

Einflüsse der Einzelbrenner und deren Zusammenwirken auf die Betriebsweise und Optimierung von Dampferzeugerfeuerungen

Steffen Griebe, Helge Kaß, Volker Biesold, Axel Becker,
Thomas Brunne, Martin Fricke und Thorsten Thimme

1.	Einleitung	272
2.	Feuerungsarten und Einzelbrenner	272
2.1.	Feuerungsarten	273
2.2.	Strahl- und Drallbrenner	274
3.	Betriebsarten von Einzelbrennern und deren Optimierung	276
3.1.	Betriebsführung von Steinkohle-Drallbrennern in Staubfeuerungen	277
3.2.	Betrieb der Strahlbrenner einer Schmelzkammerfeuerung	281
3.3.	Ausbildung des Zünd- und Verbrennungsverhaltens der Strahlbrenner von Braunkohle-Tangentialfeuerungen	283
4.	Einflüsse auf die Ausbildung der Feuerlage und den Dampferzeugerbetrieb	285
4.1.	Korrosionen infolge von Wandberührungen der Flammen	286
4.2.	Beeinflussung der Dampferzeuger-Wandatmosphäre und der Betriebsführung des Systems Mühle-Brenner durch die Feuerlageausbildung	288
4.3.	Auswirkungen der Feuerungsgrundeinstellungen der Einzel- brenner einer Zyklonfeuerung auf den Schmelzkammerbetrieb	290
5.	Zusammenfassung und Ausblick	292
6.	Quellen	292

1. Einleitung

Als Basis für Projektbearbeitungen wurde ein Konzept erarbeitet, mit dem die Erfassung des tatsächlichen Istzustands und darauf aufbauende Optimierungen industrieller Dampferzeugerfeuerungen für Festbrennstoffe möglich sind [1] [2]. Eine weitere wichtige Grundvoraussetzung ist die Kenntnis über die in den Dampferzeugern ausgeführten Feuerungsarten und Brenner zur Umsetzung des jeweiligen Brennstoffs. Die sich daraus ergebenden komplexen, funktionalen Zusammenhänge erklären den tatsächlichen Istzustand und die möglichen Optimierungspotenziale der Feuerungen.

Unter den derzeitigen gesetzlichen Rahmenbedingungen und den wirtschaftlichen Anforderungen an den Betrieb von Kraftwerken ist ein stabiler Dampferzeugerbetrieb mit hohen Verfügbarkeiten, geringen Einsatz- und Erzeugungskosten sowie einer hohen Flexibilität im Lastverhalten und im Brennstoffband unerlässlich. Stellen sich zum einen im Laufe der Betriebszeit verschleißbedingte Driften und Abweichungen ein oder sind zum anderen die optimalen Betriebsbedingungen anhand der tatsächlichen Randbedingungen und Einflussgrößen nicht gewählt, entstehen Betriebsbeeinträchtigungen im Dampferzeugerbetrieb [1] [2]. Die Folge können Beeinträchtigungen in der Betriebsführung, ein erhöhter Brennstoffverbrauch oder erhöhter Restkohlenstoffgehalt in der Flugasche sein. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, dass sich kritische Wandatmosphären im Bereich der Innenwände ausbilden und Korrosionen entstehen. Aus den Betriebsbeeinträchtigungen können die Ursachen nicht direkt abgeleitet werden. Häufig entstehen Schäden, deren Instandsetzung zunächst durchgeführt werden muss, um den Betrieb der Dampferzeugeranlage abzusichern. Im zweiten Schritt wird eine Untersuchung durchgeführt, die anhand einer Datenbasis aus Betriebs- und Versuchsmessungen die Zusammenhänge zwischen Betriebsbeeinträchtigung oder Schäden und den eigentlichen Ursachen bestimmen soll.

In zahlreichen Fällen der Projektbearbeitungen zur Feuerungsbewertung und -optimierung stellten sich die Betriebsweise der Systeme Mühle-Brenner und der Feuerung aufgrund der bestehenden Zusammenhänge und möglichen Einflussgrößen in der Dampferzeugerfeuerungen als eigentliche, komplexe Optimierungsgrößen heraus.

2. Feuerungsarten und Einzelbrenner

Im folgenden Kapitel werden zur Übersicht die wesentlichen im Rahmen von Projektbearbeitungen vorgefundenen Feuerungsarten und Brenner erläutert. Dabei werden nicht nur spezielle Konstruktionsdetails der Hersteller berücksichtigt, sondern auch allgemeine funktionale Zusammenhänge und Wirkungsweisen, die zum Verständnis der Ergebnisdarstellungen der Kapitel 3 und 4 dienen. Auf die weiterführend vertiefende Literatur wird an entsprechender Stelle verwiesen.

Für die Bearbeitung von Aufgabenstellungen zur Feuerungsbewertung und -optimierung von industriellen Dampferzeugerfeuerungen sind sowohl die gezeigte Übersicht als auch die weiteren Details der von den Herstellern aus-

geführten Feuerungen und Brenner der Dampferzeuger eine unerlässliche Basis. Eine vertiefende Einarbeitung in die Konstruktionsdetails und den daraus abzuleitenden Funktionsweisen und Auswirkungen muss stets im Vorfeld der durchzuführenden Untersuchungen und Optimierungen erfolgen.

2.1. Feuerungsarten

Grundsätzlich existieren bei den Feuerungsarten für Festbrennstoffe (Stein- und Braunkohle) für die Brennkammern der Dampferzeuger die Rostfeuerung, die Wirbelschichtfeuerung und die Staubfeuerung [3] [4] [5]. In Bezug zu den im Beitrag dargestellten Ergebnissen werden die Ausführungen der Staubfeuerungen schematisch in ihrer Funktionsweise und den wesentlichen Merkmalen beschrieben.

Bei mit Steinkohle betriebenen Feuerungen werden die meist als Drallbrenner ausgeführten Brenner in verschiedenen Höhenebenen an gegenüberliegenden Wänden (Boxerfeuerung) oder einer Wand angeordnet (Abbildung 1). Bei den Boxerfeuerungen existieren die Varianten der direkt gegenüberliegenden oder der versetzt gegenüberliegenden Brenner. Dabei sollten die Flammenlängen in der Form ausgelegt sein, dass die Brennkammermitte und nicht die gegenüberliegende Wand erreicht wird. Die Brennerflammen treffen in der Mitte der Brennkammer aufeinander und bilden damit eine Intensivierung der Vermischung und Erhöhung der mittleren Rauchgastemperatur. Es ist gleichfalls wichtig, dass beim Aufeinandertreffen der Brennerflammen die Flammenimpulse gleich groß ausgebildet sind und keine Ablenkungen in Richtung Brennkammerwände oder Wandberührungen stattfinden. Durch die Auswahl der Betriebsweise der Drallbrenner sollte nicht die eigene Brennkammerwand berührt werden (Kapitel 3.1.). Die Brenner führen die Zündung und Verbrennung der eingesetzten Steinkohle bis zu einem definierten Verbrennungsfortschritt, um in der Brennkammermitte einen zentralen Flammenkern auszubilden und den Ausbrand zu realisieren. Bei der Einwandfeuerung dürfen die Flammenimpulse bzw. Flammenlängen nicht so groß sein, dass die gegenüberliegende Rückwand erreicht wird [2].

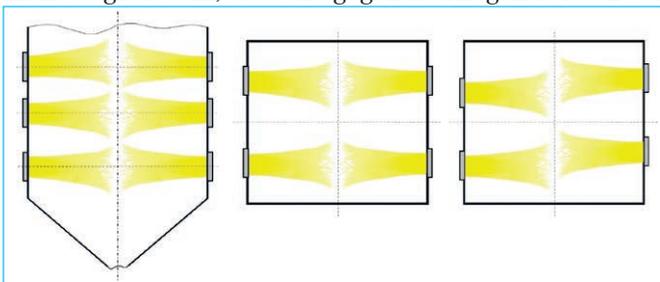


Abb. 1:
Ausführung der Staubfeuerung als Boxerfeuerung bei Einsatz von Steinkohle [3] [4]

Des Weiteren wurden Staubfeuerungen mit flüssigem Ascheabzug als sogenannte Schmelzkammerfeuerungen konzipiert und ausgeführt. Dabei erfolgt beispielsweise eine definierte Wandberührung der Flammen im Bereich des Schmelzkammerzyklons. Die Brennkammerwand des Zyklons ist mit einer Stampfmasse zum Schutz der Wand aufgrund der hohen Verbrennungstem-

peraturen oberhalb des Ascheschmelzpunkts ausgeführt. Die Verbrennung erfolgt zunächst in der Flamme der Einzelbrenner, die unterschiedlich angeordnet sind, und abschließend in der Schlackeschicht an der Zyklonbrennkammerwand. Weitere Bauformen der Schmelzkammerfeuerungen (horizontal oder vertikal) und Anordnungen der Brenner sind in [3] [4] [5] gezeigt.

Die Tangentialfeuerungen haben sich bei Brennstoffen mit hohem Wasser- und Ballaststoffgehalten durchgesetzt (Abbildung 2). Die meist verwendete Braunkohle wird über Strahlbrenner eingetragen, die in den Ecken oder an den Brennkammerwänden auf einen zentralen Kreis ausgerichtet sind. In der Brennkammermitte wird ebenfalls ein zentraler Flammenkern gebildet. Des Weiteren können Mehrpunktausrichtungen der Brennerflammen der Strahlbrenner vorliegen. Je nach Mühlenbetriebsweise bzw. Brennkammerleistung befinden sich unterschiedliche Anzahlen an Mühle-Brenner-Systemen in Betrieb. Die Brennerflammen bzw. Flammenimpulse müssen ebenfalls in der Form ausgelegt und betrieben werden, dass eine Berührung in der zentralen Brennkammermitte erreicht wird. Entstehen durch ungleiche Flammenimpulse oder durch die in Betrieb befindlichen Brenner Ablenkungen, treten als Folge Wandberührungen von Flammen auf (Kapitel 4.2.).

