

Ist-Zustandsbewertung und feuerungstechnische Optimierung von Dampferzeugern – Ein methodischer Ansatz mittels kombinierter Messverfahren

Steffen Griebe, Helge Kaß, Volker Biesold, Gerd Stecklina, Holger Kirsche und Thorsten Thimme

1.	Einleitung	791
2.	Konzeptionelle Vorgehensweise	793
3.	Messtechniken zur Feuerungsanalyse.....	795
3.1.	Brennerthermografie und Feuerlage.....	795
3.2.	Brennstoffmassen- und Primärluftvolumenstrom	796
3.3.	Gaskonzentrationen, Wandatmosphäre und Rauchgaszusammensetzung	796
4.	Ergebnisse zur Optimierung von Dampferzeugerfeuerungen.....	797
4.1.	Braunkohle-Dampferzeuger – Beispiel 1	797
4.2.	Steinkohle-Dampferzeuger – Beispiel 2.....	800
4.3.	Steinkohle-Dampferzeuger – Beispiel 3.....	803
5.	Nutzen für den Dampferzeugerbetrieb der Kraftwerke.....	807
6.	Zusammenfassung	808
7.	Quellen.....	809

1. Einleitung

In der Kraftwerksindustrie besitzen die im Dampferzeuger ablaufenden Verbrennungsvorgänge der Festbrennstoffe eine wesentliche Bedeutung. In Abhängigkeit von der Qualität und Effektivität der Feuerungsführung werden die Betriebsführung und die Verfügbarkeit der Dampferzeugeranlagen beeinflusst. Unter den heutigen Einsatzbedingungen der Kraftwerke mit häufigen Lastwechseln, Teillastbetrieb und wechselnden Brennstoffen sowie deren Qualität ist die

Betriebsweise der Dampferzeuger auf der Basis definierter Feuerungsgrundparameter essentiell. Weitere Einflüsse auf die Feuerungsführung entstehen durch Alterung und Verschleiß beim Betrieb. Häufig treten Betriebsbeeinträchtigungen durch Verschlackungen, Temperaturschiefen, Erosionen, Korrosionen oder zu hohe Emissionen auf. Die Ursachen sind vielseitig und komplex. Es existieren meist mehrere Faktoren gleichzeitig, die zu diesen Betriebsbeeinträchtigungen führen.



Abb. 1: Heizkraftwerk Reuter West am Vattenfall-Standort Berlin

An Beispielen verschiedener Projekte von mit Stein- und Braunkohle befeuerten Dampferzeugern (Abbildung 1) werden die Ergebnisse von Ist-Zustandsbewertungen und Optimierungen sowie insbesondere deren Nutzen für den Dampferzeugerbetrieb aufgezeigt.

Zur Bestimmung des Ist-Zustands der Dampferzeugerfeuerung und deren weiterführende Optimierung wurde ein methodischer Ansatz mittels kombinierter Messverfahren entwickelt. In Abhängigkeit von der Feuerungsart, des eingesetzten Brennstoffes sowie von der Aufgabenstellung des Anlagenbetreibers werden zur Betriebsleit- und Messtechnik zusätzliche Messdaten von Anlagenkomponenten und der Dampferzeugerfeuerung generiert, die den tatsächlichen Feuerungsgrundzustand bestimmen lassen. Für definierte Betriebszustände können auf der Basis dieser Ergebnisse Maßnahmen zur Optimierung der Feuerungsparameter abgeleitet und umgesetzt werden. Darüber hinaus wird die Umsetzung der Optimierungen fachlich und messtechnisch begleitet.

Dies ist die Basis für die Betriebsführung der Dampferzeugerfeuerung mittels der Betriebsmess- und Leittechnik und dient zusätzlich der effizienten Nutzung von ggf. vorhandenen Online-Expertensystemen zur Feuerungsoptimierung. Es können messtechnische Überprüfungen fest eingestellter Betriebsgrößen und der betrieblichen Messtechnik vorgenommen werden. Weiterhin besteht ebenfalls die Möglichkeit, Umbaumaßnahmen im Bereich der Dampferzeugerfeuerung zu bewerten und Inbetriebnahmen zu unterstützen.

2. Konzeptionelle Vorgehensweise

Gegenstand der Aufgabenbearbeitung ist die messtechnische Erfassung des tatsächlichen Ist-Zustands der Einzelbrenner, der gegenseitigen Beeinflussungen und der Ausbildung der Feuerlage in den jeweiligen Brennerebenen sowie im gesamten Dampferzeuger. Auf der Basis der Kundenanforderung, der vorliegenden Feuerungsart und der Aufgabenstellung wird der Leistungsumfang einschließlich der erforderlichen zusätzlichen Versuchsmessungen definiert und angepasst. Dabei werden ebenfalls die eingesetzten Brennstoffe, konstruktive Gegebenheiten der Feuerung und der Einzelbrenner sowie weitere Betriebsmessdaten und Messdaten von gegebenenfalls vorhandenen Online-Expertensystemen genutzt. Hierbei ist die Einarbeitung in die vorhandene Feuerungstechnik auf der Basis der Dokumentationen und des gegenwärtigen konstruktiven Stands erforderlich.

Kernkomponenten der konzeptionellen Vorgehensweise in Bezug auf die versuchstechnischen Untersuchungen bilden die NIR-Thermografie (Naher Infrarot-Bereich) und die Kohlenstaubmessungen (Kapitel 3.1. und 3.2.). Mit diesen beiden Messsystemen bzw. -verfahren werden Ergebnisse generiert, die zum einen unmittelbar den Zustand der ablaufenden Verbrennungsvorgänge aufzeigen und zum anderen die meist nicht mittels Betriebsmesstechnik erfassten Parameter der Einzelbrenner ermitteln lassen.

Je nach Anforderung werden weitere Versuchsmessungen durchgeführt. Dazu zählt die Bestimmung von Gaskonzentrationen (Kapitel 3.3.) im Rauchgas nach Dampferzeuger oder in unmittelbarer Nähe der Dampferzeugerinnenwände (Wandatmosphärenmessungen). Die Wandatmosphärenmessungen zeigen ebenfalls unmittelbare Auswirkungen der Wandberührungen von Einzelflammen oder der Kernflamme auf. Um weitere Betriebsmessgrößen zu bewerten oder ggf. zu ergänzen, können Volumenstrommessungen mittels Staudrucksonden einbezogen oder schallakustische Messverfahren [1] zur Bestimmung des Förderverhaltens von Gas-Feststoffströmungen eingesetzt werden. Darüber hinaus werden Probenahmen von relevanten Stoffströmen und anschließende Laboranalysen durchgeführt, um zusätzliche Ergebnisse zum Ist-Zustand und zur Qualität der stattfindenden Verbrennungsvorgänge zu erhalten.

Die Versuchszeiträume für eine definierte, beauftragte und feuerungstechnische Untersuchung einschließlich der Optimierung variieren dabei in der Regel zwischen ein bis zwei Versuchstagen bis hin zu ein bis zwei Versuchswochen. Eine Ist-Analyse zur weiteren detaillierten Bestimmung der Vorgehensweise ist

innerhalb von einer Tagesmessung auf der Basis der NIR-Thermografie möglich. Dabei werden die meist in Brennernähe vorhandenen Kesselluken genutzt. Für einen stationären Betriebszustand können die Messungen nachfolgend durchgeführt werden und sind reproduzierbar, was die bisherigen Erfahrungen in den Projektbearbeitungen gezeigt haben.

