

# Optimierung des Zyklonabscheiders einer zirkulierenden Wirbelschichtfeuerung

## Theoretischer Hintergrund und Betriebserfahrungen

Christoph Ipsen, Dirk Roschek und Ulrich Muschelknautz

### Abstract

*Optimisation of the cyclone separator of a circulating fluidised bed boiler – theoretical background and operating experiences*

*The municipal utility Stadtwerke Flensburg GmbH, operates three circulating fluidised bed (CFB) boilers (boilers 9, 10 and 11), which are almost identical in design. Over the years numerous modifications have been made to the steam generators. Consequently, a fuel mixture is being combusted today that totally differs from the design fuel. Ruhr coal has been completely substituted by import coal. Furthermore, up to 12 % of refuse derived fuel (RDF) is now being utilised. Due to economic pressure, as much RDF as possible must be burned. Therefore, several CFB boilers often operate concurrently, to some extent also under adverse load conditions.*

*Technical difficulties arose as a result of the fuel change and consequently numerous modifications were made, such as cladding of the combustion chamber membrane walls in all three CFB boilers with silicon carbide plates and the installation of a smaller superheater in boiler 9. Due to those changes, functioning of all three CFB boilers was impaired, in particular, however, that of boiler 9. The steam generator could no longer be operated at full load. In order to ensure trouble-free operation, the separation efficiency of the cyclone separator has been improved by installing an eccentrically narrowed vortex finder with swirl vane inserts and a barrier in the inlet duct.*

### Vorstellung des Unternehmens

Die Stadtwerke Flensburg GmbH betreibt im äußersten Norden Deutschlands ein Heizkraftwerk. Zu den Hauptaufgaben des Energieversorgers gehört die Erzeugung von Strom und Fernwärme in umweltschonender Kraft-Wärme-Kopplung. Darüber hinaus ist das Unternehmen örtlicher Versorger für Trinkwasser und Industriegas. Das Fernwärmenetz wurde in den 1960er-Jahren errichtet und schrittweise ausgebaut. Es erstreckt sich heute über das gesamte Stadtgebiet und umliegende Gemeinden einschließlich einer dänischen Kommune. Mit über 635 km Länge zählt es zu einem der größten Fernwärmenetze in der Bundesrepublik Deutschland.

Im zentralen Heizkraftwerk an der Flensburger Förde (Bild 1) werden drei zirkulierende atmosphärische Wirbelschichtfeuerungen mit je 118 MW<sub>th</sub> Feuerungsleistung betrieben. Ferner kann auf zwei Staubfeuerungen mit je 109 MW<sub>th</sub> Feuerungsleistung und einen Spitzenlastkessel mit Leichtöl-Erdgas-Kombibrennern mit 99 MW<sub>th</sub> Feuerungsleistung zurückgegriffen werden. Der Kraftwerkspark wird momentan grundlegend modernisiert und erweitert. Um ältere Dampferzeuger zu ersetzen, wird derzeit eine hocheffiziente GuD-Anlage mit bis zu 190 MW<sub>th</sub> Feuerungsleistung errichtet. Zudem wurde kürzlich zur Wärmeerzeugung ein neuartiger Elektrodenheizkessel in Betrieb genommen.

### Vorgeschichte

Die drei zirkulierenden Wirbelschichtfeuerungen, Kessel 9, 10 und 11, arbeiten nach dem Lurgi-Verfahren und sind nahezu baugleich. Sie wurden zwischen 1985 und 1991 errichtet und gehören zu den ersten dieser Bauart [1]. Die Dampferzeuger liefern jeweils bis zu 150 t/h Dampf bei 525 °C und 92 bar. Eine Zwischenüberhitzung ist nicht vorgesehen.

### Änderung des Brennstoffgemischs

Die zirkulierenden Wirbelschichtfeuerungen wurden für Steinkohle, insbesondere Ruhrkohle, als Regelbrennstoff und op-

tional Trockenbraunkohle als Sekundärbrennstoff konzipiert. Der Einsatz von Braunkohle ging nie über das Versuchsstadium hinaus. Wegen Beschaffungsschwierigkeiten wurde Ende der 1980er-Jahre von den Einsatzplänen vollends Abstand genommen. Mit Wegfall der Subventionen durch den „Kohlepennig“ wurde Mitte der 1990er-Jahre, wie in vielen anderen deutschen Kraftwerken auch, die vergleichsweise teure Ruhrkohle durch weitaus günstigere Importkohlen ersetzt.

Die wohl größte Änderung brachte der Umbau zur Mitverbrennung von Ersatzbrennstoff (EBS) ab dem Jahre 2006 [2]. Aufgrund wechselhafter Qualitäten ist das Brennstoffgemisch recht heterogen. Genehmigungsrechtlich dürfen bis zu 25 % der Feuerungswärmeleistung substituiert werden. Abhängig von der Brennstoffqualität ermöglicht die vorhandene Anlagen- und Fördertechnik gegenwärtig einen Mitverbrennungsanteil von bis zu 12 %. Aus ökologischen Gründen werden seit einigen Jahren in geringem Umfang auch naturbelassene Holzbrennstoffe mitverbrannt. Aufgrund der genannten Entwicklungen wird heute ein Brennstoffgemisch, bestehend aus unterschiedlichen Importkohlen, EBS und Holzhackschnitzeln, eingesetzt. Das Gemisch weist deutlich andere Eigenschaften auf als jenes, für das die Anlagen ursprünglich konzipiert waren.