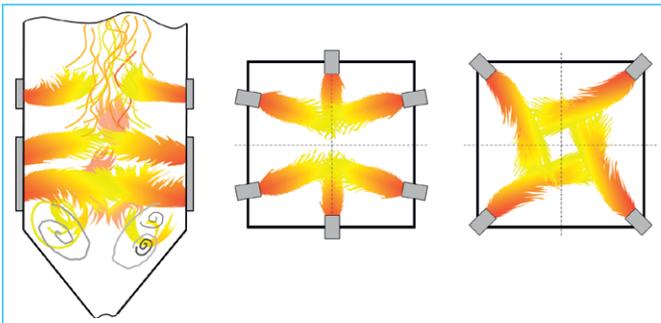


Abb. 2:
Ausführung der Staub-
feuerung als Tangential-
feuerung bei Einsatz von
Braunkohle und Steinkohle [3] [4]

Die zentrale Ausrichtung der Brennerflammen und des zentralen Flammenkerns der Brennkammer vermindert weitestgehend direkte Wandberührungen von Flammen. Durch kontinuierliche oder periodisch auftretende Wandberührungen entstehen kritische Wandatmosphären (reduzierende Reaktionsbedingungen), die unter Sauerstoffmangel und weiteren Randbedingungen des Brennstoffs und des Reaktionsfortschritts der Verbrennung in der Flamme zu Korrosionen führen können (Kapitel 4.1.).

2.2. Strahl- und Drallbrenner

Als Kernkomponenten der Feuerungen sind weitestgehend Strahl- und Drallbrenner gemäß der dargestellten Anordnungen aus Kapitel 2.1. anzutreffen. Der Brennstoff wird in verschiedenen Mühltypen zunächst gemahlen und getrocknet sowie über einen anschließenden pneumatischen Transport zu den Brennern der Ebenen gefördert. Als Mühlen werden für Steinkohle häufig Walzenschüsselmühlen und für Rohbraunkohle Schlagradmühlen eingesetzt. Bei

den Optimierungen von Brennern sind stets das System Mühle-Brenner und die Wechselwirkungen zum Feuerraum zu betrachten (Kapitel 4.2.).

Die Brenner übernehmen die Funktion des Eintrags in den Feuerraum und der Vermischung der Reaktionspartner Brennstoff und Verbrennungsluft. Durch die technische Ausführung der Vermischung erfolgt gemäß dem Brennertyp die Zündung und Verbrennung. Dabei finden primäre und sekundäre Verbrennungsreaktionen statt. Die Verbrennungsluft teilt sich dementsprechend in Primärluft (Frischlufte oder mit rezirkuliertem Rauchgas vermischt) und Sekundärluft auf, die wiederum über ein Frischluftgebläse und weitere Verbrennungsluftkanäle den jeweiligen Brennern zugeführt wird. Der Brenner erhält mittels der Auslegung die Aufgabe der Zündung und Verbrennung des Brennstoffs bis zu einem definierten Reaktionsfortschritt. Die weiterführende Verbrennung, meist des Restkokes und der noch vorhandenen brennbaren Gase, findet innerhalb des zentralen Flammenkerns statt.

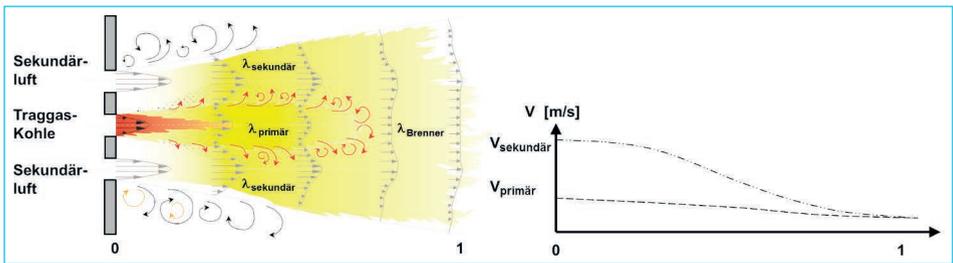


Abb. 3: Schematische Funktionsweise eines Strahlbrenners und funktionale Zusammenhänge typischer Parameter

In Abbildung 3 sind die schematische Funktionsweise und die funktionalen Zusammenhänge typischer Parameter eines Strahlbrenners dargestellt. Über die Ausbildung unterschiedlicher Impulse erfolgt auf der Basis der Turbulenz die Vermischung der Reaktionspartner und mit dem umgebenden Rauchgas. Dabei ist zu berücksichtigen, dass für die primäre Verbrennungsreaktion ausreichend Sauerstoff zur Verfügung steht. Das trifft sowohl für Strahlbrenner als auch für Drallbrenner zu. Fehlt die Primärluft in erforderlichem Maße oder ist ein zu hoher Primärluftimpuls ausgebildet, besitzt dies unmittelbare Auswirkungen auf die ablaufenden Reaktionen der Zündung und Verbrennung, die Ausbildung der Flammenlänge sowie den Reaktionsfortschritt des Ausbrands am Ende der Flamme (Kapitel 3.1., 3.3. und 4.2.). In der Mitte oder dem Kern der Brennkammer findet das Aufeinandertreffen der gegenüberliegenden oder tangential angeordneten Brennerflammen statt. Die Impulsungleichgewichte und der Reaktionsfortschritt der Brennerflammen bestimmen die Ausbildung der zentralen Flamme [1] [2].

In Abbildung 4 sind die schematische Funktionsweise und funktionalen Zusammenhänge typischer Parameter eines Drallbrenners gezeigt. Durch die Art der Vermischung der Reaktionspartner tritt eine intensivere Zündung und Verbrennung ein. Die Drallausbildung über verschiedene Drallerzeugersysteme [5] führt im inneren Kern der Drallflamme zur Bildung von Unterdruck. Dadurch

entsteht eine typische innere Rezirkulationsströmung [3]. In Abhängigkeit von der Drallstärke bzw. Drallzahl (Abbildung 4) kann die Drallflamme geschlossen oder offen ausgeprägt werden. Die intensivere Vermischung der Reaktionspartner führt zu einer kürzeren Brennerflamme als bei einem Strahlbrenner und zu einer Verweilzeiterhöhung. Die axialen Geschwindigkeiten werden bei der Drallflamme im Vergleich zur Strahlflamme schneller abgebaut.

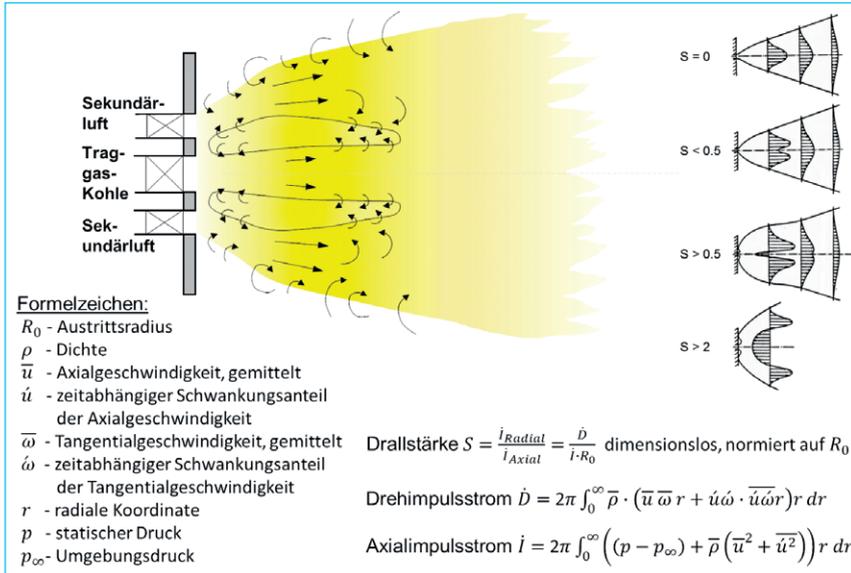


Abb. 4: Schematische Funktionsweise eines Drallbrenners und funktionale Zusammenhänge typischer Parameter [3] [6]

Entscheidend sind dabei die primären und sekundären Luftzahlen sowie die Drallwinkel der Drallerzeugereinbauten, insofern Verstellmöglichkeiten konstruktiv vorhanden sind. Zu hohe primäre Luftzahlen bzw. Luftimpulse bewirken eine späte Zündung und eine verlängerte Reaktionszeit des Brennstoffs in der Flamme. Bei einer ausgeglichenen bzw. der Auslegung und den Brennstoffeigenschaften entsprechenden primären Luftzahl lässt sich eine Intensivierung der primären Verbrennungsreaktion und, bei angepasster Sekundärluftaufgabe über die meist innere und äußere Sekundärluft, eine Verkürzung der Flammenlänge und Verbrennungszeit erreichen (Kapitel 3.1. und [2]). Mit der Veränderung der Verbrennungsluftimpulse wird ebenfalls die Drallzahl, also die Vermischungsintensität, beeinflusst (Abbildung 4). Eine hohe Drallzahl führt zum Öffnen der Drallflamme und zur wandnahen Zündung im Bereich des Brennermunds (Kapitel 3.1.). Gleichzeitig wird dabei die Verbrennung beim Überschreiten von Grenzzahlen instabil und die Flamme kann periodisch kollabieren.