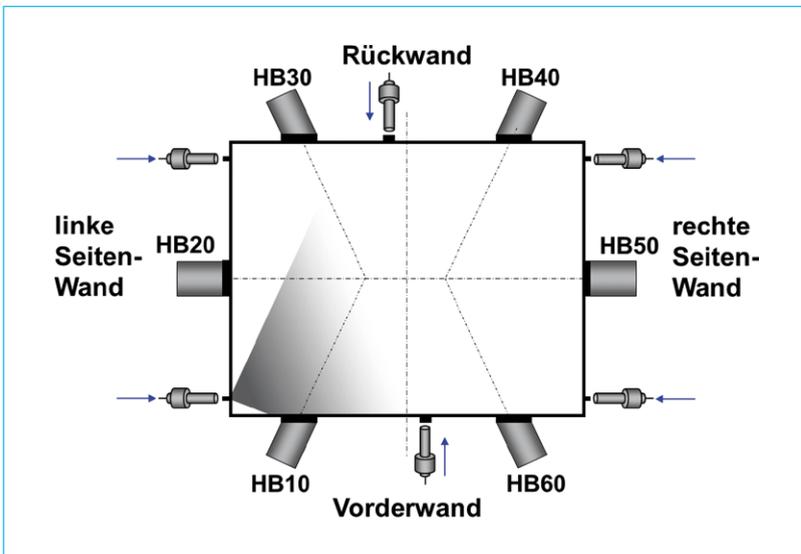
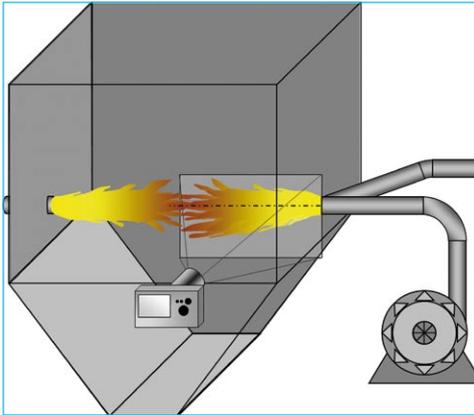


Abb. 2 und 3: Vorgehensweise bei NIR-Thermografiemessungen und nutzbare Kesselluken zur Erfassung der Feuerlage in der Brennebene (Draufsicht)

In den Abbildungen 2 und 3 werden die prinzipielle Anordnung des NIR-Messsystems und die vorhandenen Kesselluken einer Brennebene eines Beispieldampferzeugers gezeigt. Mittels der Einzelmessungen und der technischen Randbedingungen des Messsystems können auf der Basis dieser Vorgehensweise Messdaten und Ergebnisse zu

- Flammgeometrie und Temperaturverlauf entlang des Ausbrandwegs,
- Ausbildung der Zündbereiche,
- Stabilitäten oder Instabilitäten austretender Verbrennungsluft und des Brennstoffs,
- Schieflagen in der Luft- und Brennstoffaufgabe,
- Zusammenwirken benachbarter Brenner und direkte Einflüsse der Brennerimpulse auf Seiten- oder benachbarte Vorder- und Rückwände,
- Wandberührungen von Flammen,
- Verschlackungsbildung u. w.

ermittelt und bewertet werden, die z. T. nicht mit den direkten Feuerungsparametern (Luftzahl, Geschwindigkeiten, Impulse, Kornverteilung, etc.) erfasst werden können.

3. Messtechniken zur Feuerungsanalyse

3.1. Brennerthermografie und Feuerlage

Für die Erfassung der Flammgeometrie bzw. der Flammenausbildung der einzelnen Brenner und zur Lokalisierung der Flammenlage wird ein NIR-Thermografiemesssystem eingesetzt (Abbildungen 4 und 5). Das NIR-System besitzt einen fotoelektrischen Detektor (Sensor-Array), welcher konkret die elektromagnetische Strahlung im NIR-Spektralbereich von $0,78 \mu\text{m}$ bis $1,10 \mu\text{m}$ erfasst. Damit wird die Wärmestrahlung sowohl von Festkörpern (Brennstoffpartikel, Brennkammerinnenwände) als auch von Verbrennungsgasen (Flamme) gemessen. Das Sensor-Array besitzt eine Auflösung von 656×494 Pixel und erfasst ein Bildfeld von $90^\circ \times 67,5^\circ$. Gemäß der vorliegenden Feuerraumtemperaturen liegen die Temperaturmessbereiche entweder zwischen 800°C und 1.400°C oder 1.000°C und 1.800°C je nach Ausführung des Messsystems und dessen Kalibrierbereich. Die Kalibrierung des Messsystems erfolgt auf der Basis der Schwarzkörpertemperatur. Mit dem Sensor-Array kann eine maximale Bildfrequenz von 30 Hz gemessen werden. Es werden also 30 Messungen je Sekunde mit ca. 324.000 Pixel (kalibrierte Messpunkte) vom jeweiligen Messfeld durchgeführt.



Abb. 4 und 5: Im Messeinsatz befindliches NIR-Thermografiemesssystem (mobil oder stationär)

Weiterführende Auswertungen der Brennerthermografie erfolgen im Büro mit insgesamt vier Bildschirmrechnereinheiten. Es werden die Auswertung und die Bewertung hinsichtlich der räumlichen Ausbildung der Feuerlage unter Berücksichtigung der gegenseitigen Beeinflussung der Brenner und insbesondere die Erarbeitung der schematischen Grafiken zur Feuerlage der jeweiligen Versuchspunkte vorgenommen. Für diese Auswertungen werden alle relevanten Betriebs- und Versuchsmessgrößen (Brennstoffmassenstrom- und Primärluftverteilung, Sekundärluftvolumenströme u. w.) verwendet.

3.2. Brennstoffmassen- und Primärluftvolumenstrom

Für Messungen der Brennstoffmassenstrom- und Primärluftverteilung werden Nulldruck-Pendelsonden eingesetzt (Typ Babcock [2]). Der Brennstoff wird isokinetisch entnommen, ausgewogen (Bestimmung des Massenstroms durch Wägung) und zur Analytik (z. B. Wassergehalt und Luftstrahlsiebung) gegeben. Der Messaufbau und das Funktionsprinzip der isokinetischen Entnahme sind in den Abbildungen 6 und 7 gezeigt.

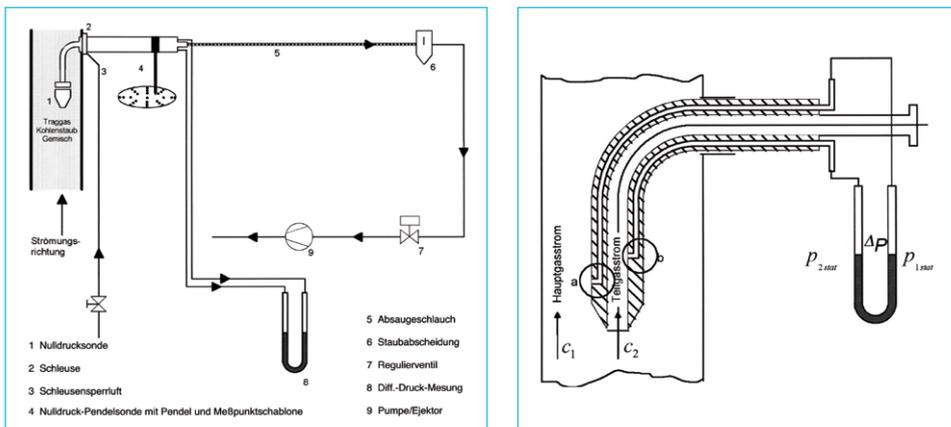


Abb. 6 und 7: Links - Messaufbau des Messverfahrens Nulldruck-Pendelsonde; rechts - Funktionsprinzip der isokinetischen Staubentnahme [2]

Bei der Messung der Brennstoffmassenstromverteilung darf das entnommene Gewicht von aufeinanderfolgenden Messungen nicht mehr als $\pm 5\%$ voneinander abweichen. Nach Prüfung der Strömungsverhältnisse in den Brennstoffleitungen und der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse der isokinetischen Entnahme können die Messungen auch als Netzmessung gemäß VDI 2066 [3] ausgeführt werden.