### Änderung der Anlagenfahrweise

Die Fahrweise der Anlagen orientiert sich am Wärmebedarf. Vor dem Umbau zur Mitverbrennung von EBS wurden die zir-

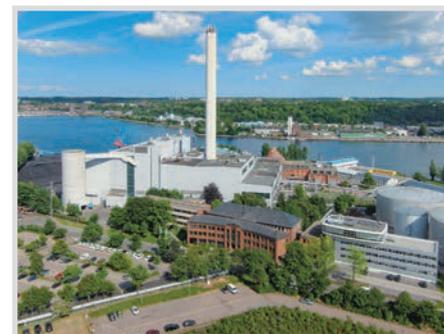


Bild 1. Blick auf das zentrale Heizkraftwerk an der Flensburger Förde.

### Autoren

Dipl.-Ing. Christoph Ipsen  
Dipl.-Ing. Dirk Roschek  
Stadtwerke Flensburg GmbH  
Flensburg/Deutschland  
Dr. Ulrich Muschelknautz  
MK Engineering  
Heidelberg/Deutschland

kulierenden Wirbelschichtfeuerungen überwiegend in Grundlast betrieben. Auf Änderungen des Fernwärmebedarfs konnte durch Laständerungen der wesentlich flexibleren, mit Steinkohle befeuerten Staubfeuerungen reagiert werden. Heutzutage besteht aus wirtschaftlichen Gründen die Notwendigkeit, möglichst viel EBS zu verbrennen. Daher werden zwangsläufig mehrere Wirbelschichtfeuerungen parallel betrieben, auch wenn dies zu manchen Zeiten ungünstigere Lastzustände der Anlagen erfordert.

### Änderungen der Wärmetauscher

Durch die Mitverbrennung von EBS sind die Überhitzer im Fließbettkühler starkem Verschleiß ausgesetzt. Es traten wiederholt Schäden auf [2]. Als Ursache für den forcierten Materialabtrag war Chlor-Korrosion nicht auszuschließen. Aufgrund der beengten Platzverhältnisse im Fließbettkühler waren Reparaturarbeiten an den Rohrbündeln nur unter erschwerten Bedingungen möglich. Es wurde beschlossen, zu Versuchszwecken in Kessel 9 einen neuen Überhitzer mit veränderter Bauform zu Versuchszwecken zu verbauen. Der Zugang zu Schadensstellen wurde erleichtert, indem ein Teil der Rohrbögen entfiel. Dadurch wurde die Wärmetauscherfläche jedoch um etwa ein Drittel verringert. Daher wird heute weniger Wärme über den Überhitzer im Fließbettkühler ausgekoppelt.

Neben dem Überhitzer im Fließbettkühler des Kessels 9 waren die Membranwände in den Brennkammern aller drei Wirbelschichtfeuerungen hohem Verschleiß ausgesetzt. Hier war ebenfalls Chlor-Korrosion nicht auszuschließen. Da sich die außerplanmäßigen Stillstände in der Heizperiode 2009/2010 häuften, wurden die Brennkammern aller zirkulierenden Wirbelschichtfeuerungen vollflächig mit einem keramischen Rohrwandschutzsystem verkleidet [3]. An den mit Siliciumcarbid-Platten verkleideten Membranwänden traten bisher keine Rohrschäden auf. Obwohl die verwendete Keramik über eine hohe Wärmeleitfähigkeit verfügt, wird in der Brennkammer zwangsläufig weniger Wärme übertragen.

### Funktionsstörungen

Mehrere Veränderungen der äußeren Rahmenbedingungen sowie Modifikationen an den Kesselanlagen selbst führten dazu, dass die Funktion der drei zirkulierenden Wirbelschichtfeuerungen beeinträchtigt wurde. Der Kessel 9 war von den Schwierigkeiten am stärksten betroffen.

Die Änderung des Brennstoffgemischs hatte gravierende Folgen für die Funktion der Anlagen. Zwar kann in zirkulierenden Wirbelschichtfeuerungen ein breites Spektrum an Brennstoffen unterschiedlicher Qualitäten verbrannt werden, der viel umworbene Flexibilität sind jedoch ver-

fahrenstechnische Grenzen gesetzt. Eine eklatante Veränderung war eine deutliche Vergrößerung der Umlaufasche infolge der Mitverbrennung von EBS. Die Anlagen wurden ursprünglich für Umlaufasche mit einem Median-Korndurchmesser zwischen 180 und 200  $\mu\text{m}$  ausgelegt. Im Zuge der Brennstoffänderung ist dieser auf bis zu etwa 300  $\mu\text{m}$  angestiegen. Außerdem war zu wenig Asche im Umlauf. Dies blieb für den Wärmehaushalt der Anlagen nicht ohne Folgen. Um fehlende Umlaufasche auszugleichen, musste laufend Quarzsand zugeführt werden. Ein Großteil des Materials wurde am Zyklon umgehend wieder ausgetragen und im E-Filter abgeschieden. Im Gegensatz zur rund geschliffenen Umlaufasche ist Quarzsand recht scharfkantig, wodurch der Verschleiß von Wärmetauschern und Feuerfestauskleidung verstärkt wird. Die Zugabe großer Mengen Quarzsand kann daher kein Ausweg sein, das Ascheinventar einer zirkulierenden Wirbelschicht langfristig aufrecht zu erhalten.