3. Betriebsarten von Einzelbrennern und deren Optimierung

Die Grundlage jedes zuverlässigen Feuerungsbetriebs der Dampferzeugeranlage bildet die Betriebsführung der Einzelbrenner. Die Betriebsführung muss an

die Randbedingungen der Verbrennung in der Einzelflamme angepasst sein. Dabei besitzen die Brennstoffeigenschaften einen wesentlichen Einfluss. Die Brennstoffaufbereitung in den Kohlemühlen und die Aufteilung auf die Brenner der Ebenen oder Brennkammerwände muss gemäß der möglichen Funktionalität der Brenner erfolgen. Die Gesamtheit der Randbedingungen und Parameter ist in den Feuerungsgrundparametern definiert, welche nicht vollständig online durch Betriebsmessungen erfasst werden. Abweichungen entstehen aufgrund von Driften und Verschleiß und führen bei der Ausbildung der Einzelverbrennung zu Instabilitäten der Flammen. Es können Wandberührungen von Flammen an den Brennkammerwänden, Korrosionen oder Rückzündungen im Bereich der Mühle bzw. des Mühlensichters entstehen. Wesentliche Einflussfaktoren und Möglichkeiten deren Beeinflussungen zur Ausbildung einer optimierten Feuerungsführung der Einzelflammen von ausgewählten Drall- und Strahlbrennern werden in den folgenden Kapiteln aufgezeigt.

3.1. Betriebsführung von Steinkohle-Drallbrennern in Staubfeuerungen

Aus dem Repertoire von durchgeführten Projekten zur Ermittlung des tatsächlichen Istzustands und der weiterführenden Optimierung von industriellen Dampferzeugerfeuerungen sind praxisnahe Ergebnisse zum Betriebsverhalten von Steinkohledrallbrennern unterschiedlicher Hersteller und Betreiber ausgewählt und dargestellt. Als eine Basis der Untersuchungen wird als Versuchsmessung die NIR-Thermografie (Naher InfraRot-Bereich) eingesetzt [1] [2]. Weitere Versuchsmessungen, beispielsweise zur Ermittlung der Konzentrationen von O_2 und CO in Nähe der Brennkammerwände oder akustische Messverfahren zur Ermittlung von Brennstoffmassenströmen und dem Förderverhalten von Gas-Feststoffströmungen beim pneumatischen Transport [7] oder Referenzmessverfahren zur Bestimmung des Aufmahlgrades und der Primärluft- und Brennstoffverteilung [2], werden je nach Aufgabenstellung einbezogen.

Die folgenden Ergebnisdarstellungen sind aus Messungen mittels der NIR-Thermografie entstanden und beinhalten aufgrund der Art und Weise der Messwerterfassung und Auswertung u. a. die Möglichkeit der Visualisierung des Flammenverhaltens von Strahl- und Drallbrennern, wie sie durch die Erfassung des menschlichen Auges nicht möglich sind. Weiterführende Auswertungen der Messergebnisse erfolgen im Rahmen der Projektbearbeitungen. Innerhalb der Versuchsdurchführung einer Optimierungsaufgabe werden die Ergebnisse unmittelbar in Bezug zur Ausführung der Feuerung und Einzelbrenner bewertet und Optimierungsschritte eruiert. Zum Abschluss der Einzeluntersuchungen erfolgt stets die Optimierung der gesamten Feuerung (Kapitel 4.).

In den Abbildungen 5 und 6 sind Ergebnisbilder von zwei Drallbrennern aus unterschiedlichen Dampferzeugerfeuerungen gezeigt. Es sind zwei Ergebnisbilder als Bildfolgen von jeweils demselben Brenner dargestellt, die im Rahmen einer Messung zur Bestimmung des Istzustands der Feuerung durchgeführt wurden. Beide Brennerflammen besitzen ein beeinträchtigtcs Zünd- und Verbrennungsverhalten, was sich in den stark pulsierenden und sich verändernden Flammen-

formen zeigt. Die resultierende Brennkammerströmung bewirkt bei beiden Drallbrennern eine um 90 ° aufwärtsgerichtete Ablenkung der Flammen. Es treten in der Flamme der Abbildung 5 pulsierende Flammenformationen auf, die nicht den Reaktionszustand der Drallflamme besitzen und nicht im Flammenbereich verbleiben. Solch stark pulsierende Zünd- und Verbrennungsvorgänge (Abbildung 6) entsprechen nicht dem bestimmungsgemäßen Betrieb und wurden optimiert.



Abb. 5: Drallbrennertyp Beispiel 1, Ergebnisbilder der NIR-Thermografie (Bildfolge); beeinträchtigt, pulsierendes Verbrennungsverhalten mit Flammenablenkungen

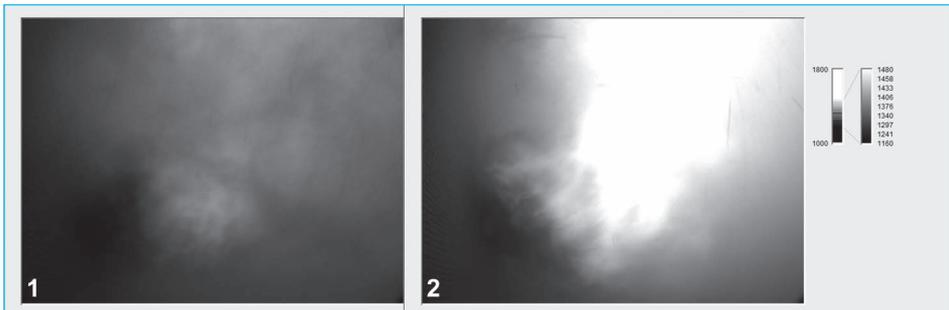


Abb. 6: Drallbrennertyp Beispiel 2, Ergebnisbilder der NIR-Thermografie (Bildfolge); beeinträchtigt, pulsierendes Verbrennungsverhalten mit Flammenablenkungen

Als Basis dieser Optimierungen muss das Flammenverhalten bei Variation der Brennerparameter bestimmt werden. Beispielsweise wurden systematisch die Parameterauswirkungen auf die Ausbildung des Zünd- und Verbrennungsverhaltens mittels Versuchsmessungen bestimmt. Es wurden der Drallwinkel der äußeren und inneren Sekundärluft im möglichen Betriebsbereich und die Sekundärluftimpulse variiert. In Abbildung 7 sind Ergebnisbilder dieses Brennertyps Beispiel 2 bei zwei unterschiedlichen Drallwinkleinstellungen der äußeren Sekundärluft gezeigt. Bei Erhöhung des Drallwinkels öffnet sich die Drallflamme entsprechend der resultierenden Drallzahl und der Zündpunkt bildet sich nahe der Brennkammerwand aus. Es findet bereits eine periodische Wandberührung im Bereich des Brennermunds statt. Das Temperaturniveau ist um ca. 40 K höher ausgeprägt als bei dem geringeren Drallwinkel (Abbildung 7). Mit Verringerung der Verdrellung kann der Zündpunkt in einem ausreichenden Abstand vom Brennermund ausgebildet und die Flammenstabilität verbessert werden.



Abb. 7: Drallbrennertyp Beispiel 2; Variation des Drallwinkels der äußeren Sekundärluft, Einfluss auf die Ausbildung der Zündbereiche und Flammenform



Abb. 8: Drallbrennertyp Beispiel 2; Variation des Drallwinkels und des Impulses der inneren Sekundärluft, Einfluss auf die Ausbildung der Zündbereiche und Flammenform

Des Weiteren wurden der Drallwinkel und der Impuls der inneren Sekundärluft bei verschiedenen Einstellungen der äußeren Sekundärluft (Drallwinkel und Impuls) variiert. Dabei wurden u. a. die Flammenstabilität, der Zündpunkt, das Temperaturniveau und die Flammenlänge bewertet. Es zeigte sich, dass der Drallbrennertyp eine hohe Funktionalität besitzt und es erfolgte unter Berücksichtigung der Ergebnisse weiterer Parametervariationen (z. B. Primärluftzahl) die Bestimmung einer optimierten Grundeinstellung der Drallbrenner sowie die schrittweise Übertragung auf die gesamte Feuerung (Kapitel 4.1.).

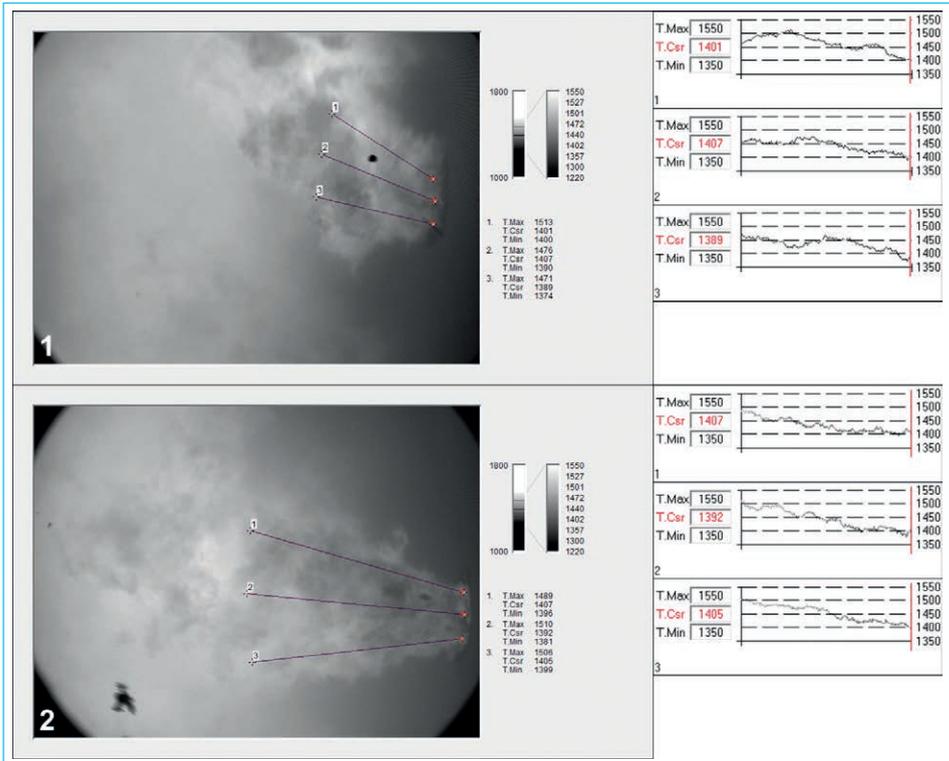


Abb. 9: Drallbrennertyp Beispiel 1; Variation des Verhältnisses der äußeren und inneren Sekundärluft, Stabilisierung des Flammenimpulses (Bild 2)