3.3. Gaskonzentrationen, Wandatmosphäre und Rauchgaszusammensetzung

Zur Erfassung von Gaskonzentrationen werden mobile, extraktiv arbeitende Gasanalysatoren mit Gasaufbereitung und beheizten Entnahmeleitungen sowie Staubfiltern verwendet. Für die Messungen der Sauerstoffkonzentration werden

beispielsweise paramagnetisch arbeitende Analysatoren eingesetzt. Die Konzentrationen der Komponenten CO, CO₂, NO und NO₂ werden mittels Gasabsorptionsanalysatoren gemessen, die im nicht-dispersiven Infrarotbereich arbeiten.

In Abgaskanälen liefern Netzmessungen gemäß der VDI 2066 [3] die erforderlichen Werte für die Konzentrationen an O₂, CO₂ und NO_x sowie weitere im Rahmen der Untersuchungen relevante Größen. Für die Bestimmung der Konzentrationen an O₂ und CO in Wandnähe der Dampferzeugerinnenwände werden vorhandene Entnahmestutzen, die im Bereich der Stege zwischen den Dampferzeugerrohren angebracht sind, genutzt. Mittels Gasentnahmeleitungen, Staubfilter und den Analysatoren werden die Konzentrationen gemessen. Die Auswertungen und Ergebnisdarstellungen (Konzentrationsverteilungen an den Dampferzeugerinnenwänden) erfolgen mittels der Software ORIGIN®.

4. Ergebnisse zur Optimierung von Dampferzeugerfeuerungen

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse sind Ausschnitte aus den jeweiligen gesamten Projektbearbeitungen. Es wurde ein besonderer Fokus auf Erfahrungen und Erkenntnisse in Bezug auf die Ausbildung der zentralen Gesamtfeuerlage, resultierend aus gegenseitigen Beeinflussungen von Einzelbrennern und daraus entstehenden Temperaturschieflagen und Wandberührungen von Flammenbereichen, gerichtet.

4.1. Braunkohle-Dampferzeuger – Beispiel 1

Die Aufgabenstellung widmete sich zunächst der Durchführung von Untersuchungen zur Lokalisierung von Ursachen der Verschlackungsneigung in braunkohlegefeuerten Dampferzeugern an einem Kraftwerksstandort. Es traten häufig Verschlackungen im Brennergürtel- und Übergangsbereich zum Brennkammertrichter auf. Diese waren derart mächtig ausgeprägt, sodass Betriebsunterbrechungen mit Sprengungen der Verschlackungswächten notwendig waren. Diese Untersuchungen beinhalteten versuchstechnische Messungen mittels NIR-Thermografiemesssystem und Wandatmosphärenmessungen. In die Auswertungen wurden die Betriebsdaten der Verbrennungsluftvolumenströme und weitere relevante Daten zur Bilanzierung der Brenner- und Gesamtluftzahlen einbezogen.

Nachdem die im Folgenden zusammengefasst beschriebenen Ursachen aufgeklärt waren, wurde der Aufgabenumfang um den Schwerpunkt der Optimierungsmöglichkeiten erweitert. Im Rahmen der Bearbeitung wurden Untersuchungen an mehreren am Standort in Betrieb befindlichen Dampferzeugern durchgeführt, bei denen die Reproduzierbarkeit und Übertragbarkeit im Fokus standen. Damit konnte aufgezeigt werden, dass die grundsätzlich innerhalb der Reisezeit der Mühlen (Verschleißzustand) gewonnenen Erkenntnisse auf alle Dampferzeuger angewendet werden können.

Die Untersuchungen wurden im stationären Betrieb der Dampferzeuger, nahe der Nennlast durchgeführt. Die Dampferzeugerfeuerung besitzt im Brennergürtelbereich je Mühle zwei als Strahlbrenner ausgeführte Hauptbrenner mit Ober-, Mittel-

und Unterluft. Die Anordnung der insgesamt sechs Hauptbrennereinheiten in der rechteckigen Grundfläche des Dampferzeugers ist in den Abbildungen 10 und 11 zu erkennen. Oberhalb der Hauptbrenner befindet sich je Mühle ein Brüdenbrenner. Es sind weiterhin zwei Ausbrandluftebenen im ersten Kesselzug vorhanden, wodurch insgesamt die Feuerung NO_x -arm betrieben wird.

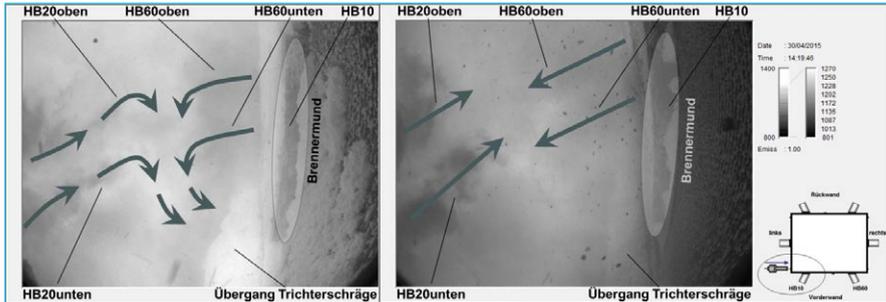


Abb. 8 und 9: Links – Wandberührung an der Vorderwand bei Betriebseinstellung; rechts – Optimierte Betriebseinstellung mit Ausbildung einer zentralen Feuerlage in der Brennkammermitte, Temperaturniveau an der Vorderwand um ca. 80 K vermindert

Die Ergebnisse zur Ursachenaufklärung mittels NIR-Thermografie und Wandatmosphärenmessungen zeigten, dass intensive Wandberührungen von Flammen im Brennergürtelbereich stattfanden [4]. Dies betraf sowohl Bereiche in denen jeweils eine Brennereinheit aufgrund der Mühlenrevision außer Betrieb war, als auch weitere Bereiche gegenüberliegender oder benachbarter Dampferzeugerwände. Die Dampferzeugerfeuerungen sind mit Online-Expertensystemen ausgestattet, die auf der Basis einer Temperaturmessung eines Flammenpyrometersystems eine horizontale Temperaturverteilung ermitteln. Die Messebene befindet sich oberhalb der Brüdenbrenner vor Aufgabe der ersten Ausbrandluft.

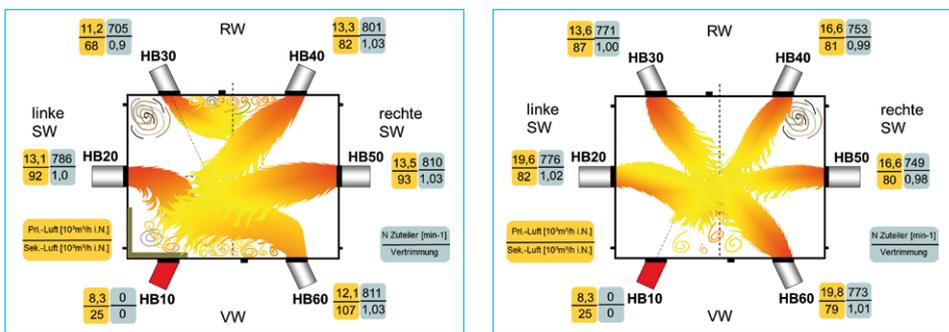


Abb. 10 und 11: Schematische Feuerlagen: Links – Betriebseinstellung mit Wandberührungen; rechts – Optimierte Betriebseinstellung mit Ausbildung einer zentralen Feuerlage

In den Abbildungen 8 und 9 sind zwei Ergebnisbilder der NIR-Thermografie im Bereich entlang der Vorderwand in horizontaler Blickrichtung gezeigt (Kesselluke, rechts in der Abbildung 9). Im vorderen Bereich der Ergebnisaufnahmen sind die

Öffnungen der beiden Hauptbrenner HB10 zu erkennen, die sich außer Betrieb befanden. Des Weiteren sind der ausgemauerte Trichterübergang und die benachbarten Brennerflammen HB20 und HB60 gekennzeichnet.

