



Dr. rer. nat.
U. Muschelknautz
MK ENGINEERING
Entstaubungstechnik,
Stuttgart.



Professor Dr.-Ing.
E. Muschelknautz
MK ENGINEERING
Entstaubungstechnik,
Stuttgart.

Einführung

Bild 1 zeigt beispielhaft eine Anordnung zur Verbrennung von Kohle mit zirkulierenden Wirbelschichtfeuerungen (ZWSF): Im Brennraum wird unten der größte Teil der Verbrennungsluft am Boden so zugeführt, daß sich mit der relativ grob vorgemahlene Kohle, dem sehr feinkörnigen Kalk sowie dem aus den Zyklonen zurückgeführten Feststoff eine stabile Wirbelschicht von geringer Höhe bildet. Aus dieser strömt eine Mischung von Luft und Rauchgas mit Geschwindigkeiten von 5 bis 10 m/s nach oben, die eine Feststoffbeladung von

$$\mu = \frac{\dot{M}_S}{\dot{M}_{\text{Gas}}} = 1 \dots 20 \frac{\text{kg/s Feststoff}}{\text{kg/s Gas}} \quad (1)$$

zu den seitlich unmittelbar angehängten Zyklonen mit sich führt. Der umlaufende Feststoff besteht zum größten Teil aus unverbrennbarer Asche, gemischt mit einem kleinen Teil unverbrannter Kohle und einer geringen Menge Kalk. Seine Körnung liegt zwischen $d_{\text{min}} \approx 5 \mu\text{m}$ und $d_{\text{max}} \approx 500 \mu\text{m}$. Die Temperatur im Bett liegt bei nur rund 850°C , der optimalen Reaktionstemperatur für die im Bett stattfindende Entschwefelungsreaktion. Bei dieser Temperatur läuft die Verbrennung zwar langsam, aber stabil. Die Verbrennung ist erst nach vielfachem Umlauf abgeschlossen. Der Druck beträgt üblicherweise rund 1 bar.

Die Wärmeentnahme erfolgt je nach Kraftwerkstyp verschieden; in den wichtigsten Grundtypen entweder

- durch Strahlung an die Brennkammerwand oder an entsprechende Schottheizflächen im oberen Brennkammerteil (Prinzip von Lurgi und Ahlström/Pyropower) oder
- in einem externen Fließbettkühler (siehe Bild 1), wo ein Großteil des Aschestromes deutlich unter 850°C zurückgekühlt wird (Prinzip von Lurgi), oder

Abscheideleistung von Rückführzyklonen in Wirbelschichtfeuerungen

Von U. Muschelknautz und E. Muschelknautz

— durch Kühlung des gesamten Aschestromes an Heizflächen oberhalb der Brennkammer auf Temperaturen unter 500°C (Circofluid-System nach Babcock).

Der Massenstrom und die Körnung des zirkulierenden Feststoffs in einer ZWSF-Anlage bestimmen stark die Wärmeentnahme sowie die chemischen Reaktionen im Kessel. Der Massenfluß muß groß genug und die Körnung ausreichend fein sein, um einen optimalen Kesselbetrieb zu erreichen. Beide Größen hängen stark von der Zyklonabscheideleistung ab.

Schon kleine Einbußen im Abscheidegrad der Zyklone unter 1 % führen zu einer unzureichenden Menge an Inertmaterial als Wärmespeicher im Kessel. Dies führt zu einer ineffizienten Wärmeentnahme. Andere Folgen sind Verluste an brennbarem Material oder ein instabiler Anlagenbetrieb, insbesondere im Hinblick auf die Brennraumtemperatur.

In vielen Anlagen wird das fehlende Inertmaterial durch die Zugabe von großen Mengen Sand ersetzt, was hohe Kosten und zusätzliche Erosionsprobleme verursacht.

Während der letzten Jahre wurde der Abscheidegrad von Zyklonen in mehreren großen ZWSF-Kraftwerken durch kleine Änderungen der Zyklongeometrie verbessert [1 bis 4]. Im vorliegenden Beitrag werden diese Maßnahmen vorgestellt. Ferner wird der Zusammenhang zwischen einer Zyklonoptimierung und deren Wirkung auf den Haushalt der umlaufenden Asche quantitativ abgeschätzt und damit die aus den umgebauten Großanlagen gewonnenen Ergebnisse verständlich gemacht. Daraus wird die enorme Bedeutung einer optimalen Zyklonleistung für den Anlagenbetrieb ersichtlich.

