Weiteren konnte lokalisiert werden, dass die Brennstoffsträhne zwischen den beiden Hauptbrennern der Vorderwand aufwärts gerichtet in Richtung Dampferzeugeraustritt strömt. Mit Hilfe dieser Ergebnisse konnten die Ursachen für die Verschlackungsbildung im Brennergürtelbereich aufgeklärt werden, die Bereiche mit kritischen Wandkonzentrationen bestimmt und Optimierungen vorgenommen werden [7].

Im Rahmen von NIR-Messungen an einem weiteren Dampferzeuger wurde ebenfalls festgestellt, dass sich entsprechend der Brenneranordnung und der Impulsverhältnisse der Brennerflammen gegenseitige

Beeinflussungen bzw. Ablenkungen ausbilden. Diese Beeinflussungen haben zur Folge, dass Brennerflammen aus der vorgegebenen Strömungsrichtung (zum Tangentialkreis) abgelenkt werden und Wandberührungen mit resultierenden Verschlackungen in Dampferzeugerecken verursachen (Bild 11).

In dem oberen Ergebnisbild der NIR-Messung ist das Flammenende der Hauptbrenner des unteren Ergebnisbildes zu erkennen. Das Flammenende dreht in Richtung der Dampferzeugerecke ein und erzeugt Wandberührungen mit resultierenden Verschlackungen. In der unteren Ergebnisdarstellung ist dagegen die Oberfläche der Dampferzeugerwand (Rohr-Steg-Rohr) bei niedrigeren Temperaturen zu identifizieren.

Um die Ursachen für die Ablenkungen zu ermitteln, wurden weitere Ergebnisse aus Versuchsmessungen an der Mühle (Mühlenmessung) in die Auswertung einbezogen. Im Bild 12 sind neben den Ergebnisbildern der Thermografiemessung des Haupt- und Brüdenbrenners die Ergebnisgrößen der Mühlenmessung aufgeführt. Unter Berücksichtigung der Brennerimpulse der Hauptbrenner und der Brennstoffvertrimmung der Betriebsführung wurde die Ablenkung des Hauptbrenners B4 auf Grund der Ausbildung der Gesamtfeuerlage verursacht. Des Weiteren ist im Ergebnisbild des Brüdenbrenners eine stark aufwärts gerichtete Ablenkung der Brennerflamme zu erkennen, die ebenfalls Verschlackungen oberhalb des Brennermunds verursacht und die Wirksamkeit der Brennstoffstufung vermindert.

Unter Berücksichtigung der dargestellten Ergebnisse und Vorgehensweise der Untersuchungen einschließlich der Auswertungen an vier Bildschirm-Rechnereinheiten im Büro wurden die schematischen Feuerlagen in der Draufsicht der Hauptbrenner erstellt. Im Rahmen der Untersuchungen wurden an allen Kesselluken Messungen

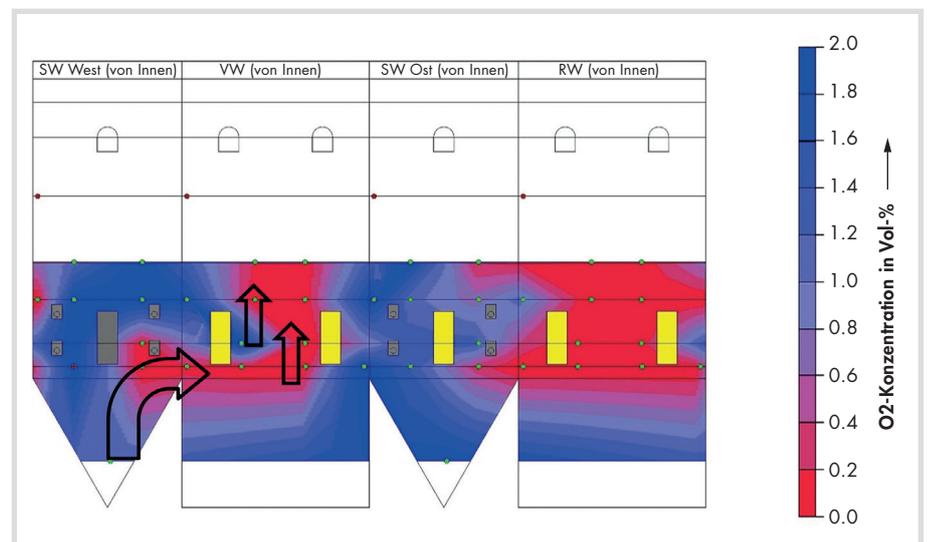


Bild 10. Ergebnisse der Wandatmosphärenmessung der Gaskomponente O₂ zur Bestimmung der Reproduzierbarkeit.