Die Abbildung 10 zeigt die schematisch dargestellte Feuerlage der Betriebseinstellung. Durch die betriebsseitig gewählten Vertrimmungen von Brennstoff und Sekundärluft wurden Impulsverhältnisse der Brennerflammen der Hauptbrenner gebildet, die Wandberührungen im Bereich der Vorder- und Rückwand verursachten (Abbildung 10). Die höheren Flammenimpulse der Hauptbrenner HB40 bis HB60 und der fehlende Hauptbrennerimpuls HB10 führten zu starken Wandberührungen der Brennerflammen HB60 und HB20 an der Vorderwand (Abbildungen 8 und 10). Es bildeten sich Verschlackungen an der Vorderwand aufgrund der in Wandnähe ablaufenden Verbrennungsreaktion und des daraus resultierenden deutlich höheren Temperaturniveaus (Abbildungen 8 und 9). Eine zentrale Feuerlage in der Dampferzeugermitte wurde nicht ausgebildet.

Durch das Vertrimmen der Brennerflammen bezüglich der Einstellung der Gleichgewichte zwischen den benachbarten Brennerflammen, insbesondere im Bereich des außer Betrieb befindlichen Brenners, können alle Brennerflammen weitestgehend die Brennkammermitte erreichen (Abbildung 11). Dies führt zur Ausbildung einer zentralen Feuerlage, sodass das Temperaturniveau im Bereich der Vorderwand um ca. 80 K vermindert wurde (Abbildung 9). Ebenfalls ist in der Abbildung 9 erkennbar, dass die Brennerflammen HB60 und HB20 aufeinandertreffen und weitestgehend in Richtung zentraler Feuerlage strömen. Die Darstellungen der schematischen Feuerlagen (Abbildungen 10 und 11) wurden auf der Basis von Messungen an allen Kesselluken mit mehreren Bildfolgen und unterschiedlichen Blickrichtungen sowie unter Berücksichtigung der relevanten Betriebsdaten erstellt.

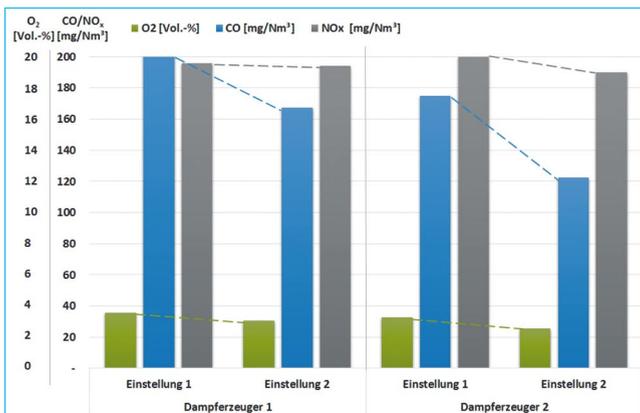


Abb. 12: Minderungspotenzial an NO_x durch Absenkung des Sauerstoffgehalts nach Dampferzeuger (Feuerungsregelung) aufgrund der Ausbildung einer zentralen Feuerlage und gleichzeitiger Minderung der CO-Emissionen (Wandberührung der Flammen)

Durch die Wandberührungen von Brennerflammen an der Vorder- und Rückwand strömt der Brennstoff entlang der Wände aufwärts gerichtet. Die ablaufende Verbrennungsreaktion verbraucht den vorhandenen Sauerstoff und erzeugt

anschließend kritische Konzentrationen an CO (bis zu 4,0 Vol.-%). Die dadurch erhöhten CO-Konzentrationen im Rauchgas nach Dampferzeuger führen dazu, dass die Feuerungsregelung einen höheren O₂-Gehalt einstellt. Dadurch werden gleichzeitig höhere NO_x-Emissionen gefahren (Einstellungen 1 beider Dampferzeuger in Abbildung 12). Durch die Ausbildung einer zentralen Feuerlage wurde die CO-Bildung in Wandnähe weitestgehend vermindert, sodass die Feuerungsregelung aufgrund der niedrigeren CO-Konzentrationen den Sauerstoffgehalt absenkt und gleichzeitig die NO_x-Emissionen auf Basis der weiterhin bekannten Zusammenhänge [5] [6] vermindern konnte (Einstellungen 2 beider Dampferzeuger in Abbildung 12).

Aufgrund der Übertragbarkeit der Feuerungseinstellungen auf alle Dampferzeuger am Standort und der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse konnte eine Vertrimmungsmatrix für den 5-Mühlenbetrieb erarbeitet werden. Diese Vertrimmungsmatrix und weitere Vorgaben zur Umsetzung der Feuerungsgrundeinstellungen wurden als Basis für den Betrieb des Online-Expertensystems vorgegeben. Damit konnte eine zentrale Feuerlage unter Berücksichtigung der Geometrie des Dampferzeugers und der Impulsverhältnisse der Brenner eingestellt werden.

4.2. Steinkohle-Dampferzeuger – Beispiel 2

Für einen mit Steinkohle befeuerten Dampferzeuger bezog sich die erste Anfrage auf eine Messung zur Kohle- und Primärluftverteilung in den Transportleitungen. Im Rahmen der Bearbeitung und in den Gesprächen mit dem Auftraggeber zeigte sich, dass neben der Ungleichverteilung von Brennstoff- und Primärluft auch Brennereinzelflammen an die Seitenwand abgelenkt wurden. Dies wurde anhand von Anlagenbefahrungen im Stillstand lokalisiert.

Der Dampferzeuger im Leistungsbereich von 550 MW_{el} besitzt eine Boxerfeuerung mit vier Brennerebenen mit jeweils vier Drallbrennern, die an der Vorder- und Rückwand angeordnet sind (Abbildungen 21 und 22). Die Verbrennungsluft wird an den Drallbrennern über die Kernluft, Sekundärluft 1 und 2 sowie über eine Tertiärluft, die außerhalb der Drallbrenner angeordnet ist, aufgegeben. Des Weiteren wird die Ausbrandluft über zwei Ebenen dem Dampferzeuger zugeführt. Die Brennerebenen bzw. die jeweils vier Brennstoffleitungen werden von Walzenschüsselmühlen mit einem statischen und dynamischen Sichter beschickt.

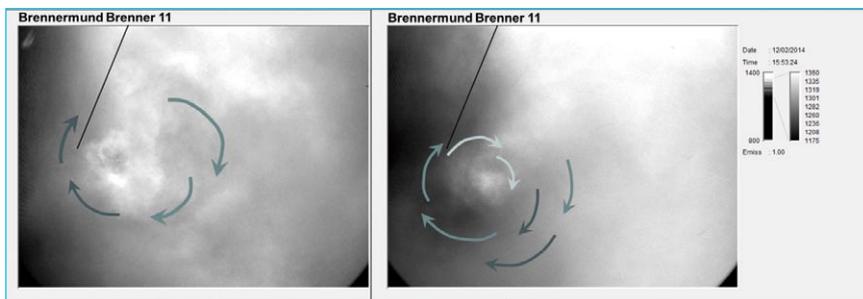


Abb. 13 und 14: Stark abgelenkte Brennerflamme des Brenners 11 in Richtung rechter Seitenwand, Ist-Zustand, Blick in den Kern der Brennerflamme möglich (Drallrichtung)