Durch die Verkleinerung des Überhitzers im Fließbettkühler und die Verkleidung der Membranwände in den Brennkammern der Wirbelschichtfeuerungen wurde der Umlaufasche zu wenig Wärme entzogen. Dieses konnte mit den Nachschaltflächen nicht vollständig kompensiert werden. Um ausreichend Asche über den Fließbettkühler zu leiten und dem Material so Wärme zu entziehen, war der Aschespieß weit geöffnet. Dennoch wurde der Umlaufasche zu wenig Wärme entzogen. Bei großer Last steigt die Verbrennungstemperatur auf über 900 °C an.

Die Verbrennungstemperatur sollte idealerweise zwischen 850 und 900 °C liegen. Dieses schmale Temperaturfenster stellt einen Kompromiss zwischen der optimalen Schwefeleinbindung und niedrigen Stickoxid-Emissionen dar. Zudem steigt mit höheren Temperaturen das Risiko, dass Aschen versintern oder gar schmelzen und Korrosionsprozesse beschleunigt werden. Es wurden Versuche unternommen, die Brennkammer durch eine Steigerung der Sekundärluftmenge zu kühlen. Anstatt der üblichen 4,0 Vol.-% Sauerstoff im Rauchgas wurde mit einem deutlichen Luftüberschuss (5,5 Vol.-%  $\text{O}_2$ ) gefahren. Die Verbrennungstemperaturen konnten so zwar etwas gesenkt werden, die Maßnahme hatte jedoch eine Wirkungsgradverschlechterung zufolge. Der Kessel 9 konnte in der Heizperiode 2012/2013 nicht mehr unter Volllast betrieben werden. Die maximale Dampfleistung musste von zuvor 150 auf 130 t/h reduziert werden.

Im Sinne eines wirtschaftlichen Anlagenbetriebs war diese Situation nicht tragbar. Es musste dringend eine Lösung gefunden werden, die Körnung der Umlaufasche zu verfeinern und ausreichend Material im Umlauf zu halten. Daher wurde ein Konzept ausgearbeitet, welches eine Steige-

rung des Zyklonabscheidegrades unter Berücksichtigung der gegebenen Verhältnisse vorsah.

### Ursachenanalyse

Vor der verfahrenstechnischen Optimierung des Zyklons wurden in einem ersten Schritt die Ursachen für die Änderungen des Anlagenbetriebs der Kessel 9 bis 11 seit Umstellung auf EBS analysiert. Die wesentlichen Änderungen waren eine Vergrößerung des Umlaufmaterials und der Bettasche sowie eine Verfeinerung der E-Filterasche. Die dadurch nötige Erhöhung der Quarzsandzufuhr zog einen deutlich gesteigerten Verschleiß von Wärmetauschern und Feuerfestauskleidung nach sich.

Die Analyse von Betriebs- und Geometriedaten der drei Anlagen Kessel 9 bis 11 über den Zeitraum von 1997 bis 2011 führte zu folgenden Ergebnissen: Der bei der Umstellung auf Mitverbrennung von EBS um bis zu 15 % erhöhte Rauchgasvolumenstrom ist als wesentliche Ursache für die Vergrößerung der Umlaufasche anzusehen. Beispielsweise ergeben sich für den Kessel 9 rechnerisch folgende Verbrennungsluft- und Rauchgasvolumenströme: Vor der Mitverbrennung von EBS mit 100 % Steinkohle betrug die  $\lambda$ -Zahl 1,25 (im Auslegungszustand), woraus sich bei einem  $\text{O}_2$ -Gehalt im Rauchgas von 4,0 Vol.-% eine Verbrennungsluftmenge von 137.000  $\text{m}^3_{\text{VN}}/\text{h}$  und eine Reingasmenge von 144.000  $\text{m}^3_{\text{VN}}/\text{h}$  ergeben. Bei der Mitverbrennung von EBS (5,2 t/h) betrug, bei der zuvor beschriebenen Fahrweise mit deutlichem Luftüberschuss zur Kühlung der Rauchgase, die  $\lambda$ -Zahl 1,39. Daraus ergeben sich bei einem  $\text{O}_2$ -Gehalt im Rauchgas von 5,5 Vol.-% eine Verbrennungsluftmenge von 156.000  $\text{m}^3_{\text{VN}}/\text{h}$  und eine Reingasmenge von 165.500  $\text{m}^3_{\text{VN}}/\text{h}$ . Die Verbrennungsluftmenge wurde demnach durch die Umstellung auf Mitverbrennung von EBS um 13,9 %, die Reingasmenge des Kessels um 14,9 % gesteigert.

Andere mögliche Einflussfaktoren auf den Aschehaushalt wie die Geometrien der am Aschekreislauf beteiligten Komponenten und die Aschezufuhr bei gegebener Last haben sich bei der Umstellung auf EBS-Mitverbrennung nicht geändert und kamen daher als Ursachen für die Vergrößerung der Umlaufasche nicht in Betracht. Der in allen drei Anlagen durchgeführte Einbau eines trichterförmigen Düsenbodens beeinflusst die Körnung der Umlaufasche praktisch nicht. Unverändert blieben auch die Zusammensetzung der Kohlesorten sowie der Aschegehalt des zugeführten Brennstoffs, trotz der zusätzlichen Mitverbrennung von EBS.