Maßnahmen zur Verbesserung von Rückführzyklonen

Beschleunigung von Teilchen im Eintrittskanal

Die Rückführzyklone der zirkulierenden Wirbelschichten sind immer in unmittelbarer Nachbarschaft zum Brennraum angeordnet. Daher sind

die Übergangskanäle zwischen Brennraum und Zyklon meistens kurz mit typischen Längen zwischen 2 und 4 m. Diese Länge genügt normalerweise nicht, um den Feststoff auf die Gasgeschwindigkeit v_e am Ende des Kanals zu beschleunigen, die gewöhnlich bei 20 bis 25 m/s liegt. Rechnungen, die auf der Theorie der pneumatischen Förderung beruhen [1, 5 und 6], sowie Messungen in industriellen Anlagen (siehe auch Bild 3 und [7]) und in Versuchsanlagen [8] zeigen, daß die Feststoffgeschwindigkeit am Kanalende c_e typischerweise $(0,5 \text{ bis } 0,8) \cdot v_e$ ist. Wenn c_e deutlich kleiner als v_e ist, so kommt es zu einem raschen Impulsaustausch zwischen Feststoff und Gas im Zycloneintrittsbereich. Am Ende des Eintrittsbereiches haben Feststoff und Gas dieselbe Geschwindigkeit. Dies wirkt sich in einer deutlichen Verzögerung der Gasströmung im Zycloneintrittsbereich aus – der in den Zyklon eintretende Gasstrom breitet sich somit aus.

Bild 2 zeigt als dimensionslose Graphen die berechneten Partikel- und Gas-Geschwindigkeitskurven $c(l)$ und $v(l)$ für einen Kanal mit konstantem Querschnitt für $d_{50} = 50 \mu\text{m}$ und $\mu = 5$ sowie für die Gasdichte $\rho_{\text{Gas}} = 0,32$

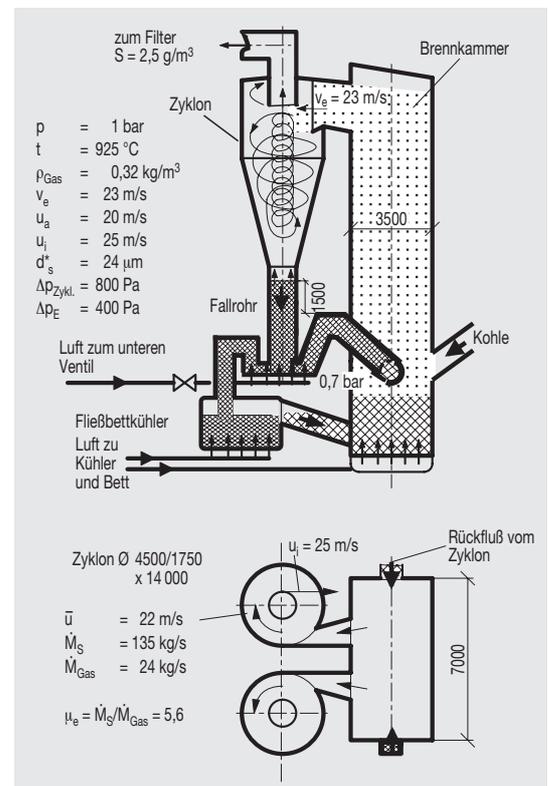


Bild 1. Zirkulierende Wirbelschichtfeuerung. (Längenangaben in mm)

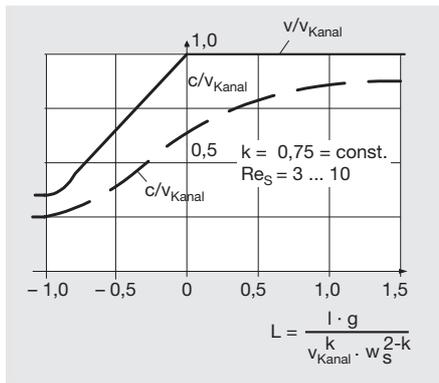


Bild 2. Beispiel für dimensionslose Graphen der Geschwindigkeit von Gas und Teilchen vor ($L < 0$) und im ($L > 0$) Eintrittskanal eines Rückführzyklons.

kg/m^3 und die Gasviskosität $\eta_{\text{Gas}} = 45 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$. Die Gasgeschwindigkeit im Kanal ist $v_{\text{Kanal}} = 22 \text{ m/s}$, und $L = 1$ entspricht der Länge $l = 2,2 \text{ m}$.

Eine genauere Rechnung berücksichtigt die in Messungen [7] festgestellte Abnahme der Beladung μ und der mittleren Korngröße d_{50} sowie die Zunahme der Gas- und Teilchengeschwindigkeiten v und c mit zunehmender Höhe über dem Kanalboden (Bild 3). Näheres hierzu siehe [1].