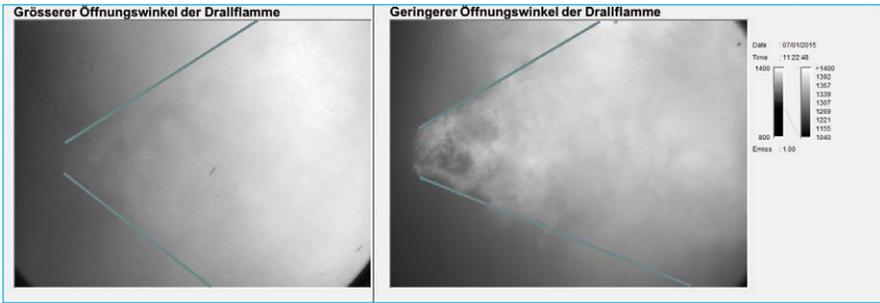


Abb. 15 und 16: Brenner 11, Optimierungsschritt 1, Erhöhung der Luftzahl über Sekundärluft 1 und 2; Optimierungsschritt 2, konstruktive Anpassung der Brennstoffumlenkung nach Eintritt der Gas-Feststoffströmung in den Brenner

Die weiterführenden feuerungstechnischen Untersuchungen zeigten, dass die Ablenkungen der Brennerflamme in der unteren Brennebene 10 am Brenner 11 stattfanden (Abbildungen 13 und 14). Die eigentlich parallel zur Seitenwand ausgerichtete Brennerflamme strömte teilweise unmittelbar ab Brennermund in Richtung der rechten Seitenwand. Die dadurch verursachten Wandberührungen erzeugten zum einen Konzentrationen an CO von bis zu 5,5 Vol.-% und zum anderen beeinträchtigte die aufwärts strömende Brennstoffsträhne die darüber befindlichen Brenner in ihrem Strömungs- und Verbrennungsverhalten (Abbildungen 17, 18, 19 und 20).



Abb. 17, 18, 19 und 20: Beeinträchtigung des Strömungs- und Verbrennungsverhaltens des Brenners 21 durch resultierend aufwärts strömende Brennstoffsträhne vom Brenner 11

Da offensichtlich die Strömungsrichtung bzw. Ablenkung des Brenners 11 durch die Gas-Feststoffströmung (Primärluft-Kohle-Strömung) verursacht wurde, konnte als erste Maßnahme die Brennerflamme durch eine Sekundärluftzahlerhöhung stabilisiert werden. Die höhere Luftzahl bewirkte eine höhere Drallzahl, da die Impulse der Verbrennungsluft u. a. die Drallzahl bestimmen [7]. Dadurch erhöhte sich der Öffnungswinkel der Drallflamme (Abbildung 14). Als zweite Maßnahme wurde im Rahmen der Revision eine konstruktive Anpassung der Umlenkleche im Bereich der Einströmung und Umlenkung der Primärluft-Kohle-Strömung um das Kernluftrohr vorgenommen. Dies führte zur weitergehenden Stabilisierung der Drallflamme (Abbildung 16).

Des Weiteren wurden die jeweils beiden wandnahen Tertiärluftdüsen mit einem höheren Anteil an Verbrennungsluft beaufschlagt als die beiden inneren Tertiärluftdüsen. Dies verbesserte die Konzentrationen an O_2 und CO im Wandbereich ($O_2 > 0$ Vol.-% und $CO < 1,0$ Vol.-%), sodass kritische Konzentrationen vermieden werden konnten.

Nach Abschluss der Projektstätigkeit zur Stabilisierung der Drallflamme in der Brennebene 10 wurde auffällig, dass die Feuerlage in den jeweiligen Ebenen bei ungleichen Flammenimpulsverhältnissen zu Ablenkungen bis hin zu Wandberührungen, sowohl der Seitenwand als auch der gegenüberliegenden Dampferzeugerwand, führte. Die Flammenbereiche der gegenüberliegenden Brennerflamme, welche aufgrund der Anordnung der Brenner bei dieser Boxerfeuerung nicht überdeckt sind, erfuhren eine Ablenkung in Richtung der Seitenwand und erreichten bei entsprechend hoher Last die gegenüberliegende Dampferzeugerecke (Abbildungen 21, 23 und 24).

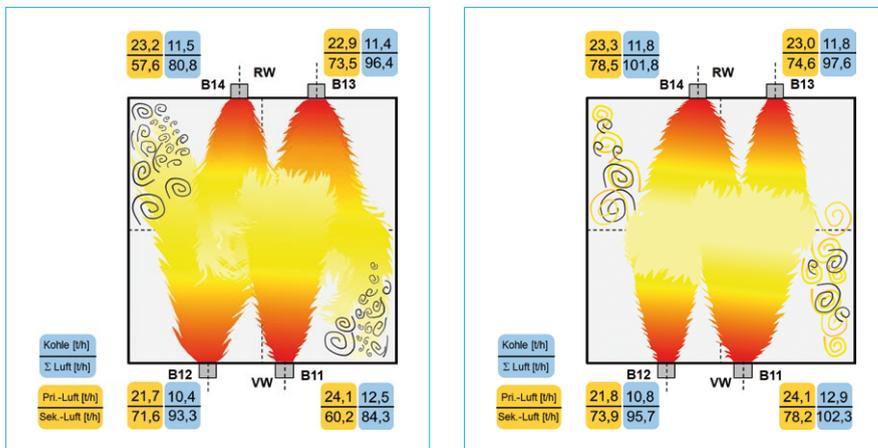


Abb. 21 und 22: Schematische Feuerlagen: Links – Wandberührungen durch vorbeiströmende und abgelenkte Flammenbereiche; rechts – Optimierte Betriebs-einstellung der Flammenimpulse mit Ausbildung einer zentralen Feuerlage

Durch Variationen der Flammenimpulse über den Sekundärluftanteil wurde in weiteren Versuchen aufgezeigt, dass alle vier Brennerflammen eine weitestgehend zentrale Feuerlage bilden können. Voraussetzung dafür ist eine Beaufschla-

gung der beiden inneren Brenner mit höheren Sekundärluftanteilen, als die der beiden äußeren Brenner (Abbildung 22). Dadurch werden Gleichgewichte der in der Dampferzeugermitte auftreffenden Brennerflammen erzeugt. Das Vorbeiströmen trat anschließend lediglich vereinzelt auf (Abbildungen 25 und 26). Bei umgekehrter Ausbildung der Impulsverhältnisse (geringere Impulse der beiden inneren Brenner) traten die Ablenkungen verstärkt auf, da der jeweilige Strömungswiderstand der gegenüberliegenden inneren Brennerflamme fehlte.

Anhand dieser Projektbearbeitung zeigte sich, dass die Bestimmung des tatsächlichen Feuerungszustandes und die gezielte Variation möglicher, mit den Ursachen im Zusammenhang stehender, Parameter zu den erforderlichen Ergebnissen führten.

Gegenüberliegende oder benachbarte Flammenimpulse von Drallflammen beeinflussen die Bildung der zentralen Feuerlage, sodass stets die entsprechenden Gleichgewichte unter Berücksichtigung der Feuerungsparameter (Luftzahl u. w.) eingestellt werden sollten.