Messdaten bei unterschiedlichen Lastfällen zeigen klar, dass sich die Umlaufasche mit zunehmendem Volumenstrom vergrößert. Eine theoretische Abschätzung der Sink-

geschwindigkeit der Partikel verdeutlicht, dass – ähnlich wie in einem Sieb – durch die erhöhte Luftzufuhr die Umlaufasche quantitativ in dem Maße größer wird, wie es bei den Messungen beobachtet wurde. Die Analyse zeigt ferner, dass die gemessene Körnung der Umlaufasche eindeutig mit dem Lastfall korrelierte, der in allen drei Anlagen während des betrachteten Betriebszeitraumes sehr stark variierte: Je höher die Last, desto größer der Rauchgasstrom und desto größer die Umlaufasche (Bild 4).

Die nach Umrüstung auf EBS-Mitverbrennung beobachtete Abnahme des Median-Korndurchmessers der E-Filterasche lässt sich ebenfalls mit dem höheren Luftvolumenstrom erklären: Ein um 15 % erhöhter Luftvolumenstrom steigert die Umfangsgeschwindigkeiten auf dem Tauchrohrradius  $u_i$  um circa 15 % und senkt damit entsprechend [4] die Trenngrenze

$$d_T = \sqrt{\frac{18 \eta 0,1 \dot{V}}{\Delta \rho u_i^2 2 \pi h_i}}$$

$d_T$ : Trennkorndurchmesser in  $\mu\text{m}$

$\eta$ : Dynamische Gasviskosität in  $\text{Pa} \cdot \text{s}$

$\dot{V}$ : Gasvolumenstrom in  $\text{m}^3/\text{s}$

$\Delta \rho$ : Dichtedifferenz zwischen Feststoff und Gas in  $\text{kg}/\text{m}^3$

$u_i$ : Umfangsgeschwindigkeit auf dem Tauchrohrradius in  $\text{m}/\text{s}$

$h_i$ : Zyklonhöhe unterhalb des Tauchrohres in  $\text{m}$

des Zyklons. Folglich verfeinert sich die E-Filterasche.

## Umbau einer zirkulierenden Wirbelschichtfeuerung

Besonders der Kessel 9 war in seiner Funktion eingeschränkt; zudem hätte das vorhandene Tauchrohr, das letztmalig Mitte der 1990er-Jahre erneuert wurde, ohnehin ersetzt werden müssen. Daher lag die Entscheidung nahe, zunächst diesen Dampferzeuger mit einem neuen, veränderten Tauchrohr auszustatten.

### Verfahrenstechnische Änderungen

Die Optimierungsrechnungen wurden beispielhaft für den Rückführzyklon des Kessels 9 durchgeführt. Für die Rückführzyklone der beiden anderen Kessel 10 und 11 sind die gleichen Maßnahmen vorgesehen, weil die drei Anlagen nahezu baugleich sind. Das Tauchrohr wurde durch exzentrische Einschnürung optimiert. Die Tauchrohrparameter (Durchmesser, Eintauchtiefe, Verschiebung und Winkel der Verschiebung) sind durch die Geometrie des Zyklons und die Einströmverhältnisse bestimmt. Ferner wurde geprüft, inwieweit eine Modifikation des Eintrittskanals die Abscheideleistung erhöht. Zusätz-

lich wurde ein Tauchrohrleitapparat zur Druckverlustreduzierung ausgelegt. Alle Berechnungen wurden auf Basis der Zyklontheorie nach *Barth-Muschelknautz* [4] durchgeführt.

### Exzentrisch eingeschnürtes Tauchrohr

Eine Einschnürung des Tauchrohres erhöht die für die Abscheidung relevanten Umfangsgeschwindigkeiten im Zyklon. Die zusätzliche exzentrische Verschiebung des Tauchrohres führt zu einer besseren Abscheidung der mit der Deckengrenzschicht mitgeführten Partikel. Erst durch die exzentrische Verschiebung des Tauchrohres entfaltet dieses seine volle Abscheidewirkung: Der Zyklonwirbel dreht mit praktisch unverminderter Umfangsgeschwindigkeit bis zur Zyklondecke. Daher ist der Deckengrenzschicht ein Druckgradient von außen nach innen aufgeprägt mit der Folge, dass die Deckengrenzschichtströmung spiralförmig von außen nach innen strömt. Die Existenz dieser mit Partikeln angereicherten Deckengrenzschicht ist der einzige Grund, weshalb Zyklone mit Tauchrohren versehen werden: Durch das Tauchrohr wird die Deckengrenzschicht an der Tauchrohrwurzel nach unten umgelenkt. Entlang der Tauchrohräußenwand strömt die Grenzschicht dann, angetrieben durch die rotierende Strömung zwischen Tauchrohr und Zyklonwand, spiralförmig nach unten bis zur Austrittsöffnung. Aufgrund der Spiralbewegung wirken Zentrifugalkräfte auf die in der Grenzschicht transportierten Partikel und reinigen die Grenzschicht auf diese Weise von Partikeln ab. Für diese sogenannte Tauchrohrabscheidung existiert eine optimale Tauchrohrlänge [4].

Zudem beeinflusst aber auch die Position des Tauchrohres dessen Abscheideleistung entscheidend. Es hat sich zunächst experimentell gezeigt, dass eine exzentrische Positionierung der Tauchrohrachse dessen Abscheideleistung verbessert [5]. Es wurde ein theoretisches Verständnis des Effekts entwickelt und die Auswirkung der Maßnahme auf die Zyklonleistungsdaten berechenbar gemacht. Die Maßnahme wurde seit 1994 in zahlreichen Rückführzyklonen von Wirbelschichtfeuerungen erfolgreich eingesetzt [6].