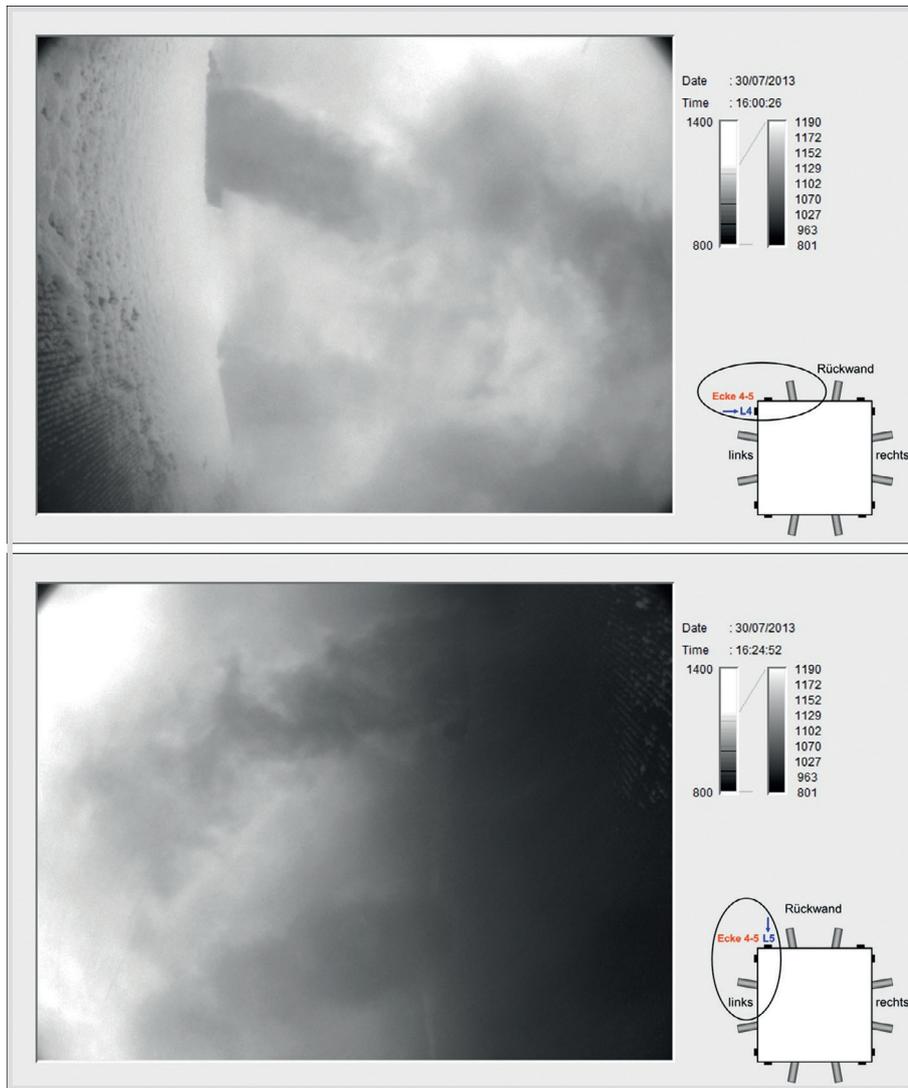


Bild 11. Gegenseitige Beeinflussung von Strahlbrennern von zwei benachbarten Hauptbrennern einer Dampferzeugerecke.