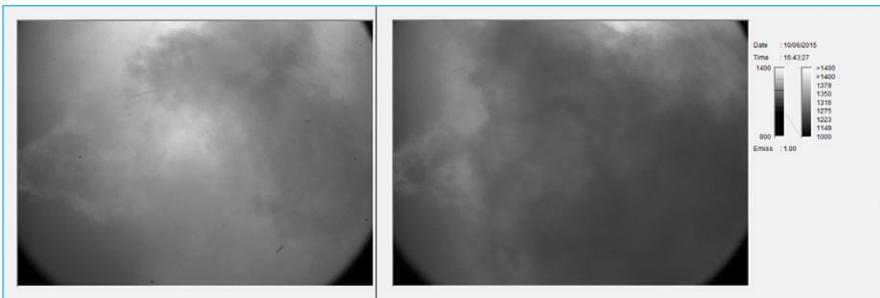


Abb. 23 und 24: Ablenkung und Vorbeiströmen des Brenners 13 bei Betriebseinstellung

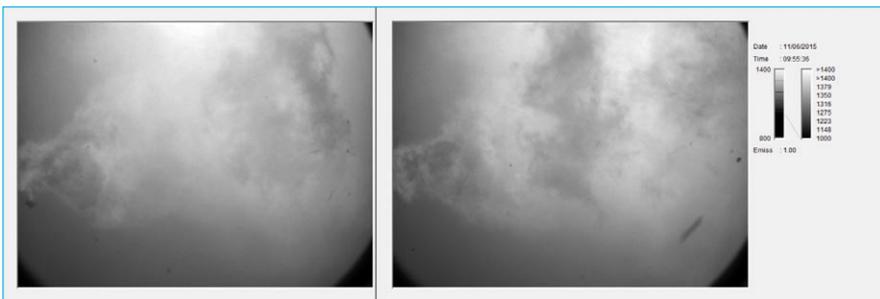


Abb. 25 und 26: Bildung von Gleichgewichten in der Dampferzeugermitte der aufeinandertreffenden Flammenimpulse, optimierte Betriebseinstellung mit geringem Vorbeiströmen von Flammenbereichen

4.3. Steinkohle-Dampferzeuger – Beispiel 3

Das dritte Beispiel zeigt Auszüge von Ergebnissen eines ebenfalls mit Steinkohle befeuerten Dampferzeugers mit einer Frischdampfleistung von 1.000 t/h. Die Feuerung der beiden Dampferzeuger ist als Einwandfeuerung ausgebildet. Der Dampferzeuger ist im unteren Bereich durch eine begehbare Mittelwand ge-

trennt und wird ab ca. + 30 m zusammengeführt. Vier Walzenschüsselmühlen versorgen die jeweils vier Drallbrenner der insgesamt vier Brennerebenen mit Brennstoff und Primärluft. Die Drallbrenner besitzen eine Kernluft und zwei Sekundärluftvolumenstromaufgaben. Die Ausbrandluft wird über Unter- und Oberluft dem Dampferzeuger zugeführt, wobei die Unterluft feuerungstechnisch nicht mehr betrieben wird (Kühlluftaufgabe). Des Weiteren versorgen Seitenwandluftdüsen in allen Brennerebenen die Dampferzeugerseitenwände mit ausreichend Sauerstoff.

Die Aufgabenstellung umfasste zunächst die Einstellung der Kohle- und Primärluftverteilung der vier Kohlemühlen. Des Weiteren traten zu hohe Restkohlenstoffgehalte in der Flugasche nach Dampferzeuger auf. Die Flugasche wird mit C-Gehalten von bis zu maximal 4,5 Ma.-% verwertet. Die Grenzwertüberwachung erfolgt durch eine zertifizierte Betriebsmessung. Bei Überschreitungen dieses Wertes wird die Flugasche verworfen, separiert und muss entsorgt werden.

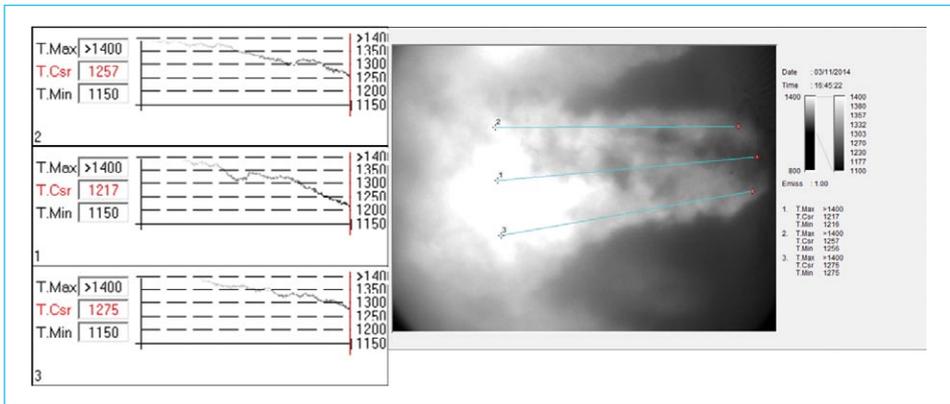


Abb. 27: Brenner 32 im Ist-Zustand, Betriebseinstellungen mit hohen Primärluftgeschwindigkeiten, lange Brennerflammen mit Wandberührungen an der Rückwand

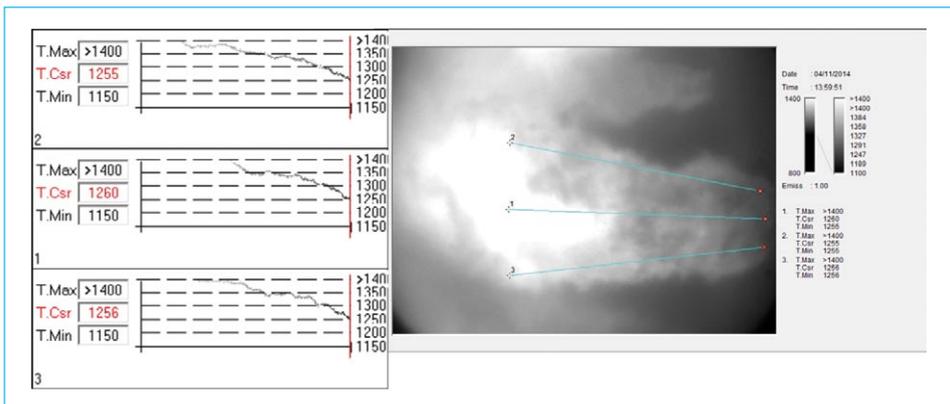


Abb. 28: Brenner 32 im optimierten Zustand, Verminderung Primärluftzahl, Erhöhung der Primärverbrennungsreaktion und Verkürzung der Brennerflamme

Die Ergebnisse der Vergleichmäßigung der Kohle- und Primärluftverteilung zeigten, dass insgesamt hohe Primärluftgeschwindigkeiten vorlagen. Im Rahmen der feuerungstechnischen Ist-Zustandsermittlung wurde lokalisiert, dass Wandberührungen an der Rückwand der Dampferzeugerfeuerung im Bereich der beiden unteren Brennebenen 40 und 30 stattfanden und dass die Betriebsmessung zur Bestimmung des O_2 -Gehalts im Rauchgas nach dem Dampferzeuger Abweichungen aufwies, wodurch ein zu hoher Luftüberschuss und damit höhere Brennerluftzahlen gefahren wurden. Dadurch wird die mittlere Verweilzeit im Dampferzeuger vermindert und es werden längere Brennerflammen erzeugt. Der an die Rückwand gelangte Brennstoff wurde aufgrund des Strömungsverhaltens der Einwandfeuerung nicht mehr eingemischt und strömte entlang der Dampferzeugerwand in Richtung Austritt. Durch die geringeren mittleren Verweilzeiten und den zu geringen Sauerstoffgehalten nahe der Wand wurde eine nicht ausreichende Brennzeit eingestellt, woraus insgesamt die erhöhten C-Gehalte in der Flugasche resultierten.

Es wurden feuerungstechnische Untersuchungen zur Variation der Primärluftzahl mittels der NIR-Thermografie durchgeführt. Im Ergebnis führten verminderte Primärluftzahlen und damit gleichfalls geringere Primärluftgeschwindigkeiten zu einer Intensivierung der Primärverbrennungsreaktion. Hinzu kam die gleichzeitige Erhöhung des Temperaturniveaus der Drallflamme sowie die Verkürzung der Flammenlänge (Abbildungen 27 und 28). Weiterhin wurde durch Netzmessungen im Rauchgas nach dem Dampferzeuger eine betriebliche Kalibrierkurve für die O_2 -Sonden bestimmt und der Sauerstoffgehalt um Werte im Bereich von 0,4 bis 1,2 Vol.-%, bezogen auf den gesamten Lastbereich des Dampferzeugers, vermindert.