Theoretisch lässt sich der Effekt wie folgt verstehen: Aufgrund des tangentialen Einlaufs in den Zyklon (dies gilt sowohl für einen Schlitzeinlauf als auch – allerdings schwächer – für einen Spiraleinlauf) wird die Achse der Wirbelströmung aus dem geometrischen Zentrum des Zyklons heraus gedrängt. Das Zentrum des Wirbels ist also exzentrisch aus dem geometrischen Zentrum des Zyklons verschoben. Bei einem zentrisch angebrachten Tauchrohr bedeutet dies, dass der statische Druck längs des Tauchrohrumfangs nicht konstant ist. Der Bereich der Tauchrohroberfläche, der näher an der Wirbelachse liegt, ist einem geringeren Druck ausgesetzt als der Teil der

Tauchrohroberfläche, der ihr ferner steht. Folglich strömt die Tauchrohrgrenzschicht vom Gebiet höheren Drucks zum Gebiet geringeren Drucks, wo ihre Umfangsgeschwindigkeit stagniert. In diesem Teil der Tauchrohroberfläche (dem, der näher an der exzentrisch verschobenen Wirbelachse liegt) strömt die Grenzschicht somit praktisch ohne Umfangsgeschwindigkeit senkrecht nach unten. Die Partikelabscheidung in diesem Teil der Tauchrohrgrenzschicht ist folglich gering, wodurch der Abscheidegrad des Tauchrohres beeinträchtigt wird. Wird das Tauchrohr exzentrisch derart verschoben, dass Tauchrohr- und Wirbelachse übereinstimmen, so wird eine gleichmäßige Umströmung des Tauchrohres längs des ganzen Umfangs erreicht, und die Abscheideleistung des Tauchrohres wird deutlich erhöht.

### Tauchrohrleitapparat

Zur Druckverlustreduzierung wurde ein Tauchrohrleitapparat eingebaut. Dieser besteht aus einem rotationsymmetrischen Kern mit aufgeschweißten gekrümmten Leitschaukeln. Die Leitschaukeln wandeln die in das Tauchrohr eintretende Wirbelströmung verlustarm in eine rein axiale Strömung um. Dadurch wird der größte Teil der Rotationsenergie des Wirbels in Druck umgewandelt. Ohne Leitapparat geht die Rotationsenergie durch Reibung im Reingaskanal verloren [7].

Mit einem Tauchrohrleitapparat kann der Druckverlust eines Zyklons deutlich gesenkt werden, ohne den Abscheidegrad zu beeinträchtigen. In hoch beladenen Zyklonen (Rohgasstaubkonzentration  $> 500 \text{ g}/\text{m}^3$ ) wird der Druckverlust um 30 bis 40 % reduziert, in Zyklonen mit geringer bis mittlerer Beladung ( $< 100 \text{ g}/\text{m}^3$ ) um bis zu 60 %. Das Ausmaß der Reduktion hängt von den Geometrie- und Betriebsdaten ab und kann berechnet werden.

### Schwelle im Eintrittskanal

Zusätzlich wurde eine Schwelle am Anfang des Eintrittskanals zwischen Brennraum und Zyklon eingebaut. Dadurch wird der Abscheidegrad nochmals verbessert, weil die Partikel im Eintrittskanal eine stärkere Beschleunigung erfahren und damit ein geringerer Schlupf zwischen Gas und Feststoff am Eintritt in den Zyklon erreicht wird [8].

### Konstruktion

Das vorhandene Tauchrohr war ein einfaches, durch Rippen verstärktes Stahlrohr. Das Bauteil hing an acht federbelasteten Zugstangen, die im Stahlmantel des Zyklons verankert waren. Das neue Tauchrohr (Bild 2) unterscheidet sich grundlegend von der vorherigen Konstruktion. Bei der Neukonstruktion wird auf eine Aufhängung mittels Zugstangen verzichtet. Stattdessen liegt das Bauteil lose auf einem Auflager. Die ungehinderte Wärmeausdehnung wurde durch Berechnungen belegt.