Für den Drallbrennertyp des Beispiels 1 (Abbildungen 5 und 9) wurden ebenfalls unmittelbar im Anschluss an die Ergebnisse zum tatsächlichen Istzustand der Feuerung Variationen der Brennerparameter zur Optimierung durchgeführt. Hintergrund des Projektauftrags waren zum einen ein Brennstoffwechsel und zum anderen ein Rückzünden des Brennstoffs, weshalb bei Vorliegen dieser Ergebnisse (Abbildung 5) Sofortmaßnahmen abgeleitet und umgesetzt werden mussten. Auf Basis der Kenntnis der Funktionalitäten des Brennertyps wurde eine Variation des Verhältnisses der äußeren zur inneren Sekundärluft durchgeführt. Aus den Ergebnissen

der ebenfalls durchgeführten Mühlenmessungen war darüber hinaus bekannt, dass ausreichend hohe Primärluftgeschwindigkeiten im stationären Betriebsfall vorlagen. Die Ergebnisbilder der Abbildung 9 zeigen, dass mit einer Erhöhung der inneren Sekundärluft eine stabile Zündung und Verbrennung der Drallflamme ausgebildet und die Flammenstabilität gegenüber der resultierenden, aufwärts gerichteten Brennkammerströmung erhöht wurde (Abbildung 9, Bild 2). Auf der Basis von weiteren Untersuchungen (akustisches Messsystem) wurde aufgezeigt, dass sich eine sogenannte Dünenförderung [8] ausbildete und entsprechende weiterführende Optimierungsmaßnahmen erforderlich waren.

3.2. Betrieb der Strahlbrenner einer Schmelzkammerfeuerung

In einem Projekt zur Feuerungseinstellung einer Schmelzkammerfeuerung wurde die Verbrennungsluftaufteilung zu den Brennergruppen und zwischen der Sekundär- und Mantelluft der Brenner selbst optimiert. In Abbildung 10 ist eine von insgesamt acht Brennergruppen, bestehend aus zwei Einzelbrennern mit dazugehörigen Verbrennungsluftkanälen, gezeigt, welche kreisringförmig als Deckenbrenner einer vertikalen Zyklon-Schmelzkammerfeuerung ausgebildet sind. Die sekundäre Verbrennungsluft wird über zwei Hauptverbrennungsluftkanäle zu jeweils der Hälfte der Brennergruppen geführt. Mittels der Abgleichklappen (nicht in Abbildung 10 gezeigt) wird die Gesamtverbrennungsluft zu jeder Brennergruppe eingestellt. Anschließend erfolgt eine Aufteilung der Verbrennungsluft über Trimmklappen (Abbildung 10) in die sekundäre Ober- und Unterluft sowie die Mantelluft im Kern des Brenners. Zur Aufrechterhaltung der erforderlichen Strömungsgeschwindigkeiten über den gesamten Lastbereich werden die motorbetriebenen Zungenklappen verwendet, die über in der Leittechnik hinterlegte Kurven lastabhängig eingestellt werden. Es existieren keine betrieblichen Volumenstrommessungen im Bereich der Brennergruppen.

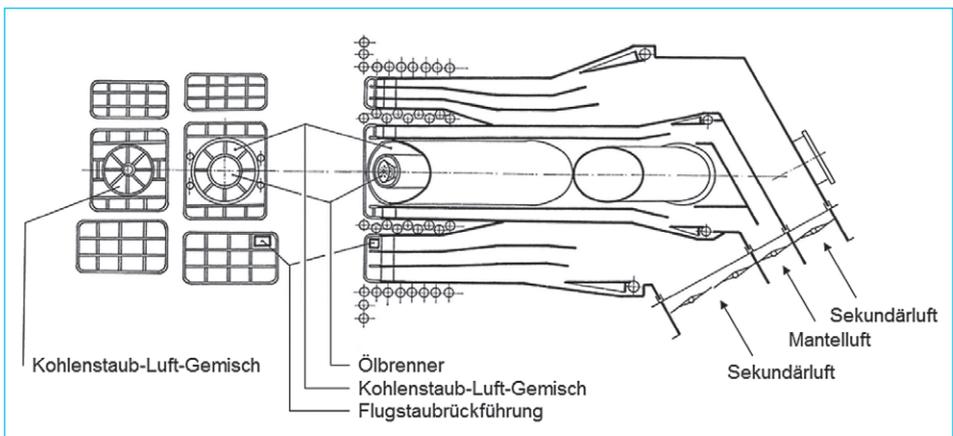


Abb. 10: Aufbau einer Brennergruppe einer Zyklon-Schmelzkammerfeuerung

Weiterführend wurde das Zünd- und Verbrennungsverhalten der Brennergruppen bzw. der Einzelbrenner durch Parametervariationen optimiert. Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden mittels NIR-Thermografiemessungen über die vorhandenen Kesselluken dokumentiert. Es war eine Optimierung dahingehend notwendig, dass eine brennernahe Zündung mit entsprechend hohem Temperaturniveau der Flammen entsteht. Im Istzustand wurde lokalisiert, dass der Zündpunkt verzögert einsetzte und die Brennerflammen nach der Umlenkung bis in den zweiten Kesselzug gelangten. Des Weiteren musste der Schmelzfluss am Austritt des Schmelzkammerzyklons gewährleistet bleiben. Eine Austrittsöffnung war bereits vor den Feuerungseinstellungen aufgrund zu niedriger Schmelztemperaturen im Zyklon durch erstarrte Asche verschlossen.

In Abbildung 11 sind zwei Ergebnisbilder der NIR-Thermografie derselben Brennergruppe dargestellt. Es wurde eine Variation des Verbrennungsluftvolumenstroms vorgenommen bzw. dadurch die Brennerluftzahl vermindert. Es wurde eine brennernahe Zündung des eingetragenen Brennstoffs erreicht und es erhöhte sich das Temperaturniveau (Bild 2 der Abbildung 11). Es lag jedoch weiterhin eine vergleichsweise inhomogene Ausprägung der Strahlflamme vor. Mit der Veränderung der Verbrennungsluftaufteilung zwischen Sekundär- und Mantelluft wurden optimierte Betriebseinstellungen bestimmt, die eine weitere Homogenisierung und Stabilisierung der Zündung und Verbrennung bei gleichzeitiger Erhöhung des Temperaturniveaus der Einzelflammen bewirkten (Abbildung 12). Die Einstellung der Brennerflamme in Bild 1 der Abbildung 12 wurde aufgrund des kontinuierlichen Temperaturanstiegs (Messpfadlinien) und der Höhe des Temperaturniveaus für die Übertragung auf die gesamte Feuerung (Kapitel 4.3.) ausgewählt.

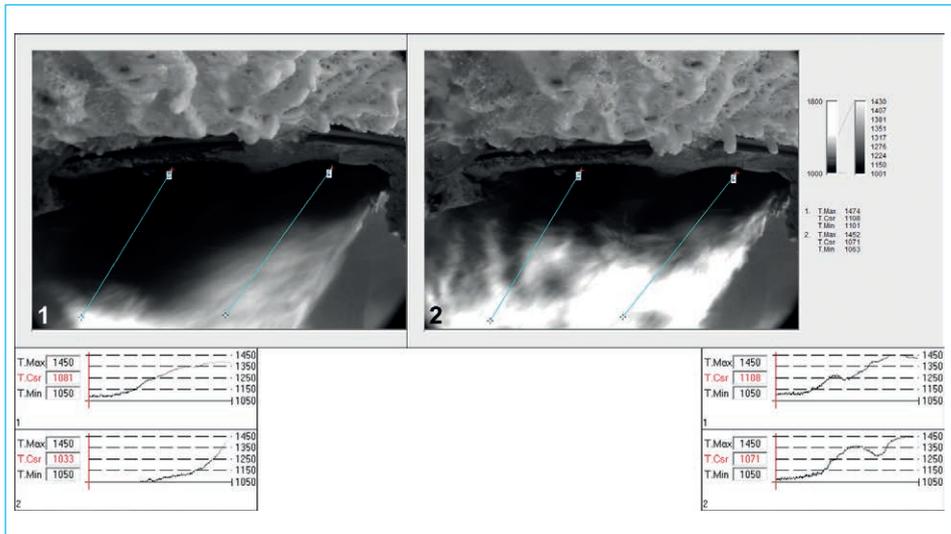


Abb. 11: Strahlbrenner einer Schmelzkammerfeuerung; Variation des Verbrennungsluftvolumenstroms zu den Brennergruppen mittels Abgleichklappen