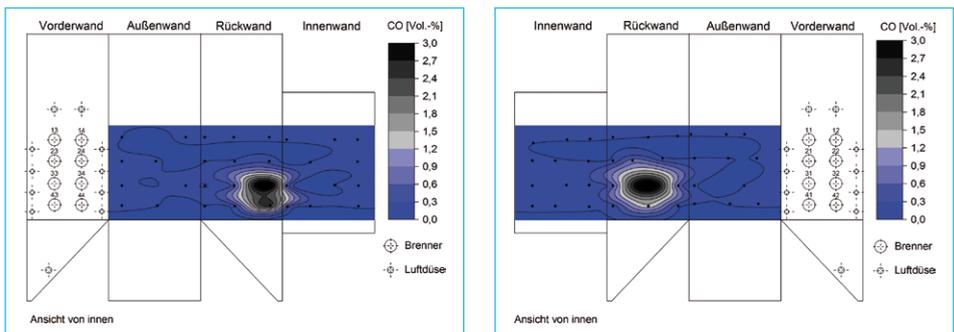


Abb. 29 und 30: CO-Konzentrationen der Wandatmosphären im Ist-Zustand, links – linke Brennkammerhälfte; rechts – rechte Brennkammerhälfte

Trotz der bereits umgesetzten, oben beschriebenen Maßnahmen, fanden weiterhin Flammenberührungen an der Rückwand statt, wie die Ergebnisse der Wandatmosphärenmessung zeigen (Abbildungen 29 und 30). Erst durch eine zweite Verminderung der Primärluftgeschwindigkeiten (unter Begleitung der NIR-Thermografie) und der Aufnahme der Sichter kennlinie sowie der daraus resultierenden Erhöhung der Drehzahl der dynamischen Sichter (Absenkung der mittleren Partikelgröße des Brennstoffs) konnten die Flammenberührungen an der Rückwand weitestgehend vermieden werden (Abbildungen 31 und 32).

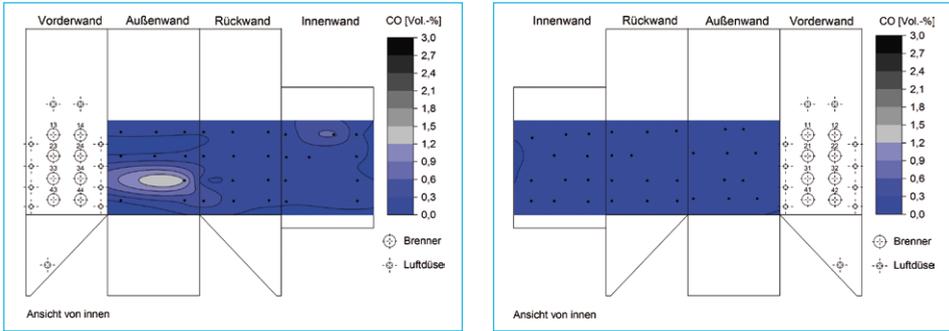


Abb. 31 und 32: CO-Konzentrationen der Wandatmosphären im optimierten Zustand, links – linke Brennkammerhälfte; rechts – rechte Brennkammerhälfte

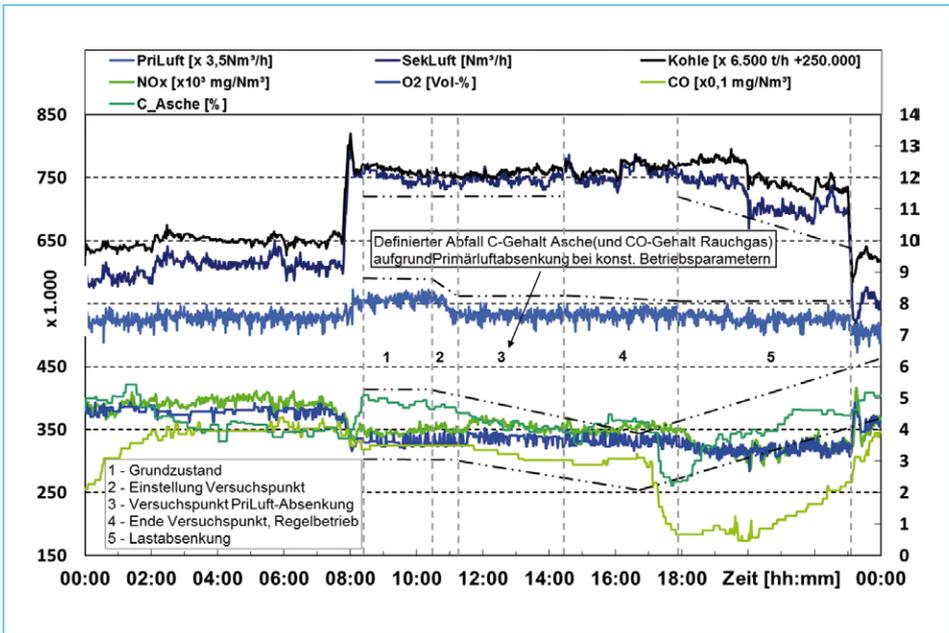


Abb. 33: Rest C-Gehalt über den Messzeitraum zur Variation Sekundärluft

In der Abbildung 33 sind die relevanten Betriebsmesswerte während der Einstellungen der Sichterzahl über den Versuchszeitraum aufgetragen. Mit Einstellung der optimierten Feuerungsparameter (Zeitraum 3) fällt der C-Gehalt der Flugasche kontinuierlich ab. Darüber hinaus wurden abschließend Probenahmen der E-Filterasche beider Filterstraßen durchgeführt und im Labor die C-Gehalte bestimmt (Abbildung 34). Dabei zeigte sich, dass eine betriebliche Kalibrierung der Messungen ETG17 bis ETG19 erforderlich war. Der Messwert der betrieblichen Messung ETG19 würde bereits eine Verwerfung der Asche zur Folge haben. Die Analysewerte der Probenahme wiesen C-Gehalte in der Flugasche im Bereich von ca. 3,0 Ma.-% auf, womit eine Verwertung möglich war und sich der Dampferzeuger im bestimmungsgemäßen Betrieb befand.

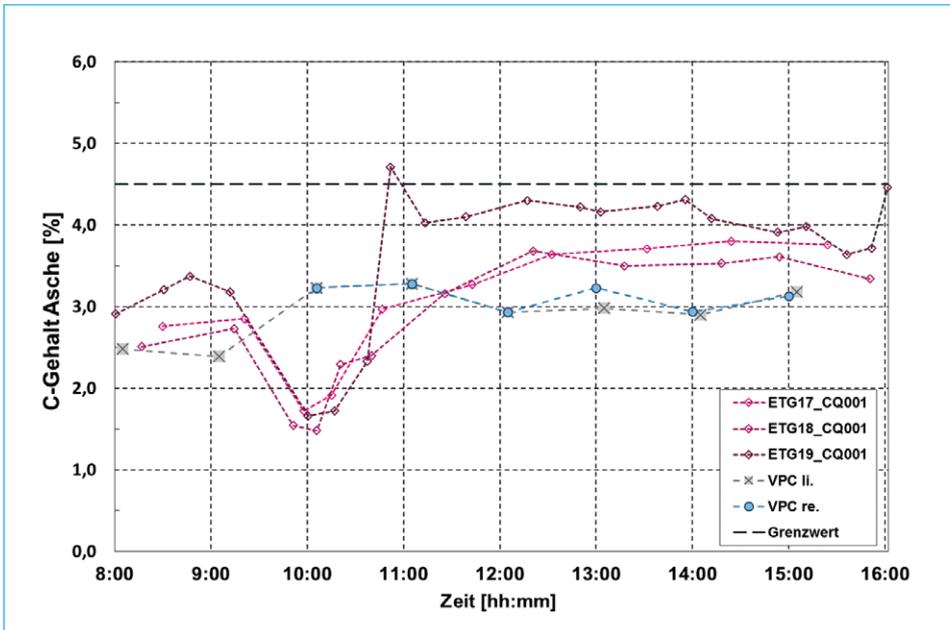


Abb. 34: Rest C-Gehalt der Flugasche im Versuchszeitraum

5. Nutzen für den Dampferzeugerbetrieb der Kraftwerke

Mithilfe der Bestimmung des Ist-Zustands von Dampferzeugerfeuerungen können die definierten Betriebsgrundeinstellungen ermittelt und eingestellt werden. Durch alterungsbedingte Driften und den Verschleiß beim Betrieb der Anlagen ist eine Wiederholung und Regelmäßigkeit in einem Zeitraum von ein bis zwei Jahren zu empfehlen. Ebenfalls sollten die feuerungstechnischen Messungen und Einstellungen im Anschluss an Revisionen oder im Rahmen von Inbetriebnahmen nach Umbaumaßnahmen an Feuerungssystemen wie z. B. Mühlenertüchtigung, Brennerumbau o. ä. durchgeführt werden.