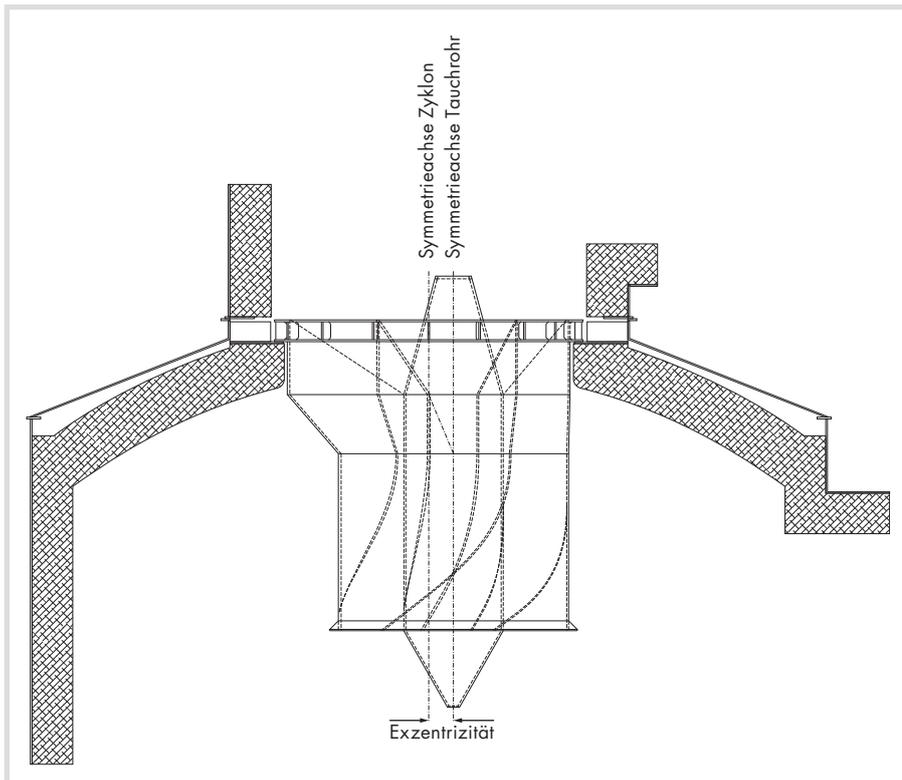


Bild 2. Aufstellungszeichnung des neuen exzentrischen Tauchrohrs mit Leitapparat und Auflagering.

Das Bauteil ist gegen axiales Verdrehen gesichert. Die Neukonstruktion besteht aus einem Außenrohr, einem Leitapparat mit sechs geschwungenen Leitschaufeln und einem feststehenden Innenrohr. Um den Strömungswiderstand zu verringern, sind an beiden Enden des Innenrohrs Kegelstümpfe montiert.

Der Kragen, auf dem das Tauchrohr aufliegt, ist zentrisch zur Symmetrieachse des Zyklons angeordnet. So kann das bestehende Zyklongewölbe ohne umfangreiche Umbauten weiterhin genutzt werden. Im Zuge der Entwicklung wurden die Statik des Tauchrohres, des Auflagerings sowie des Zyklons nachgerechnet. Das neue Tauchrohr ist mit 6 t Gewicht etwa doppelt so schwer wie sein Vorgänger. Der Stahlmantel des Zyklons verfügt jedoch über ausreichend Reserven, um das Mehrgewicht ohne weitere Verstärkungen aufzunehmen.

Da das Tauchrohr einer aggressiven Rauchgasatmosphäre ausgesetzt ist und Temperaturen von bis zu 950 °C standhalten muss, kommen als Werkstoffe nur sehr wenige hochlegierte Stähle mit großer Warm- und Zeitstandfestigkeit infrage. Die Wahl fiel auf einen hitzebeständigen Stahl mit austenitischem Gefüge (Werkstoffnummer 1.4835). Die Staubbelastung der Rauchgase, die das Tauchrohr von innen durchströmen, ist aufgrund des hohen Zyklonabscheidegrads gering. Demnach ist mit wenig Verschleiß zu rechnen. Sollte die Beanspruchung wider Erwarten höher sein, verfügt das Bauteil mit 12 mm Materialdicke über ausreichend Reserven, um

äußeren Einwirkungen über Jahre standzuhalten.

#### Fertigung und Montage

Der Wärmeeintrag in den Grundwerkstoff sollte bei der Bearbeitung austenitischer Stähle möglichst gering gehalten werden. Um eine hohe Qualität der Schweißverbindungen zu gewährleisten und die Fertigung zu erleichtern, wurde auf eine End-



Bild 3. Montagebereites Tauchrohr mit Leitapparat. Das Bauteil wurde liegend zwischengelagert. Zum Transport wurden Ösen angeschweißt.

montage vorgefertigter Segmente auf der Baustelle verzichtet. Stattdessen wurde das Bauteil unter kontrollierten Bedingungen in einer Werkstatt gefertigt. Das neue Tauchrohr wurde in einem Stück an seinen Bestimmungsort im Zyklon gehoben (Bild 3).

Der Umbau des Kessels 9 fand während der jährlichen Revisionsarbeiten im Mai 2013 statt. Das alte Tauchrohr wurde zertrennt und in Einzelteilen entfernt. Um das neue Bauteil an seinen Bestimmungsort zu bringen, wurden das Kesselhausdach sowie das Gewölbe am Zyklonaustritt geöffnet. Alle Teile wurden mit einem 350-t-Mobilkran über das 45 m hohe Kesselhaus gehoben. Der 13 t schwere Zyklondeckel konnte mitsamt feuerfesten Auskleidung in einem Stück herausgehoben werden. Anschließend wurde das Tauchrohr auf dem neu geschaffenen Auflagering positioniert.