Grenzschicht am Tauchrohr

Die Strömung um das Tauchrohr herum ist laminar aufgrund der sehr stabilen Schichtung der Grenzschicht. Diese Schicht wird nicht durch Impulsaustausch mit der äußeren rotierenden Strömung angetrieben. Die Grenzschichtströmung macht etwa 5 bis 10% der Hauptströmung im Zyklon aus. Sie kommt von der Zyklondecke her als Sekundärströmung, enthält 10 bis 20 g/m^3 Staub, bewegt sich in steilen Spiralen zum Tauchrohr hin und wird dort nach unten umgelenkt. Auf ihrem Weg entlang der Tauchrohraußenwand nach unten wird die Grenzschicht deutlich dicker bei Winkeln zwischen 150 und 290°, gemessen vom Ende des Zykloneintrittskanals [9, 10].

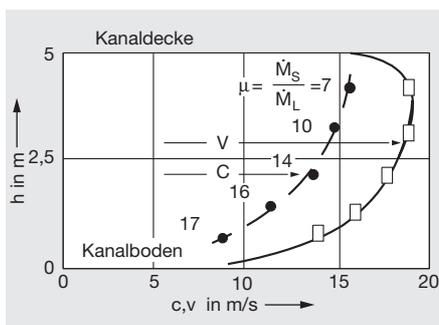


Bild 3. Gemessene Gas- und Teilchengeschwindigkeiten in einem kurzen Eintrittskanal ($1,35 \text{ m} \times 5 \text{ m}$) eines Rückführzyklons (Bayer, 1985).

Dieses Verhalten der Grenzschicht hat seinen Grund darin, daß der in den Zyklon eintretende Gasstrahl als eine schwere Störung der rotierenden Gasströmung wirkt, was zu einer unsymmetrischen Verteilung der Grenzschicht um das Tauchrohr herum führt.

Verbesserungen

Exzentrische Positionierung des Tauchrohres

M. Trefz versuchte, die stark unsymmetrische Strömung der Grenzschicht um das Tauchrohr herum durch exzentrisches Verschieben des Tauchrohres zu verbessern (Bild 4, b) [9, 10]. Dann verlaufen alle Stromlinien der Grenzschicht um das Tauchrohr herum mehr oder weniger parallel und schräg nach unten (Bild 5, b), d.h., die Strömung hat immer eine Tangentialkomponente, im Gegensatz zur Anordnung mit zentrischem Tauchrohr, siehe Bild 4a) und 5a). Die Stromlinien in Bild 5 wurden mit Tuschetropfen, die auf die Tauchrohr-Außenwand aufgegeben wurden, sichtbar gemacht. Die exzentrische Positionierung des Tauchrohres verhindert somit eine Ablösung der Strömung (Bild 4) und verbessert so die Abscheideleistung des Zyklons.

Spezielle Form des Eintrittskanals

Die positive Wirkung einer exzentrischen Verschiebung des Tauchrohres kann teilweise auch durch die Wahl einer speziellen Form des Eintrittskanals erreicht werden: Durch einen flachen und breiten Anfangsquerschnitt, einen in Strömungsrichtung etwa 30° abwärts geneigten Kanalboden und einen hohen und schmalen Querschnitt am Kanalende mit einem Höhe-zu-Breite-Verhältnis von $a:b \approx 3:1$ bis $4:1$ wird die Feststoffgeschwindigkeit am Kanalende um 20 bis 30% erhöht, ohne dabei die Gasgeschwindigkeit am Kanalende steigern zu müssen. Diese Wirkung wird erzielt durch eine starke Beschleunigung des Feststoffs am Kanal Anfang, so daß dieser am Kanalende die dortige Gasgeschwindigkeit erreicht. Die Gasgeschwindigkeit wird längs des Kanals von anfangs etwa 20 auf 15 m/s am Kanalende verzögert. Der verzögerte Gasstrom bleibt stabil und löst von der Kanalwand nicht ab. Ablagerungen am Kanalboden werden vermieden.

Messungen in einer Versuchsanlage

Im Jahre 1996 wurden im Wirbelschicht-Kraftwerk der Stadtwerke Wuppertal Modellversuche durchgeführt mit dem Ziel, die Auswir-

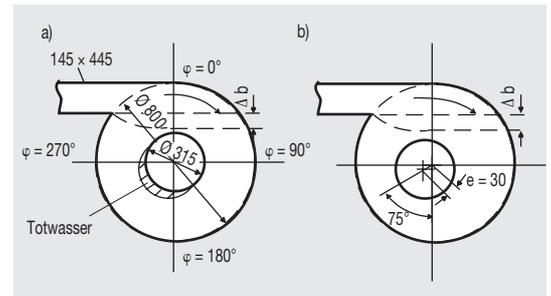


Bild 4. Zyklon mit a) zentrischem und b) exzentrischem Tauchrohr.

kung der exzentrischen Tauchrohranordnung auf den Zyklonabscheidegrad zu messen.