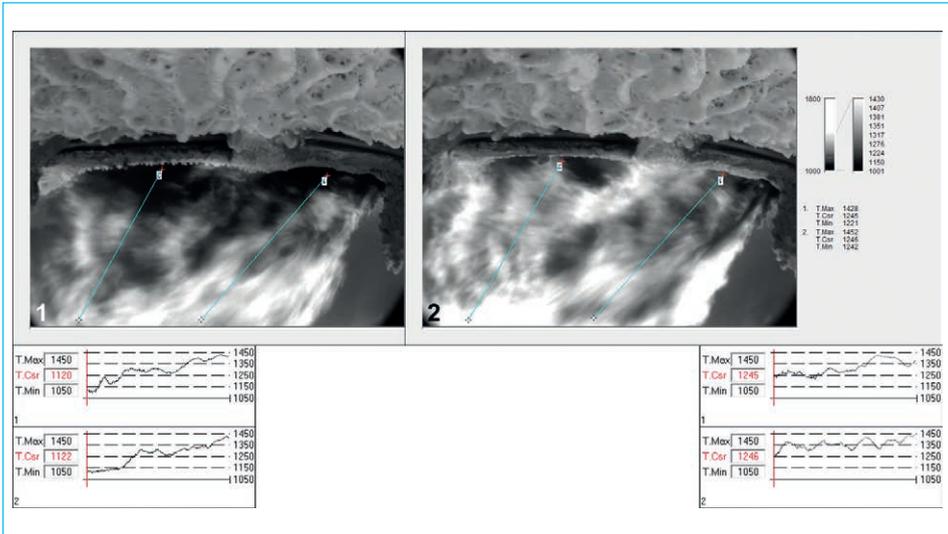


Abb. 12: Strahlbrenner einer Schmelzkammerfeuerung; Variation der Aufteilung der Verbrennungsluft zwischen Sekundär- und Mantelluft mittels Trimmklappen

3.3. Ausbildung des Zünd- und Verbrennungsverhaltens der Strahlbrenner von Braunkohle-Tangentialfeuerungen

Bei den mit Braunkohle betriebenen Strahlbrennern von Tangentialfeuerungen übernimmt eine vorgeschaltete Schlagradmühle mittels rezirkulierten Rauchgases die Trocknung und Aufmahlung sowie den Transport zu den Brennern. Daraus ergibt sich bei Optimierungen der Strahlflammen die Betrachtung des Systems Mühle-Brenner. Es existieren weiterhin Einflüsse aus der Brennkammer auf das Temperaturniveau des rückgesaugten Rauchgases. Der Brennstoff wird mit dem Traggas im Kern der Brenner aufgegeben und die Sekundärluft über darüber und darunter befindliche Luftkanäle. Das Zünd- und Verbrennungsverhalten und die Ausbildung des Flammenimpulses werden durch die Primärluftzahl und den Traggasvolumenstrom beeinflusst. Die Untersuchungen mittels NIR-Thermografie und weiteren Messungen zeigten, dass ein ausreichendes Sauerstoffangebot in der Primärreaktionszone eine stabile Zündung in der Flamme bewirkt (Abbildung 13). Mit Erhöhung der Primärluft steigt das Temperaturniveau der Flamme (Versuchspunkte VP 1, VP 3 und VP 5). Dies wird ebenfalls mit Erhöhung der Schlagradrehzahl (SR-DZ) erreicht (Abbildung 13), da der Traggasvolumenstrom und damit das Temperaturniveau in der Mühle erhöht werden. Berücksichtigt werden muss der umlaufende Grießmassenstrom in der Mühle, der mittels Online-Messungen bestimmt wurde (Abbildung 14). Dieser erhöht sich unmittelbar mit der Lasterhöhung und erreicht nach ca. 10 bis 20 Minuten einen stationären Wert. Weitere Verstellungen der Schlagradrehzahl innerhalb dieses Zeitraums können eine Versackung und den Ausfall der Mühle hervorrufen.

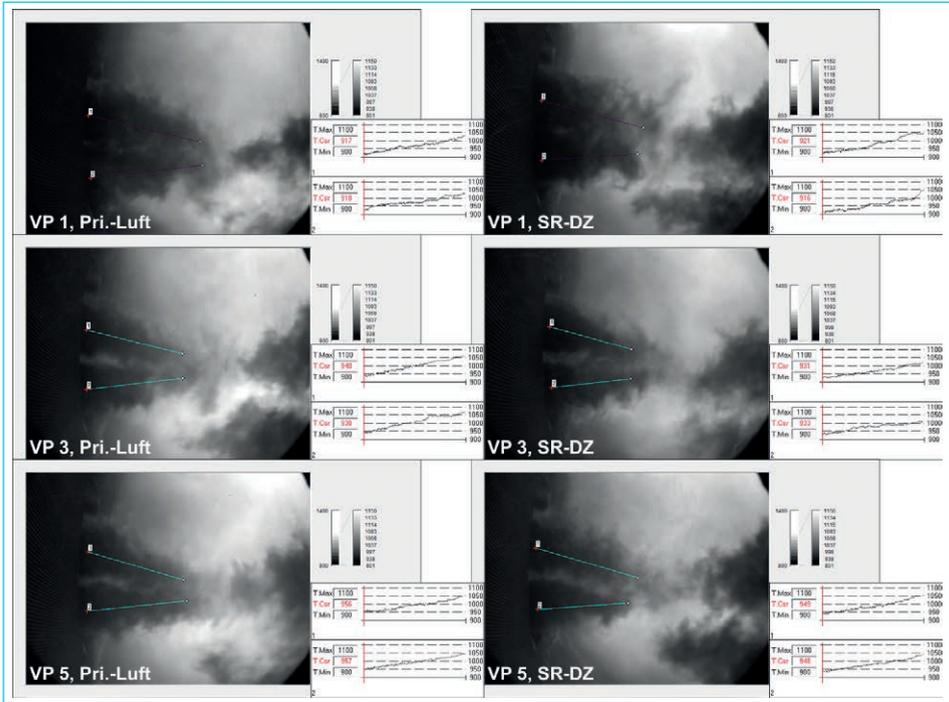


Abb. 13: Strahlbrenner einer Tangentialfeuerung; Variation der Primärluft (VP 1 niedrig und VP 5 hoch) und Schlagradrehzahl (VP 1 niedrig und VP 5 hoch)

Mit der Kenntnis der Auswirkungen der Parameter und den weiteren Einflussgrößen wurden Mühlen-Kennfelder erarbeitet, die das gesamtheitliche Betriebsverhalten der Schlagradmühle unter Berücksichtigung des Verbrennungsverhaltens der Strahlflammen abbilden und die Auswahl der Betriebskenngrößen unterstützen. Dabei können Versackungen der Mühlen weitestgehend vermieden werden.

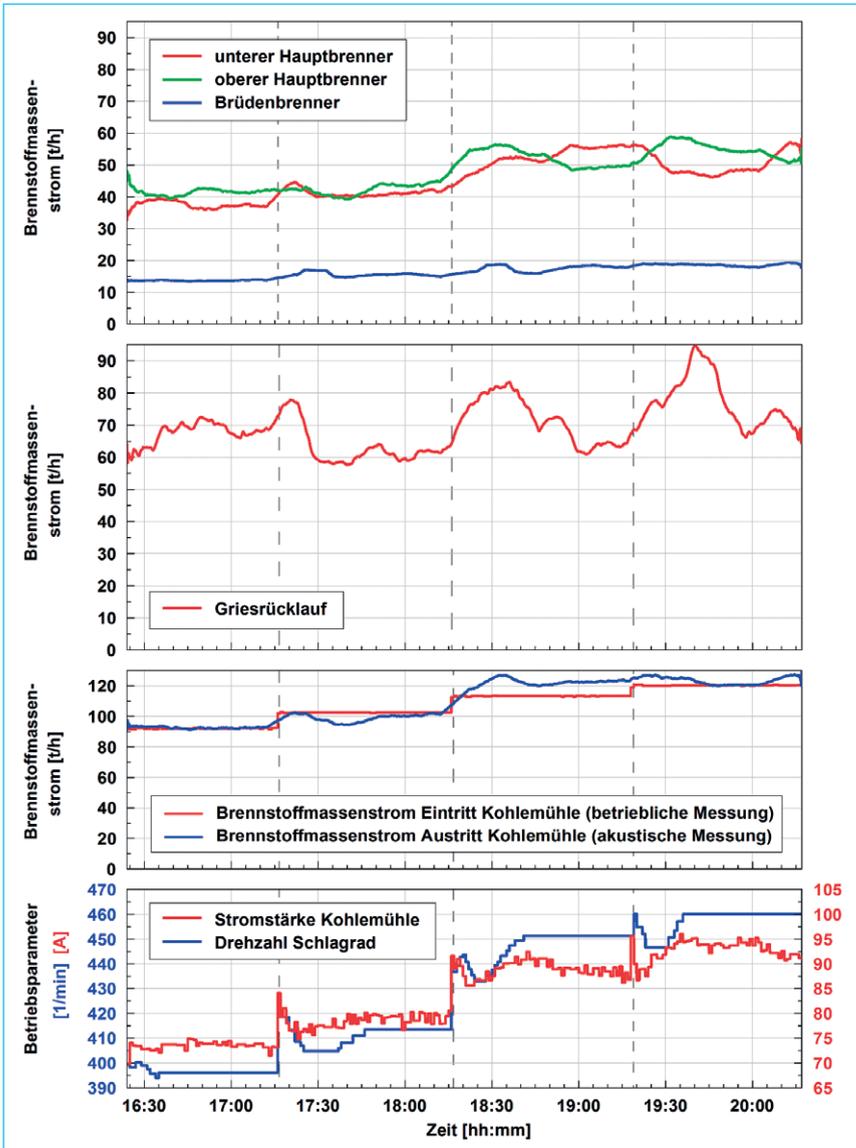


Abb. 14: Untersuchungen Betriebsverhalten Griesrücklauf; Akustische-Online-messung, (a) Brennstoffmassenströme der Brenner, (b) Brennstoffmassenstrom des Griesrücklaufs, (c) Brennstoffmassenströme Eintritt und Austritt und (d) Betriebsparameter Schlagradmühle

4. Einflüsse auf die Ausbildung der Feuerlage und den Dampferzeugerbetrieb

Als wichtige Basis des Betriebs von Dampferzeugerfeuerungen muss das Einzelverbrennungsverhalten der Brenner unter Berücksichtigung vor- und nach-

gelagerter Prozesse (z. B. Aufmahlung und Trocknung) und gemäß der Auslegung optimiert betrieben werden. Dabei sollte eine zentrale Feuerlage ohne direkte Wandberührungen der Brennerflammen ausgebildet sein, welche die Grundlage für die Wärmeübertragung im Dampferzeuger bildet. Mit weiteren Beispielen aus Projekten werden die komplexen Zusammenhänge und existierenden Einflüsse aufgezeigt.