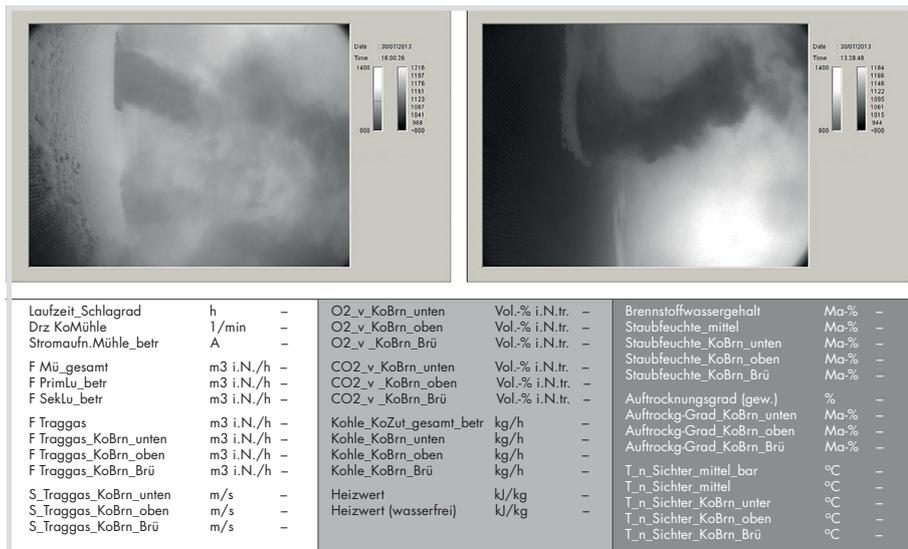


Bild 12. Ergebnisbilder der NIR-Thermografie des Haupt- und Brudenbrenners sowie der Brennersteckbrief mit Angaben der Messgrößen der Mühlenmessung.

mittels der NIR-Thermografie durchgeführt, um zum einen die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu bestimmen und zum anderen die gesamte Feuerlage zu ermitteln. Daraus ergeben sich die Ergebnisbil-

der zur Feuerlage im horizontalen Schnitt des Dampferzeugers im Bild 13. Auf Grund der gewählten Brennstoffvertrimmungen, bei denen entsprechend der in der Leittechnik hinterlegten Kurven die er-

forderlichen Verbrennungsluftvolumenströme eingestellt werden, und des außer Betrieb befindlichen Brenners B3 sowie der geometrischen Brenneranordnung ergeben sich die resultierenden Ablenkungen in die Dampferzeugerecken (obere Feuerlage in Bild 13).

Mit Hilfe der NIR-Thermografiemessungen wurden Parametervariationen der Brennstoffvertrimmungen unter Berücksichtigung der außer Betrieb befindlichen Mühle untersucht, um das Zustandekommen der Ablenkungen aufzuklären und Maßnahmen zur Optimierung abzuleiten. Es zeigte sich, dass beim 7-Mühlenbetrieb die Möglichkeit besteht, eine zentrale Feuerlage weitestgehend ohne Ablenkungen von Brennerflammen und Wandberührungen im Brennergürtelbereich einzustellen (untere Feuerlage in Bild 13). Aus der Systematik der Versuchsdurchführung und der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse an allen Dampferzeugerecken sowie weiteren Dampferzeugern wurden Vertrimmungsregeln für die Betriebsführung erarbeitet. Diese Regeln bewirken in Abhängigkeit der außer Betrieb befindlichen Mühle ein gleichberechtigtes Erreichen aller Brennerflammen des Tangentialkreises und eine Ausbildung einer weitestgehend zentralen Feuerlage. Diese Ergebnisse wurden auf einen weiteren Kraftwerksstandort übertragen [7]. Es konnten die Verschlackungsneigung deutlich vermindert und die Verfügbarkeit der Dampferzeugeranlagen erhöht werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Für den Einsatz zur Feuerungs- und Flammenbewertung in Dampferzeugern wurden Flammenwächter (Doppelsensoren UV und IR) und ein NIR-Thermografiemesssystem untersucht. Bei den Untersuchungen des Flammenwächters an der Einzelflamme zeigte sich, dass objektive Flammenkriterien auf der Basis der Messdaten der Emissionsintensitäten der Frequenzbänder im UV-Spektralbereich abgeleitet werden können. Es konnten sowohl reproduzierbare Rückschlüsse auf die Flammenstabilität als auch auf die Abgasemissionen aufgezeigt werden. Insbesondere die UV-Intensitäten korrelieren mit den NO_x-Konzentrationen im Rauchgas des Dampferzeugers. Damit besteht die Möglichkeit, Betriebsparameter für die primäre Minderrung an NO_x und CO zu bestimmen.