Versuchsaufbau

Der Versuchszyklon, ein Plexiglas-Modell eines Zyklons des Wuppertaler Kraftwerks im Maßstab 1:7,5, hat einen Durchmesser von 610 mm und wird mit kalter Luft (20°C) betrieben. Zur Nachbildung der physikalischen Verhältnisse im Großzyklon wird die Gasgeschwindigkeit im Eintrittskanal regelbar mit 4 bis 6 m/s und die Körnung des Versuchsstaubes (= Quarzsand) mit $d_{50} = 40 \mu\text{m}$ so gewählt, daß die Froude-Zahl $F^* = v \cdot w_s^2 - k / (D \cdot g)$ für die Großanlage und für den Modellzyklon übereinstimmen. Die Froude-Zahl wird mit den Variablen v = Gasgeschwindigkeit, w_s = Sinkgeschwindigkeit eines Teilchens, D = typische Kanalbreite und der Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ gebildet. Der Exponent k hat, abhängig von der Teilchen-Reynolds-Zahl, Werte zwischen 0,5 und 1. Die Zufuhr des Feststoffs erfolgt regelbar mit einem Schieber vor dem Auslaß eines Silos, von wo aus der Feststoff über eine horizontale Rampe mit Druckluft in den Eintrittskanal des Zyklons gefördert wird. Dadurch wird für einen horizontal gerichteten Feststoffstrom am Beginn des Eintrittskanals gesorgt, wie er auch in der Großanlage erfolgt. Die Staubbelastung μ (kg/s Staub je kg/s Luft) des Rohgasstromes wird zwischen 0,5 und rund 12 variiert. In der Großanlage ist die Staubbelastung des Rauchgasstromes in den Zyklon $\mu \approx 7$.

Das exzentrisch verschiebbare Tauchrohr hat den Durchmesser 230 mm und die Länge 185 mm. Die beiden in den Versuchen eingesetzten Krägen um das Tauchrohr herum

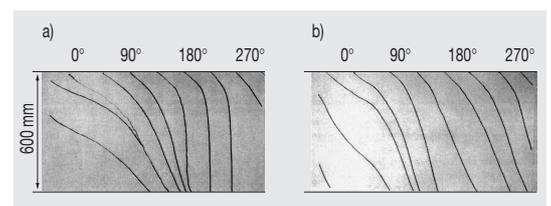


Bild 5. Mit Tuschetropfen sichtbar gemachte Stromlinien der Grenzschicht auf der Tauchrohraußenwand des Zyklons in Bild 4 im Winkelbereich 0 bis 360° für a) zentrisches und b) exzentrisches Tauchrohr.

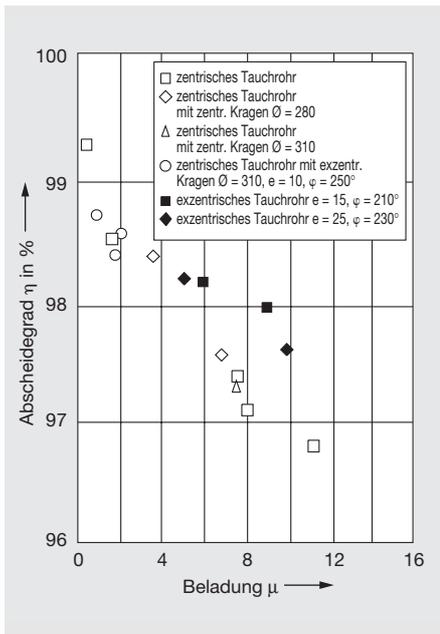


Bild 6. Abscheidegradmessung im Versuchszyklon bei den Wuppertaler Stadtwerken für verschiedene Tauchrohranordnungen (1996).
 Zyklon Ø = 610 mm
 Tauchrohr Ø = 230 mm

haben einen Durchmesser von 280 bzw. 310 mm und eine Höhe von 70 mm.

V Versuchsergebnisse

In Bild 6 ist der gemessene Abscheidegrad η des Zyklons in Abhängigkeit von der Staubbelastung μ für verschiedene Tauchrohranordnungen gezeigt:

Durch die *exzentrische* Anordnung des Tauchrohres (schwarze Symbole) mit einer exzentrischen Verschiebung e = 15 bzw. 25 mm und einem Verschiebungswinkel von 210 bzw. 230° (gemessen vom Ende des Einlaufkanals) wird der Abscheidegrad bei höheren Beladungen zwischen etwa 5 und 10 um etwa 0,3 bis 1 % gegenüber der zentrischen Tauchrohranordnung (weiße Symbole) verbessert.