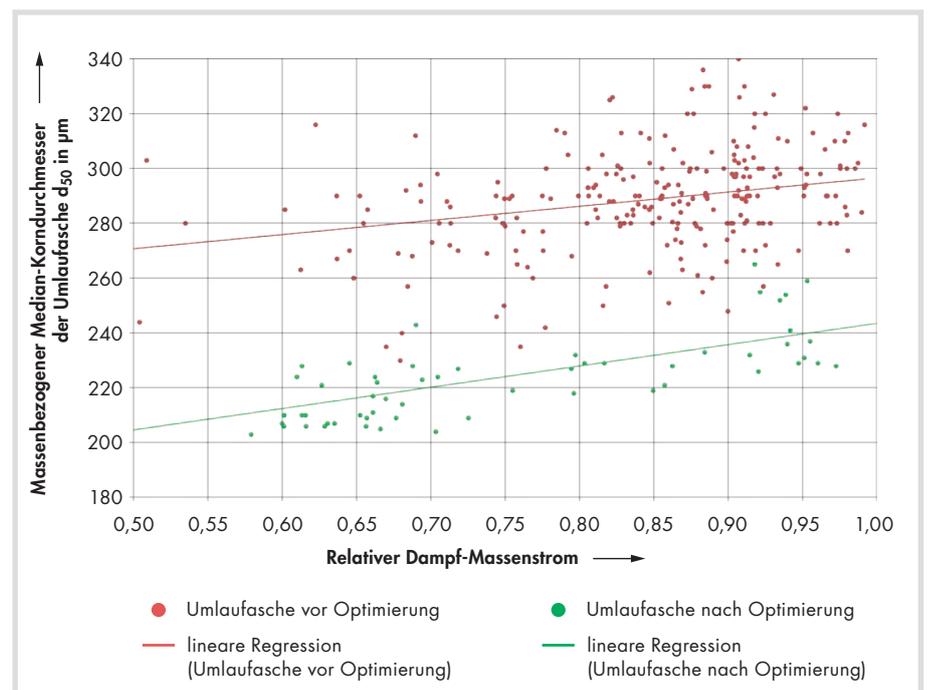


Bild 4. Massenbezogener Median-Korndurchmesser der Umlaufasche d<sub>50</sub> in Abhängigkeit vom relativen Dampf-Massenstrom vor (rot) und nach (grün) der Optimierung des Zyklonabscheiders.



Bild 5. Exzentrisches Tauchrohr am Einsatzort im Zyklon.

Im Zuge der Umbaumaßnahme wurde auch eine Schwelle im Einlaufkanal zwischen Brennkammer und Zyklon errichtet. Sie ist etwa 1.600 mm hoch und besteht aus feuerfestem Material. Die Maßnahme ist als Zusatzoption in Kombination zum neuen exzentrischen Tauchrohr zu verstehen.

### Betriebserfahrungen

Die Optimierung des Zyklonabscheiders hat zu einer Steigerung des Abscheidegrads geführt, was sich an einer veränderten Korngrößenverteilung der Umlaufasche bemerkbar macht (Bild 4). Der Median-Korndurchmesser der Umlaufasche steigt in Abhängigkeit des relativen Dampf-Massenstroms. Die Messdaten weisen eine breite Streuung auf, was unter anderem damit zu erklären ist, dass das Ascheinventar recht träge auf Laständerungen reagiert. Der Median-Korndurchmesser konnte um durchschnittlich 60 µm gesenkt werden. Damit einhergehend sinkt ebenfalls der Median-Korndurchmesser der E-Filterasche. Feine Aschebestandteile, die zuvor mit dem Rauchgasstrom ausgetragen wurden, verbleiben jetzt im Umlauf.

Dieses spiegelt sich auch in einer deutlichen Reduzierung des Quarzsandverbrauchs wider. Da weniger scharfkantiger Quarzsand eingebracht wird, ist mit geringerem Verschleiß zu rechnen. Beim Betrieb in Teillast fällt heute z.T. mehr Umlauf-

asche an als erforderlich. Um den Druckverlust über die Brennkammer konstant zu halten, wird überschüssiges Material über den Grobascheaustrag am Düsenboden ausgeschleust. Nachdem es gesiebt wurde, können umlauffähige Bestandteile entweder direkt in die Brennkammer zurückgeführt oder in einem Aschesilo gebunkert werden.

Aufgrund der qualitativen sowie quantitativen Steigerung des Umlaufmaterials wurde die Wärmeübertragung in der Brennkammer und im Fließbettkühler verbessert. Es stellt sich eine Verbrennungstemperatur um 900 °C ein. Die thermische Belastung der Nachschaltheizflächen ist ebenfalls gesunken, was sich durch eine deutliche Reduzierung der Einspritzwassermengen bemerkbar macht. Nach dem Umbau kann der Kessel 9 mit einer Dampfleistung von bis zu 145 t/h Dampf stabil betrieben werden. Bei größerer Leistung erreicht das Sekundärluftgebläse seine Belastungsgrenze, und der Aschespieß ist so weit geöffnet, dass die Anlage kaum mehr regelbar ist. Nichtsdestotrotz konnte in einem Versuch der Dampferzeuger wieder unter Volllast mit 150 t/h Dampfleistung betrieben werden.

Während eines kurzen Stillstands fand im Herbst 2013 eine Inspektion des neuen Tauchrohrs statt (Bild 5). Das Bauteil war zu diesem Zeitpunkt seit 3.500 h in Betrieb. Wie zu erwarten, befand es sich in einem guten Zustand. Es waren weder Verschleiß noch Deformierungen auszumachen. Durch die Anlagenoptimierung ergibt sich eine Kostenersparnis in zweierlei Hinsicht. Zum einen sinken die Beschaffungskosten, weil weniger Quarzsand zugeführt wird. Zum anderen sinken die Entsorgungskosten, weil auch weniger E-Filterasche abgeführt wird. Daher amortisiert sich die Investitionsmaßnahme zur Optimierung des Zyklonabscheiders binnen weniger Jahre.