Häufig entsteht auf Grund wechselnder Brennstoffqualitäten bei den Führungsgrößen wie Emissionen oder Ausbrand (Restkohlenstoffgehalte in der Flug- und Kesselasche) ein Optimierungspotential. Durch die Überprüfung von Betriebsparametern und Kenngrößen sowie deren Korrekturen und Anpassungen kann eine bestimmungsgemäße Betriebsführung erfolgen. Weitere Anwendungen im Kraftwerksbereich finden sich bei Betriebsstörungen (Korrosionen, Verschlackungen) und deren Ursachenfindung, der Flexibilisierung der Lastfahrweise, insbesondere der Teillastfähigkeit, der Umsetzung feuerungstechnischer Minderungsmaßnahmen (CO, NO_x) und bei der Einführung sowie dem Justieren von stationären Expertensystemen. Gerade beim Betrieb von Dampferzeugerfeuerungen mit stationären Expertensystemen haben die Erfahrungen aus der Projektarbeit gezeigt, dass die, für die Feuerung und deren Betrieb erforderlichen, Stellgrößen und die jeweiligen Schrittweiten definiert werden sollten.

Die folgende Abbildung zeigt den jeweiligen, direkt im Zusammenhang stehenden, Nutzen für den Kraftwerksbetreiber bei der Optimierung von verschiedenen Parametern.

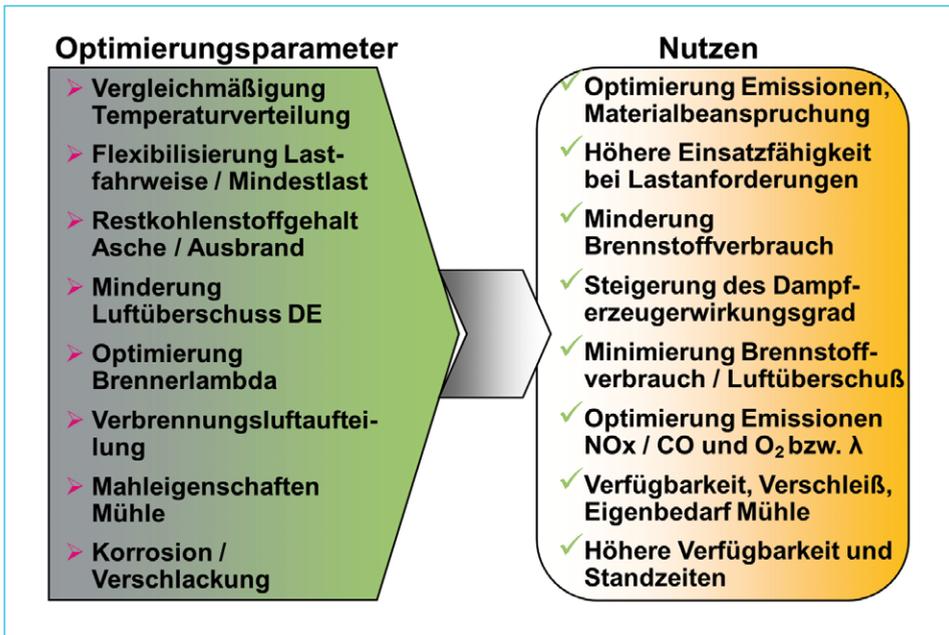


Abb. 35: Überblick zu Optimierungsparametern und deren Nutzen für den Dampferzeugerbetrieb

6. Zusammenfassung

Die bisherigen Projektbearbeitungen zeigten, dass häufig komplexe Ursachen zu Abweichungen und Driften vom bestimmungsgemäßen Betrieb der Dampferzeugerfeuerung führen. Aufgetretene Begleiterscheinungen wie Korrosionen, Verschlackungen oder erhöhte Gehalte an Restkohlenstoff in der Asche resultierten in Betriebsbeeinträchtigungen. Die Anlagenverfügbarkeit wurde vermindert oder es traten Schäden, beispielsweise durch thermische Überbelastungen bei Vorhandensein von Temperaturschieflagen oder Wandberührungen von Brennerflammen, auf.

Mit der ausgearbeiteten konzeptionellen Vorgehensweise zur Ermittlung des tatsächlichen Feuerungszustands können die bestehenden Zusammenhänge, die zu Abweichungen und Driften führen, ermittelt und optimiert werden. Es besteht dabei die Möglichkeit, durch ausgewählte Versuchsmessungen (z. B. NIR-Thermografie) die Ergebnisse und den erzielten Nutzen zu dokumentieren und aufzuzeigen.

Die konzeptionelle Vorgehensweise ist auch bei weiteren, als in diesem Beitrag dargestellten Feuerungsarten, wie z. B. Schmelzkammerfeuerungen, Rostfeuer-

rungen (Brennstoff Hausmüll) anwendbar und wurde im Rahmen von Projektbearbeitungen bereits umgesetzt. Insbesondere die gestiegenen Anforderungen an den Dampferzeugerbetrieb (Lastflexibilität und Brennstoffwechsel) erfordern optimale, auf den jeweiligen Betrieb angepasste Feuerungsgrundeinstellungen. Damit können für die Dampferzeuger die Verfügbarkeit erhöht sowie die Betriebskosten und die Kosten für die regelmäßigen Revisionen vermindert werden.

7. Quellen

- [1] Burchhardt, Uwe; Griebe, Steffen; Lösche, Christian; Kaß, Helge; Zimmer, Peter: Übersicht zu Tests und Ergebnissen aus der Forschungsanlage von Vattenfall. In: Michael Beckmann, Antonio Hurtado (Hrsg.): Kraftwerkstechnik 2014, Strategien, Anlagentechnik und Betrieb. Freiberg: SAXONIA. 2014. S. 201-219.
- [2] VGB-Merkblatt: Kohlenstaubmessung mit der Nulldruck-Pendelsonde. Essen: VGB Kraftwerkstechnik GmbH. 2000.
- [3] VDI-Richtlinie 2066: Messen von Partikeln, Staubbmessung in strömenden Gasen, Gravimetrische Bestimmung der Staubbeladung. 11/2006.
- [4] Griebe, Steffen; Bischoff, Helmut; Brunne, Thomas; Stecklina, Gerd; Pache, Frank: Feuerungs- und Flammenbewertungen mit neuen Messtechniken. Kassel: VGB-Fachtagung - Brennstofftechnik und Feuerungen 2016. 2016.
- [5] Görner, Klaus.: Technische Verbrennungssysteme. Berlin: Springer Verlag. 1991.
- [6] Kremer, Hans: Grundlagen der NO_x -Entstehung und -Minderung. In: Gas Wärme International 35 (1986), H. 4, S. 239-246.
- [7] Philipp, Matthias: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Stabilitätsverhalten von Drallflammen mit zentraler Rückströmzone. Dissertation. Karlsruhe, 1991.