Die NIR-Thermografie konnte für Messungen zur Erfassung und Bewertung des Ist-Zustands von Dampferzeugern erfolgreich eingesetzt werden. Es wurden konkrete Aufgabenstellungen der Kraftwerksbetreiber bearbeitet. Beim Kraftwerksbetrieb traten verstärkt Verschlackungsneigungen im Bereich des Brennergürtels auf, die selbst den Einsatz der Sprengreinigung erforderten. Die gegenseitigen Beeinflussungen und Ablenkungen benachbarter

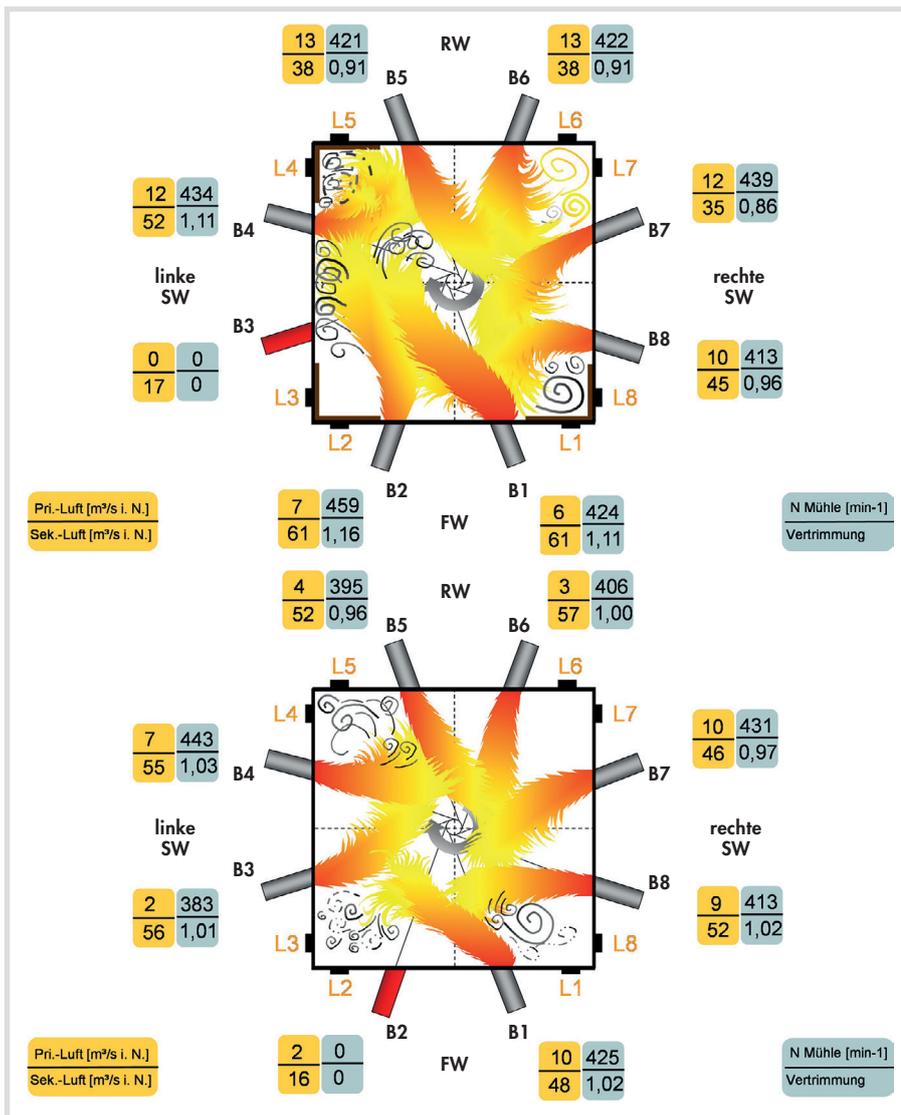


Bild 13. Schematische Darstellung der Gesamtfederlage mit tangential ausgeprägtem Brennkreis.

Brenner führten in der gesamten Federlage zu direkten Wandberührungen, die Verschlackungen und kritische Wandkonzentrationen der Komponenten O_2 und CO erzeugten. Auf Grund der Brennstoffvertrimmungen der Brennstoffanteile der jeweiligen Mühlen entstanden diese gegenseitigen Ablenkungen der Brennerflammen. Es wurden damit die Ursachen für die Verschlackungen aufgeklärt und Maßnahmen abgeleitet sowie umgesetzt, um die Verschlackungen weitestgehend zu vermindern. Darüber hinaus kann mittels der NIR-Thermografie das Zünd- und Verbrennungsverhalten untersucht werden. Die reproduzierbaren Ergebnisse konnten auf weitere Kraftwerksstandorte übertragen werden.