Bei einem *zentrischen* Tauchrohr bewirkt offenbar weder ein zentrisch noch ein exzentrisch um das Tauchrohr herum angebrachter Kragen eine Abscheidegradverbesserung.

Einsatz in Großkraftwerken

Zyklonoptimierungen entsprechend den vorstehenden Ausführungen wurden bisher in acht großen Wirbelschichtfeuerungen mit thermischen Leistungen zwischen 55 und 550 MW vorgenommen. Im folgenden werden die Umbaumaßnahmen und ihre Wirkung in den einzelnen Anlagen vorgestellt. In den Tafeln 1 und 2 sind sie nochmals mit ergänzenden Angaben übersichtlich zusammengefaßt.

Kraftwerk der Energieversorgung Offenbach /Anlage DE 11

Umbaumaßnahmen:

- Zykloneintrittsbereich: Schwelle im Kanal, Kanalverlängerung, Änderung des Bodens der Eintrittsspirale,
- Zyklontauchrohr: exzentrische Verschiebung und Verengung, Einsatz eines Tauchrohr-Leitapparates zur Druckverlustreduzierung,
- Zyklonkonus und Fallrohr: Abschirmkegel über Produktauslaß; Eindüsung von Druckluft in das Fallrohr, um den angestiegenen Umlaufasche-Mengenstrom durchzusetzen.

Kraftwerk der Energieversorgung Offenbach /Anlage DE 12

Umbaumaßnahmen: Wie im DE 11, aber ohne die Umbaumaßnahmen im Zykloneintrittsbereich.

Ergebnisse

In beiden Anlagen (DE 11 und DE 12) stellte sich nach dem Umbau ein stabileres Anlagenverhalten ein: Nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes waren keine Eingriffe zur Istwert-Korrektur der Betttemperatur mehr erforderlich. Diese bewegt sich in einem

schmalen Band von 5 bis 10 °C. Bei konstanter Last ist keine Zyklonasche-Rückführung mehr notwendig.

Diese Verbesserungen sind die Folge eines deutlichen Anstiegs des Ascheumlafs. Wie die Bilder 7 und 8 zeigen, weisen die gemessenen Körnungskurven der Zyklon- und Filterasche deutlich geringere Streuungen auf als vor dem Umbau. Der Zyklon trennt somit deutlich schärfer als vor dem Umbau und hat insgesamt einen höheren Abscheidegrad.

Der Körnungsverlauf mit dem mittleren Korn bei rund 100 µm für die Zyklonasche und bei etwa 25 µm für die Filterasche hat sich dagegen nur wenig geändert.

Die thermischen Wirkungsgrade beider Kessel sind um 2 bis 3 % gestiegen. Hierbei sind nach Angaben des Kraftwerks 1 bis 2 % auf die Zyklonoptimierung und 1 bis 2 % auf den Einsatz von Schallhörnern im 1. und 2. Zug zurückzuführen.

Unterschiede zwischen DE 11 und DE 12

Die Körnung der Zyklonasche in DE 11 ist etwas feiner (d₅₀ = 95 µm) als in DE 12 (d₅₀ = 110 µm). Vor dem Umbau waren die Verhältnisse umgekehrt (Bilder 7 und 8). Ferner wurde beobachtet, daß die Bettasche von DE 11 einen erheblich größeren Anteil

Tafel 1. In vier Großanlagen durchgeführte Zyklonverbesserungen und ihre Auswirkungen auf den Anlagenbetrieb.

Die mit ¹ gekennzeichneten Werte sind berechnet, alle anderen gemessen.