4.1. Korrosionen infolge von Wandberührungen der Flammen

Im folgenden Beispiel wurden Feuerungsmessungen zur Bestimmung des Istzustands durchgeführt. Die NIR-Thermografie und die Messungen der Wandatmosphäre zeigten nach zwei Untersuchungstagen, dass intensive, direkte Wandberührungen von Brennerflammen an allen vier Dampferzeugerwänden und in allen Brennebenen stattfanden. Der in die Nähe der Innenwände gelangte Brennstoff reagierte in reduzierender Atmosphäre, verbrauchte den vorhandenen Sauerstoff und bildete CO-Konzentrationen in Höhe von >5,0 Vol.-%, tr. (Abbildung 15, linkes Ergebnisbild). Aufgrund des frühzeitigen Brennstofftransports an die Kesselinnenwand und der Brennstoffzusammensetzung ist davon auszugehen, dass ebenfalls H₂S gebildet wurde. Im Ergebnis einer Kesselbefahrung im Revisionsstillstand wurden in den Bereichen der Dampferzeugerrohre und der Stege sichtbare Werkstoffabzehrungen vom Betreiber lokalisiert (Abbildung 16, Foto links). Nach Probeentnahme und Analyse der Rohrstücke in einem Werkstofflabor wurde festgestellt, dass eine Sauerstoffmangelkorrosion vorlag, die zur Wandabzehrung von bis zu 1,1 mm Werkstoffmaterial innerhalb größerer Wandbereiche führte.

Um die Ausgangssituation abzustellen, wurde zunächst das Einzelbrennerverhalten untersucht (Kapitel 3.1.). Anhand der Ergebnisse wurde eine optimierte Brenneinstellung ermittelt, die auf die gesamte Feuerung übertragen wurde. Eingeschlossen wurden die Einstellungen der Primärluft, der Lastbereich des Dampferzeugers und die Ausbrandluft. Die Verbrennungsluftzuführung und -regelung erfolgt über vier Hauptluftkanäle in den DE-Ecken und ausschließlich über Klappenstellungen.

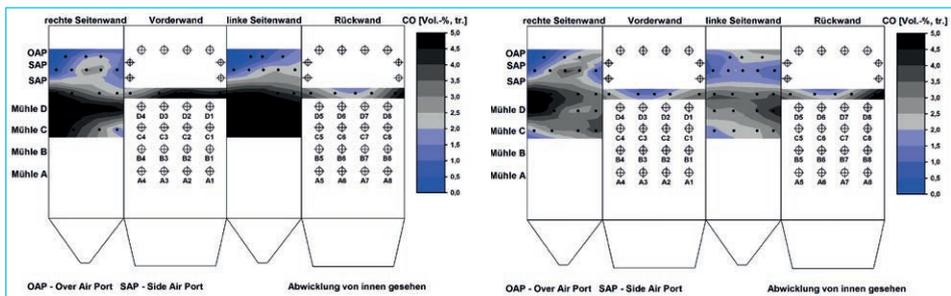


Abb. 15: Konzentrationsverteilung CO in Wandnähe; Istzustand (links) und optimierter Zustand (rechts)

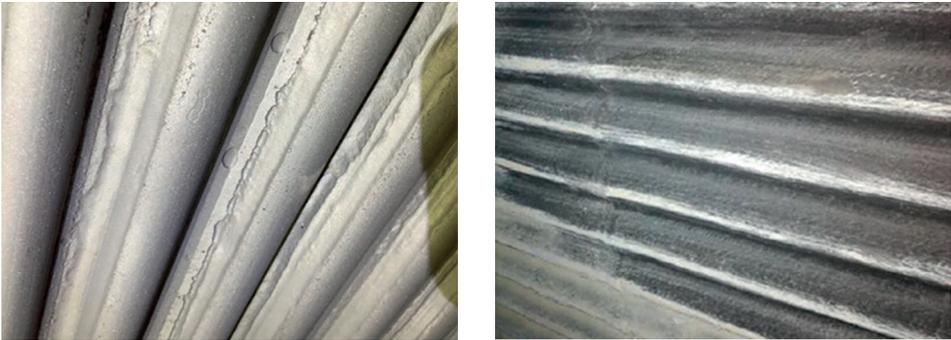


Abb. 16: Dampferzeugerrohrwand; Istzustand mit Sauerstoffmangelkorrosion (links) und Zustand nach Feuerungsoptimierung (rechts)

Es wurden Feuerungsmessungen zur Dokumentation der Ergebnisse durchgeführt. Die Feuerungseinstellungen der Brenner konnten reproduzierbar übertragen werden und führten zur Ausbildung einer weitestgehend zentralen Feuerlage der Boxerfeuerung. Aufgrund der hohen Brennergürtelbelastung müssen die Flammenimpulse der gegenüberliegenden Brenner gleichberechtigt in der Brennkammermitte aufeinandertreffen. Die Ergebnisse der Wandatmosphärenmessungen zeigten vorhandenen Sauerstoff und eine deutliche Verminderung der CO-Konzentrationen (Abbildung 15, rechtes Ergebnisbild). Es fanden in wenigen Bereichen noch Ablenkungen von Brennerflammen statt, die offensichtlich aus Ungleichverteilungen der Brennstoffaufgabe resultieren.

Die gesamten Ergebnisse führten abschließend zur Ausarbeitung von optimierten Feuerungsgrundeinstellungen, die als Vorgaben in die betriebliche Leittechnik zur Feuerungsführung über den gesamten Lastbereich vom Betreiber übernommen wurden. Bei einer nachfolgenden Revision zeigten sich keine Anzeichen von Sauerstoffmangelkorrosionen (Abbildung 16, Foto rechts). Der Reaktionsfortschritt in der Einzelflamme und die Ausbildung der zentralen Feuerlage konnten die Korrosionsursachen abstellen. Die zentral ausgeprägte Feuerlage führte darüber hinaus zur Vergleichmäßigung der O₂-Konzentrationen nach dem Dampferzeuger und der Stellungen der Rauchgasregelzugklappen (Abbildung 17).

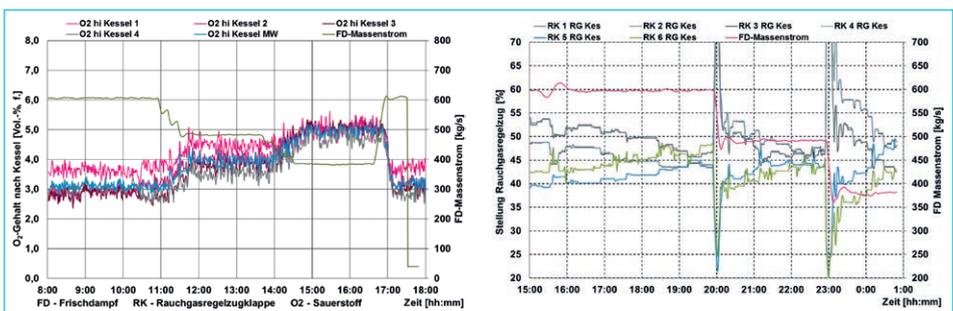


Abb. 17: Zeitlicher Verlauf der betrieblichen O₂-Messungen und der Klappenstellungen der Rauchgasregelzugklappen bei DE-Last 60 %, 80 % und 100 % und Einstellungen optimierter Feuerungsparameter

4.2. Beeinflussung der Dampferzeuger-Wandatmosphäre und der Betriebsführung des Systems Mühle-Brenner durch die Feuerlageausbildung

Bei einem mit Braunkohle betriebenen Dampferzeuger mit Tangentialfeuerung traten im Bereich des Kesseltrichters Korrosionsschäden auf [9]. Die Analyse der Ursachen zeigte, dass verschiedene Sachverhalte dazu führten. Es traten Verstopfungen im Bereich der Trichterluftzuführung auf, geänderte Brennstoffeigenschaften führten zur Erhöhung der mittleren Korngröße des Brennstoffs bei der Aufmahlung in den Schlagradmühlen und die Feuerungseinstellungen verursachten Flammenablenkungen und Wandberührungen. Die Ergebnisse der NIR-Thermografie zeigten deutlich unterschiedlich ausgeprägte Einzelflammen und Ablenkungen von benachbarten Brennerflammen aufgrund unterschiedlicher Flammenimpulse (Abbildung 18). Des Weiteren wurden Einzelflammen von zwei unteren Brennern lokalisiert, die kontinuierlich in den Bereich des Trichters strömten und direkte Wandberührungen verursachten (Abbildung 18, linkes Ergebnisbild). Durch Messungen der Konzentrationen von O₂ und CO an vorhandenen Messöffnungen wurden hohe CO-Werte im Bereich von bis zu 4,0 Vol.-%, tr. ermittelt (Abbildung 19, linkes Ergebnisbild) und der Sauerstoff war durch die in Wandnähe ablaufenden Verbrennungsreaktionen bei Werten von nahezu Null.