Für die Anwendbarkeit der Flammenwächter ist es erforderlich, systematisch die weiteren technisch relevanten Einflussgrößen auf die Messergebnisse im Rahmen eines Entwicklungsvorhabens zu untersuchen. Es besteht die Möglichkeit, die Flammenwächter als Online-System zum einen zur Flammenüberwachung und zum anderen zur Feuerungsführung einzusetzen. Dazu müssen Messungen zur Bestimmungen des tatsächlichen Feuerungsgrundzustands erfolgen. Hierfür ist die NIR-Thermografie unter Einbeziehung weiterer Versuchsmessungen geeignet. Mit Hilfe der Ergebnisse können der tatsächliche Betriebs- und Anlagenzustand der Dampferzeugerfeuerungen abgebildet werden. Es können primäre Minde-

rungsmaßnahmen hinsichtlich der abgasseitigen Emissionen an NO_x und CO dargelegt und bei der Umsetzung begleitet werden. Es bestehen Einsatzmöglichkeiten bei der Unterstützung der Betriebsführung kommerzieller Kraftwerke im Rahmen von Inbetriebnahmen neuer oder modernisierter Anlagen. Aus den Erfahrungen der Projektbearbeitungen zeigte sich ebenfalls, dass durch den Einsatz der NIR-Thermografie und Nutzung der konzeptionellen Vorgehensweise der Untersuchungen auch mit Steinkohle befeuerte Dampferzeuger optimiert werden können [7]. Dadurch werden die Verfügbarkeit der Dampferzeuger erhöht und die Betriebskosten sowie die Kosten für Revisionen vermindert.

Literatur

- [1] U. Burchardt, S. Lysk, S. Griebe, H. Kaß, G. Weiß, R. Giering, M. Glazer: *Erkenntnisse aus dem Testbetrieb und Ausblick zur weiteren Nutzung der Forschungsanlage von Vattenfall. Kraftwerkstechnik 2013*, Sichere und nachhaltige Energieversorgung – Band 5, Seite 99-115, ISBN 978-3-944310-04-6.
- [2] S. Griebe, T. Faustmann, V. Biesold, C. Lösche: *Feuerungsanalyse am Brenner der Oxyfuel-Forschungsanlage*. VPC-Bericht ED/031/14, 2014, unveröffentlicht.
- [3] H. Chr. Schröder, J. Schlessing: *Sichere Feuerung unter Berücksichtigung des Umweltschutzes*. VGB Kraftwerkstechnik 2/1999, Seite 3-9.
- [4] F. Bernhard: *Handbuch der technischen Temperaturmessung*. Springer Verlag, Berlin, 2004, ISBN 978-3-642-24506-0.
- [5] H. B. Keller, J. Matthes, R. Schreiner, O. Gohlke, J. Horn, H. Schönecker: *Kamerabasierte Feuerungsregelung bei stark schwankender Brennstoffzusammensetzung*. VGB Powertech 3/2007, Seite 85-92.
- [6] S. Zipser, A. Gommlich, J. Matthes, Ch. Fouda, H. B. Keller: *Anwendung des INSPECT-Systems zur kamerabasierten Analyse von Verbrennungsprozessen am Beispiel der thermischen Abfallbehandlung*. Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte FZKA 7014, Februar 2005, Karlsruhe.
- [7] S. Griebe, H. Kaß, V. Biesold, G. Stecklina, H. Kirsche, T. Thimme: *Ist-Zustandsbewertung und feuerungstechnische Optimierung von Dampferzeugern – Ein methodischer Ansatz mittels kombinierter Messverfahren*. Vortrag, 48. Kraftwerkstechnische Kolloquium, 18./19. Oktober 2016, Dresden.



... FOR BETTER RESULTS!

Sitz der Gesellschaft:

VPC GmbH
Kraftwerkstraße 22
03226 Vetschau/Spreewald
Deutschland
Tel.: +49 35433 75-0

contact@vpc-group.biz
www.vpc-group.biz

Vertrieb:

VPC GmbH
Otternbuchtstraße 14-16
13599 Berlin
Deutschland
Tel.: +49 30 315118-200
Fax.: +49 30 315118-153