### Zusammenfassung

Im Kessel 9 wurden ein exzentrisches Tauchrohr mit Leitapparat sowie eine Schwelle im Einlaufkanal verbaut. Durch die Optimierungsmaßnahme konnte der Abscheidegrad des Zyklons gesteigert werden. Der Median-Korndurchmesser der Umlaufasche ist um durchschnittlich 60 µm gesunken. Aufgrund der qualitativen sowie quantitativen Steigerung des

Umlaufmaterials wurde die Wärmeübertragung in Brennkammer und Fließbettkühler verbessert. Es stellt sich eine Verbrennungstemperatur um 900 °C ein. Die Anlage verhält sich bis zu einer Dampfleistung von etwa 145 t/h stabil. Unter Volllast (150 t/h) ist das Regelverhalten eingeschränkt. Da weniger Quarzsand benötigt wird und auch weniger E-Filterasche anfällt, werden die Investitionsausgaben binnen weniger Jahre wieder eingebracht. Aufgrund der positiven Erfahrungen mit Kessel 9, wird Kessel 10 in diesem Jahr ebenfalls umgebaut. Zudem besteht der Gedanke, auch Kessel 11 umzubauen.

### Literatur

- [1] Nies, Michael, Niemeyer, Peter; Röper, Bernhard, Werther, Joachim, und Müller, Ludwig: Status and future prospects of fluidized bed firing systems in Germany, in: VGB PowerTech 92 (2012), Heft 12, S. 62-69.
- [2] Roschek, Dirk, und Ipsen, Christoph: Experiences with the availability, maintenance and cost-effectiveness of three coal-fired CFB boilers in a combined heat and power plant after four years of RDF co-combustion, in: VGB PowerTech 91 (2011), Heft 11. S. 70-73.
- [3] Horn, Markus, Roschek, Dirk, und Ipsen, Christoph: Entwicklungen und Betriebserfahrungen mit keramischen Rohrwand-schutzsystemen in der Wirbelschicht, in: VGB PowerTech 93 (2013), Heft 1/2, S. 75-79.
- [4] Muschelknautz, Ulrich: Cyclones for the precipitation of solid particles, in: VDI Heat Atlas (2010), 2nd English edition, Berlin: Springer, Chapter Lcd 1-12.
- [5] Trefz, Michael: Die verschiedenen Abscheidvorgänge im höher und hoch beladenen Gaszyklon unter besonderer Berücksichtigung der Sekundärströmung, VDI-Forschungs-Berichte (1992), Düsseldorf: VDI-Verlag, Reihe 3, Nr. 295.
- [6] Muschelknautz, Ulrich, und Muschelknautz, Edgar: Separation efficiency of recirculating cyclones in circulating fluidized bed combustions, in: VGB PowerTech 79 (1999), Heft 4, S. 48-53.
- [7] Greif, Volker: Reduzierung des Druckverlustes von Zyklonabscheidern durch Rückgewinnung der Drallenergie und Erweiterung der Grenzbelastungstheorie auf kleine und kleinste Staubbelastungen. VDI-Forschungs-Berichte (1996), Düsseldorf: VDI-Verlag, Reihe 3, Nr. 470.
- [8] Muschelknautz, Edgar, und Greif, Volker: Cyclones and other gas-solids separators, in: Circulating fluidized beds (1997). Weinheim: Blackie Acad. & Profess., Ed.: Grace, John, Avidan, Amos, and Knowlton, Ted. |



# VGB | P O W E R T E C H

International Journal for Electricity and Heat Generation



Please copy >>> fill in and return by mail or fax

Yes, I would like order a subscription of VGB PowerTech.

The current price is Euro 275.- plus postage and VAT.

Unless terminated with a notice period of one month to the end of the year, this subscription will be extended for a further year in each case.

\_\_\_\_\_  
Name, First Name

\_\_\_\_\_  
Street

\_\_\_\_\_  
Postal Code                      City                      Country

\_\_\_\_\_  
Phone/Fax

\_\_\_\_\_  
Date                      1st Signature

Cancellation: This order may be cancelled within 14 days. A notice must be sent to VGB PowerTech Service GmbH within this period. The deadline will be observed by due mailing. I agree to the terms with my 2nd signature.

\_\_\_\_\_  
Date                      2nd Signature

Return by fax to

VGB PowerTech Service GmbH  
Fax No. +49 201 8128-302

or access our on-line shop at [www.vgb.org](http://www.vgb.org) | MEDIA | SHOP.

# VGB-PowerTech-DVD

Mehr als 12.000 Seiten Daten, Fakten und Kompetenz  
aus der internationalen Fachzeitschrift VGB PowerTech  
(einschließlich Recherchefunktion über alle Dokumente)



## Bitte kopieren, ausfüllen und per Post oder Fax zusenden

Ich möchte die VGB-PowerTech-DVD 1990 bis 2013  
(Einzelpplatzversion) bestellen.

- Euro 950.-\* (Abonnent des VGB PowerTech Journal) <sup>1</sup>
- Euro 1950.-\* (Kein Abonnent des VGB PowerTech Journal) <sup>2</sup>
- Netzwerklizenz (Corporate License), VGB-Mitglieder-  
version (InfoExpert) sowie Lizenz Forschung und Lehre  
auf Anfrage (Tel. +49 201 8128-200).

\* Zuzüglich MwSt.

Jährliches Update: 1150,- Euro; 2350,- Euro  
Das Update muss jährlich bestellt werden.

Per Fax oder im Fensterkuvert an die  
VGB PowerTech Service GmbH  
Fax-Nr. +49 201 8128-329

Name, Vorname

Straße

PLZ

Ort

Land

Telefon/Fax

Datum 1. Unterschrift

Widerrufsrecht: Diese Vereinbarung kann ich innerhalb von 14 Tagen bei der  
VGB PowerTech Service GmbH, Essen, widerrufen. Zur Wahrung der Frist  
genügt die rechtzeitige Absendung.

Ich bestätige dies durch meine 2. Unterschrift.

Datum 2. Unterschrift