Kraftwerk	Energieversorgung Offenbach		Rheinbraun Berrenrath	Rheinbraun Wachtberg
	DE 11	DE 12		
technische Daten				
Dampfleistung t/h	110	110	250	175
Brennstoff	Steinkohle	Steinkohle	Braunkohle	Braunkohle
Anzahl der Zyklone	2	2	2	2
Zyklondurchmesser mm	3120	3120	6290	5330
Umbaumaßnahmen	Tauchrohr exzentr. verschoben, verengt und verkürzt; Druckluftzufuhr in Fallrohr; Schwelle in Kanal- und Einlaufspiralboden; Kanalverlängerung	Tauchrohr exzentr. verschoben, verengt und verkürzt; Druckluftzufuhr in Fallrohr;	Tauchrohr exzentr. verschoben und verlängert	Tauchrohr unten exzentrisch eingezogen und verengt und verlängert
Tauchrohr-Ø mm	1704 → 1450	1704 → 1450	2830 → 2480	2200 → 1900
Exz.-Verschiebung mm	0 → 40	0 → 40	0 → 150	0 → 200
Verschiebungswinkel °	240	240	230	230
Tauchrohrlänge mm	2900 → 2600	2900 → 2600	830 → 1670	600 → 1000
Wirkung				
Beladung Umlaufasche	1,6 → (2 ... 3) ¹	1,6 → (2 ... 3) ¹	9 → (12 ... 15) ¹	8 → (11 ... 14) ¹
Sand- bzw. Aschezufuhr t/h	auf 0 reduziert	auf 0 reduziert	20 → 8	(10 .. 15) → 2
d ₅₀ -Umlaufasche µm	110 ± 40 → 95 ± 25	100 ± 50 → 110 ± 25	160 → (140 ... 150) ¹	175 → (150 ... 160) ¹
Anlagenbetrieb	stabileres Anlagenverhalten, keine Ascherückführung zur Regelung der Betttemperatur mehr notwendig, Anlagenwirkungsgrad gestiegen		stabileres Anlagenverhalten mit drastisch reduzierter Sandzufuhr	stabileres Anlagenverhalten mit drastisch reduzierter Sandzufuhr

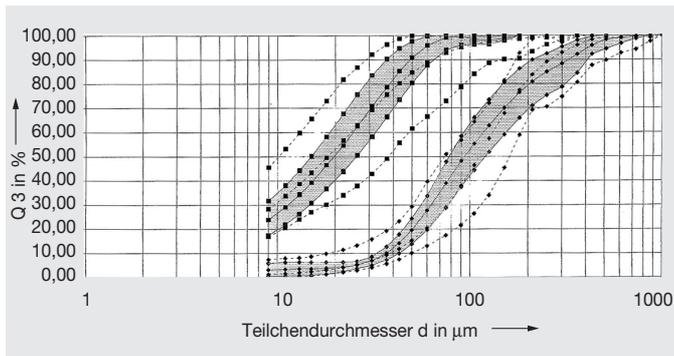


Bild 7. Kraftwerk EVO/Kessel DE 11/Filter- und Zyklonaschekörnungsbänder vor (gestrichelte Kurven) und nach (durchgezogene Kurven in punktierten Bereichen) Zyklonumbau.

Meßpunkte Filterasche: ■
Meßpunkte Zyklonasche: ◆

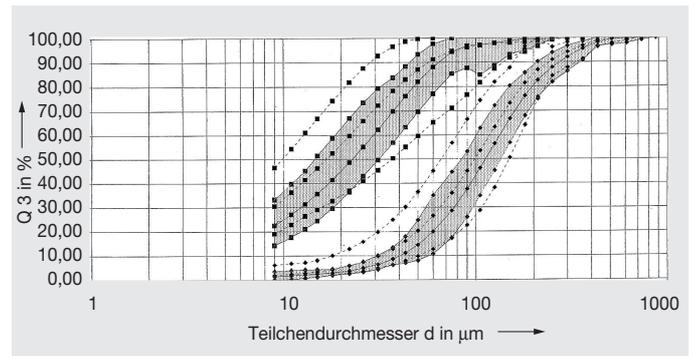


Bild 8. Kraftwerk EVO/Kessel DE 12/Filter- und Zyklonaschekörnungsbänder vor (gestrichelte Kurven) und nach (durchgezogene Kurven in punktierten Bereichen) Zyklonumbau.

Meßpunkte Filterasche: ■
Meßpunkte Zyklonasche: ◆

an Zyklonasche als die Bettasche von DE 12 bei sonst gleichen Betriebsbedingungen enthält, was auf einen größeren Ascheumlauf im DE 11 schließen läßt.

Schlußfolgerungen

- Das exzentrische und verengte Tauchrohr bewirkt eine Abscheidegraderhöhung mit der Folge einer deutlichen Erhöhung der Ascheumlaufmenge.
- Da beide Anlagen DE 11 und DE 12 bis auf die Zykloneintrittsbereiche identisch sind und mit derselben Kohle bei gleichen Betriebsdaten gefahren werden, folgt aus dem Unterschied hinsichtlich der Ascheumlaufmenge und -körnung, daß die Zyklone von DE 11 besser abscheiden als die von DE 12. Die bessere Abscheidung der Zyklone von DE 11 ist auf die zusätzlichen Umbaumaßnahmen im Eintrittsbereich der Zyklone (Kanal, Boden der Eintrittsspirale) zurückzuführen.