Zur Optimierung bzw. zum Abstellen der Ursachen wurden betriebsseitig die Verstopfungen der Trichterluftzuführungen behoben, es wurden die Siebterblechlängen im Bereich der Sieber der Schlagradmühlen angepasst und es erfolgte eine Verminderung des freien Querschnitts im Grießrücklauf der Mühlen [9]. Zur Vergleichmäßigung der Flammenimpulse und Ausbildung einer zentralen Feuerlage wurden feuerungstechnische Untersuchungen durchgeführt (Kapitel 3.3.). Dabei wurde festgestellt, dass die Betriebsweise der Mühlen mit deutlich abgesenktem Primärluftanteil zu Verzögerungen bei der Zündung und Verbrennung führten. Um stabile Flammenimpulse ausbilden zu können, wurden Empfehlungen hinsichtlich der Primärluftanteile und der Schlagradrehzahlen anhand der Ergebnisse ausgearbeitet.

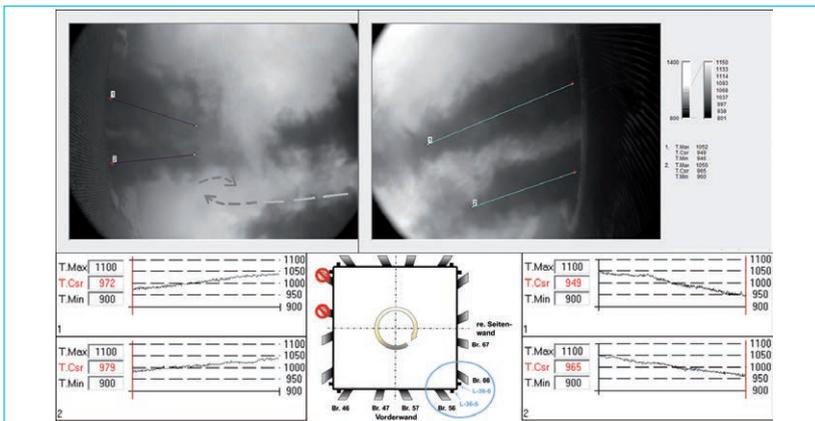


Abb. 18: Strahlbrenner einer Tangentialfeuerung; unterschiedliche Flammenimpulse und Temperaturniveaus der benachbarten Brenner

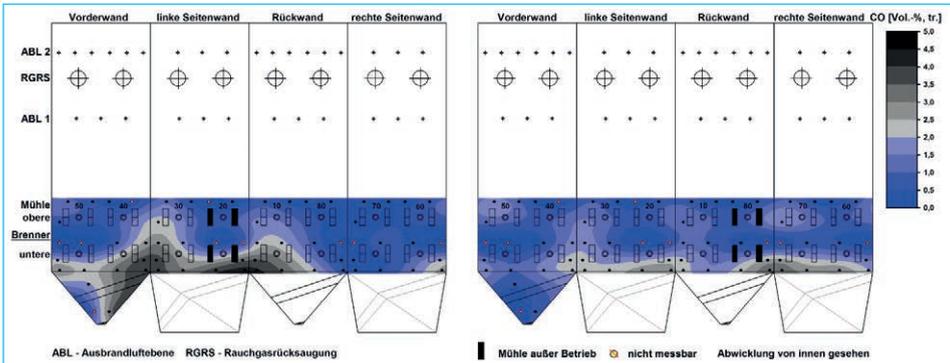


Abb. 19: Konzentrationsverteilung CO in Wandnähe; Istzustand (links) und optimierter Zustand (rechts)

Die Ausbildung einer zentralen Feuerlage wurde durch die Ausarbeitung und Anwendung von Vertrimmungsregeln erreicht [1] [2], bei der sich die Wandatmosphäre deutlich verbesserte (Abbildung 19, rechtes Ergebnisbild). Bei der Erhöhung des Primärluftvolumenstroms wurde festgestellt, dass sich die Temperatur des rückgesaugten Rauchgases im Rauchgasrücksaugungs-(RGRS)-Kanal bei konstanter Sichtertemperatur erhöhte (Abbildung 20). Durch die verzögerte primäre Verbrennungsreaktion verlängert sich die Brennzeit und die Wärmefreisetzung verlagert sich in den Bereich oberhalb der RGRS-Kanäle. Die Ausbildung einer zentralen Feuerlage bei gleichzeitiger Erhöhung des Primärluftvolumenstroms zeigt die gegenseitige Beeinflussung der Verbrennungsabläufe und des Mahlvorgangs. Das Temperaturniveau im RGRS-Kanal wurde bei in etwa konstanten Sichtertemperaturen von ca. 860 °C auf 899 °C erhöht (Abbildung 20). Durch einen unzureichenden Verbrennungsfortschritt in den Einzelflammen tritt die typischerweise erwartete Absenkung der Sichtertemperatur durch die Erhöhung des Primärluftvolumenstroms nicht ein. Der bestimmungsgemäße Betrieb der Einzelbrenner wirkt sich direkt auf den Mahlvorgang aus und das System Mühle-Brenner sollte als ein Gesamtsystem mit optimierten Parametern betrieben werden.

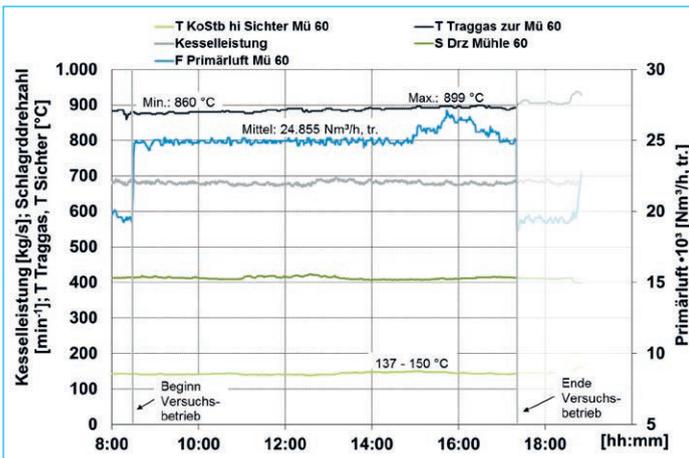


Abb. 20: Einfluss des Primärluftvolumenstroms auf das Verbrennungsverhalten der Brenner und deren Rückwirkungen auf die Traggastemperatur

4.3. Auswirkungen der Feuerungsgrundeinstellungen der Einzelbrenner einer Zyklonfeuerung auf den Schmelzkammerbetrieb

Das dritte Beispiel zeigt Auszüge von Ergebnissen von feuerungstechnischen Untersuchungen und Optimierungen einer mit Steinkohle betriebenen Schmelzkammerzyklonfeuerung mit Strahlbrennern, die als Deckenbrenner rotationssymmetrisch angeordnet sind (Abbildung 21). Die acht Brennergruppen werden von vier Schlägermühlen mit Brennstoff und Primärluft versorgt. Weitere Einzelheiten zur Verbrennungsluftführung und dem Einzelverbrennungsverhalten sind in Kapitel 3.2. aufgeführt. Im Rahmen einer Revision wurden thermische Schädigungen an zwei Brennerkonstruktionen festgestellt und der Ascheabzug war von Verstopfungen betroffen, die durch erstarrte Asche entstanden. Dies weist auf einen unzureichenden Ascheschmelzfluss, also eine zu geringe mittlere Verbrennungstemperatur in der Brennkammer hin. Um die Brennerkonstruktion vor weiteren thermischen Schädigungen zu schützen, wurden betreiberseitig die Brennerluftzahlen erhöht und damit der Zündpunkt vom Brennermund in Richtung Schmelzkammer verschoben. Im Rahmen der projektvorbereitenden Betriebsdatenanalyse und Vorort-Begehung wurde festgestellt, dass die Flammen bis in den Bereich nach der Umlenkung des Rauchgases aus dem Schmelzkammerzyklon reichten. Auf Basis der Untersuchungen des Einzelverbrennungsverhaltens sollte die Gesamtfeuerung optimiert werden. Dabei war es erforderlich, eine brennernahe Zündung des eingetragenen Brennerstoffs zu erreichen und gleichzeitig ein Temperaturniveau, welches die thermische Belastung der Brennerkonstruktion vermindert und einen ausreichenden Ascheschmelzfluss realisiert.

Dem vorausgegangen waren Mühlenmessungen und eine Einstellung der Gleichverteilung an Brennstoff und Primärluft auf alle Brenner. Es wurden relative Abweichungen bei den Brennstoffanteilen von bis zu +19,9 Ma.-% und -31,9 Ma.-% lokalisiert, die über zuvor betreiberseitig installierte Sicheltrimmschieber in einem Bereich von $\pm 5\%$ ausgeglichen wurden. Die Basis für den bestimmungsgemäßen Betrieb dieser Schmelzkammerzyklonfeuerung ist die Ausbildung von gleichen Flammenimpulsen, insbesondere unter Berücksichtigung der Versorgung der einzelnen Brenner der Brennergruppen durch zwei Mühlen.