Kraftwerk Berrenrath/Rheinbraun

Umbaumaßnahmen: Tauchrohr exzentrisch verschoben, verengt und verlängert.

Ergebnisse

Die Sandzufuhr wurde um 60 % von 20 t/Tag auf 8 t/Tag reduziert. Andere Meßdaten liegen nicht vor.

Schlußfolgerungen

Die exzentrische Tauchrohranordnung mit Verengung hat zu einem höheren Abscheidegrad geführt, der sich in einem Anstieg der Umlaufaschemenge und, daraus resultierend, in einer Einsparung von Sand bemerkbar gemacht hat.

Kraftwerk Wachtberg/Rheinbraun

Umbaumaßnahmen: Tauchrohr unten exzentrisch eingezogen, verengt und verlängert.

Ergebnisse

Die Sandzufuhr wurde von 10 bis 15 t/Tag auf unter 2 t/Tag reduziert. Andere Meßdaten liegen nicht vor.

Schlußfolgerungen

Wie im Kraftwerk Berrenrath.

Kraftwerk Gardanne/
Electricité de France

Umbaumaßnahmen: Tauchrohr unten exzentrisch eingezogen, verengt und verlängert.

Ergebnisse

Die Umlaufaschebeladung ist um rund 30 % von 15 auf 20 gestiegen. Das ergibt sich aus

Druckverlustmessungen im oberen Brennraum. Eine Absenkung des mittleren Korndurchmessers d_{50} der Umlaufasche von 200 bis 220 μm auf 175 μm wurde gemessen.

Die Wärmeübertragung an die Heizflächen wurde deutlich verbessert, ist aber noch nicht ausreichend. Es sollte zusätzlich noch einmal die gleiche Verbesserung erzielt werden.

Der Anlagenbetrieb wurde stabiler: Die Fließbettkühler werden jetzt mit der optima-

Tafel 2. In vier Großanlagen durchgeführte Zyklonverbesserungen und ihre Auswirkungen auf den Anlagenbetrieb.

Die mit ¹ gekennzeichneten Werte sind berechnet, alle anderen gemessen. Der mit ² gekennzeichnete Wert entspricht der gemessenen Absenkung der Freiraumtemperatur.

Kraftwerk	Gardanne	Goldenberg DE K	Goldenberg DE J	Wuppertal
technische Daten				
Dampfleistung t/h	750	400	290	170
Brennstoff	Örtlicher Lignit	Braunkohle	Braunkohle	Steinkohle
Anzahl der Zyklone	4	4	4	2
Zyklondurchmesser mm	7400	5500	3710	4580
Umbaumaßnahmen	Tauchrohr unten exzentrisch eingezogen und verengt und verlängert	Tauchrohr unten exzentrisch eingezogen und verengt und verlängert; Schwelle im Kanal	Tauchrohr unten exzentrisch eingezogen und verengt und verkürzt	exzentrische Verschalung, keine ex. Verschiebung des Tauchrohres
Tauchrohr-Ø mm	3400 → 2900	2480 → 2100	2500 → 1950	1830
Exz.-Verschiebung mm	0 → 300	0 → 190	0 → 135	0
Verschiebungswinkel °	210	225	260	0
Tauchrohrlänge mm	500 → 1100	1440 → 2040	3510 → 3000	1400
Wirkung				
Beladung Umlaufasche	15 → 20	5,1 → 7... 8 ¹	0,9 → 1,2... 1,4 ²	5,4 → 5,4
Sandzufuhr t/Monat	schon vor Umbau = 0	800-1000 → 50-150 bei 3-3,5 % Aschegehalt 800-1000 → 0 ab 3,9 % Aschegehalt	50-150 → 0	keine Änderung
d_{50} -Umlaufasche μm	(200...220) → 175	210 → 160... 180 ¹	keine Messung	keine Änderung
Anlagenbetrieb	stabileres Anlagenverhalten besserer Wärmeübergang, Reduktion der Einspritzwassermenge	stabileres Anlagenverhalten mit drastisch reduzierter Sandzufuhr	deutlich einfachere Fahrweise, Freiraumtemperatur von 830 °C auf 780 °C abgesenkt, Sandzufuhr = 0 t/h	keine Änderung (vgl. Schlußfolgerungen zu Wuppertaler Stadtwerke)

len Aschemenge gefahren, die Einspritzwassermenge wurde stark reduziert [3, 4].

Schlußfolgerungen

Wie bei den Anlagen Berrenrath und Wachtberg. Ferner muß die Beladung der Umlaufasche noch weiter erhöht und die Körnung nochmals verfeinert werden. Dazu ist eine Kanalmodifikation wie vorstehend erläutert erforderlich.