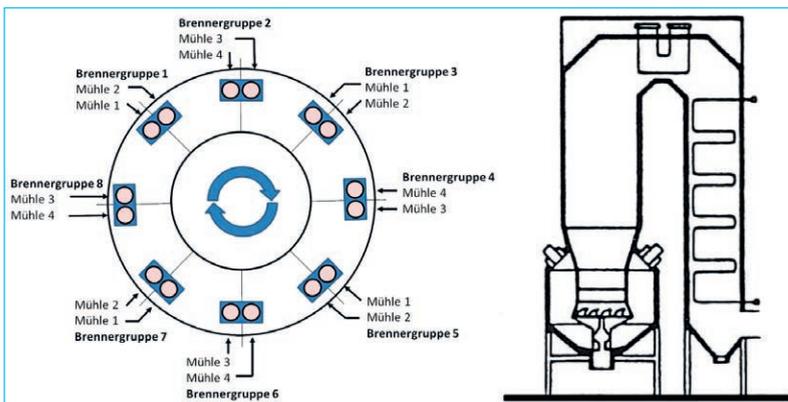


Abb. 21: Vertikale Schmelzkammerzyklonfeuerung [3] und Anordnung der Brennergruppen

Die betrieblichen Volumenstrommessungen der beiden Hauptluftkanäle wurden justiert. Es lagen Abweichungen vor, die dazu führten, dass die Hälfte der Brennergruppen mit unterschiedlichen Volumenströmen betrieben wurde. Weiterhin erfolgt die sekundäre Verbrennungsluftaufteilung über Klappenstellungen und es wurden Einstellwerte für die Betriebsvorgaben auf der Basis von Druckmessungen benötigt. Dafür wurden vorhandene Druckmessstellen vor und hinter den Klappen mit Versuchsmesstechnik ausgerüstet, um eine gleichmäßige Verbrennungsluftverteilung zu allen Brennergruppen bei der Optimierung der Gesamtfeuerung zu erreichen sowie die Einstellwerte der Klappen zu bestimmen und für den Betreiber zu dokumentieren.

Anschließend wurden die optimalen Feuerungseinstellungen für eine brennernahe Zündung und einen intensiven Verbrennungsverlauf mit einem für die Schmelzfeuerung erforderlichen hohen Temperaturniveau auf alle Brennergruppen übertragen. Dies erfolgte schrittweise mit Einstellungen der Trimmklappen und der Abgleichklappen. Bereits während des Einstellungsvorgangs trat ein erhöhter Schlackefluss der Schmelzfeuerung ein, der zusätzlich ein verstärktes Austragen größerer Schlackestücken zur Folge hatte. Zur Bewertung der Ergebnisse wurden Filterascheprobe und Granulatproben entnommen und auf die Restkohlenstoffgehalte analysiert. Mittels der NIR-Thermografie wurden die Ergebnisse hinsichtlich der Reproduzierbarkeit an allen Brennerflammen überprüft und dokumentiert (Kapitel 3.2.). Es waren keine Anpassungen der Feuerungseinstellungen erforderlich. Der Kohlenstoffgehalt in der Flugasche wurde von 14,5 Ma.-% auf 8,4 Ma.-% innerhalb des Versuchszeitraums vermindert. Die Kohlenstoffgehalte des Granulats verhielten sich im Mittel über einen längeren Bewertungszeitraum weitestgehend unabhängig von den Feuerungseinstellungen und wurden geringfügig vermindert (Abbildung 22).

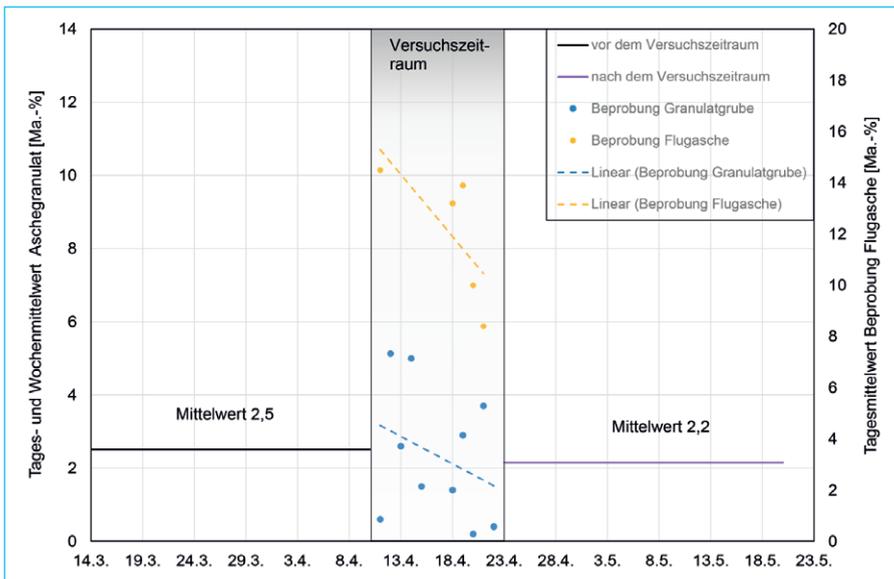


Abb. 22: Kohlenstoffgehalt und Glühverlust von Granulat und Flugasche der Schmelzkammerfeuerung vor, während und nach den Feuerungsoptimierungen

5. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen von Projekten zur Feuerungsoptimierung wurden als Basis der tatsächliche Istzustand und das Optimierungspotenzial der Einzelbrenner und der Feuerung anhand von Versuchsmessungen (z. B. NIR-Thermografie) bestimmt. Für das Verständnis der ablaufenden Prozesse und für die Umsetzung der Optimierungen dienten die feuerungstechnischen Grundlagen der Brenner- und Feuerungsarten sowie die Berücksichtigung der Auswirkungen der konstruktiven Details der Hersteller. Das der Auslegung entsprechende Verbrennungsverhalten der jeweiligen Einzelbrenner besitzt einen wesentlichen Einfluss auf die Ausbildung der Feuerlage in industriellen Dampferzeugern. Aufgrund hoher Brennergürtelbelastungen und den daraus resultierenden hohen Flammenimpulsen erreichen die Einzelflammen gegenüberliegende Brennkammerwände oder treffen auf benachbarte Flammenimpulse in der Brennkammermitte. Dabei ist die Ausbildung von Gleichgewichten der Flammenimpulse aller Einzelbrenner in komplexen Mehrbrennerfeuerungen für die Bildung eines zentralen Flammenkerns ohne direkte Wandberührungen essenziell. Dies ist unabhängig von den Einzelbrennern (Drall- oder Strahlbrenner) und der Feuerungsart (Boxer- oder Tangentialfeuerung oder Schmelzkammerzyklonfeuerung). Die Projekterfahrungen zeigen darüber hinaus, dass die Randbedingungen des Verbrennungsprozesses und die gegenseitigen Wechselwirkungen mit angrenzenden Prozessen, z. B. der Trocknung und Aufmahlung von Braunkohle in einer Schlagradmühle mit Strahlbrennern, wesentliche Einflüsse besitzen. Eine gesamtheitliche Betrachtung und Optimierung der Dampferzeugerfeuerungen ist daher unerlässlich.

In Bezug auf die Lastfahrweise (Teil- oder Mindestlast) wurden ebenfalls Feuerungsuntersuchungen angewendet, um die Zünd- und Verbrennungsstabilität der Einzelbrenner und die Ausbildung der Feuerlage zu bewerten und zu optimieren. Dabei können Empfehlungen zur Betriebsweise der Mühlen-Brenner erarbeitet werden, wie beispielsweise die Festlegungen der Anzahl und Bestimmung der bei Mindestlast in Betrieb verbleibenden Mühlen-Brenner.

Es wird empfohlen, stets die Feuerungsgrundeinstellungen den aktuellen Randbedingungen der Dampferzeugerfeuerungen durch Untersuchungen auf der Basis von Versuchsmessungen anzupassen. Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb der Feuerungsanlage können zu Betriebsbeeinträchtigungen oder gar zu Schäden führen.

6. Quellen

- [1] Griebe, Steffen; Bischoff, Helmut; Brunne, Thomas; Stecklina, Gerd; Pache, Frank: Feuerungs- und Flammenbewertungen mit neuen Messtechniken. In: VGB PowerTech (2016), H. 12, S. 58-65.
- [2] Griebe, Steffen; Kaß, Helge; Biesold, Volker; Stecklina, Gerd; Kirsche, Holger; Thimme, Thorsten: Ist-Zustandsbewertung und feuerungstechnische Optimierung von Dampferzeugern – Ein methodischer Ansatz mittels kombinierter Messverfahren. In: Beckmann, Michael; Hurtado, Antonio (Hrsg.): Kraftwerkstechnik 2016. Strategien, Anlagentechnik und Betrieb. Freiburg: SAXONIA Standortentwicklungs- und verwaltungsgesellschaft mbH, 2016, S. 791-809.

- [3] Effenberger, Helmut: Dampferzeuger. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1991.
- [4] Dolezal, Richard: Dampferzeugung. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 1985.
- [5] Zelkowski, Jacek: Kohleverbrennung – Brennstoffe, Physik und Theorie, Technik. Band 8, Essen: VGB Kraftwerkstechnik GmbH, 1986.
- [6] Phillip, Matthias: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Stabilitätsverhalten von Drallflammen mit zentraler Rückströmzone. Dissertation, Karlsruhe, 1991.
- [7] Burchhardt, Uwe; Griebe, Steffen; Lösche, Christian; Kaß, Helge; Zimmer, Peter: Übersicht zu Tests und Ergebnissen aus der Forschungsanlage von Vattenfall. In: Beckmann, Michael; Hurtado, Antonio (Hrsg.): Kraftwerkstechnik 2014. Strategien, Anlagentechnik und Betrieb. Freiberg: SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH, 2014, S. 201-219.
- [8] Greul, Oliver: Betriebsoptimierung moderner Steinkohlenfeuerungen zur Vermeidung von Feuerraumkorrosion. Dissertation, Stuttgart, 2010.
- [9] Brunne, Thomas; Mengel, Andreas; Griebe, Steffen; Bischoff, Helmut: Minderung einer Korrosionsschädigung durch feuerungstechnische Untersuchungen/Maßnahmen. Kassel: VGB-Fachtagung – Brennstofftechnik und Feuerungen 2018.

Anzeige