Kraftwerk Goldenberg,
Anlage DE K/RWE

Umbaumaßnahmen: Tauchrohr unten exzentrisch eingezogen, verengt und verlängert; Einbau einer Schwelle am Kanalanfang.

Ergebnisse

Stabilerer Anlagenbetrieb als vor dem Umbau.

Sandzufuhr von 800 bis 1000 t/Monat auf 50 bis 150 t/Monat reduziert. Das gilt beim Aschegehalt der Kohle von 3 bis 3,5 %. Ab 3,9 % Aschegehalt ist keine Sandzufuhr mehr erforderlich.

Schlußfolgerungen

Wie bei den Anlagen Berrenrath, Wachtberg und Gardanne.

Kraftwerk Goldenberg,
Anlage DE J/RWE

Umbaumaßnahmen: Tauchrohr unten exzentrisch eingezogen und verengt.

Ergebnisse

Der Umlaufasche-Mengenstrom wurde deutlich erhöht, die Freiraumtemperatur um 50 °C von 830 auf 780 °C abgesenkt, was sich unter anderem positiv auf die Schwefeleinbindung auswirkt. Die Anlage kann wesentlich einfacher gefahren werden.

Die Sandzufuhr wurde von 50 bis 150 t/Monat auf 0 t/Monat reduziert. Der CO-Emissionsgrenzwert wird weiterhin problemlos eingehalten. Die neue Körnungsverteilung der Umlaufasche wurde nicht gemessen.

Schlußfolgerungen

Wie bei den Anlagen Berrenrath, Wachtberg, Gardanne und Goldenberg DE K.

Anmerkung

Beim Umbau des Zyklons war darauf zu achten, daß der Umlaufasche-Mengenstrom durch diese Änderung nicht zu stark erhöht wird, da sonst eine zur große Absenkung der Bett- und Freiraumtemperatur durch die zurückgeführte „kalte“ Asche (rund 400 °C) sowie eine zu hohe CO-Emission erfolgt wären. Die Umbaumaßnahmen waren daher sehr genau auszulegen, um den angestrebten Abscheidegrad möglichst genau zu treffen.

Kraftwerk der Wuppertaler Stadtwerke

Umbaumaßnahmen: Exzentrische Verschaltung des Tauchrohres, jedoch ohne exzentrische Verschiebung der Tauchrohrachse. Ein komplette exzentrische Verschiebung oder Einziehung unten konnte aus Zeitgründen nicht durchgeführt werden.

Ergebnisse

Keine Änderung der Körnungen, Abscheidegrad nicht gestiegen.

Schlußfolgerung

Auch hier sollten die Tauchrohre auf der gesamten Tauchrohrlänge exzentrisch verschoben und verengt werden.

Wirkung einer Zyklonoptimierung auf Mengenstrom und Körnung des umlaufenden Feststoffs

Alle relevanten Zyklondaten vor und nach Zyklonoptimierung werden auf der Basis der Zyklontheorie entsprechend [11] berechnet. Diese Theorie wurde für Feststoffbeladungen des eintretenden Gasstrahls bis $\mu = 20$, wie sie in derzeitigen industriellen ZWSF-Anlagen auftreten, erfolgreich angewendet. Bei Beladungen weit über diesem Wert fand Hugi (1997) in einer kalten Versuchsanlage einige Abweichungen zwischen Theorie und Messung, die insbesondere den Druckverlust betreffen (siehe [8]).

Bei der Berechnung des Zyklonabscheidegrades in einer ZWSF-Anlage ist es wichtig, nicht nur die Geometrie des Zyklons, sondern auch die Geometrie- und Leistungsdaten der anderen am Feststoffkreislauf beteiligten Anlagenkomponenten zu berücksichtigen: Die Fallrohr-Durchmesser müssen groß genug und die Rauchgasgebläse ausreichend stark sein, um den durch Zyklonoptimierung ansteigenden Feststoff-Massenstrom zu fördern. Andernfalls ist eine deutliche Erhöhung des Umlaufasche-Mengenstromes nicht realisierbar. Die Gas- und Feststoffgeschwindigkeiten im Zykloneintrittsbereich werden auch durch die Form des Eintrittskanals bestimmt. Zusätzlich variieren Massenstrom und Geschwindigkeiten der Teilchen über die Kanalhöhe. Beides wird in Computerprogrammen berücksichtigt (siehe [2]).

Für den Kraftwerksbetreiber ist es von großem Vorteil, wenn er Anhaltzahlen dafür erhält, wie sich ein Zyklonumbau quantitativ auf den Anlagenbetrieb, d.h. zunächst auf den Mengenstrom der Umlaufasche sowie auf deren Korngrößenverteilung auswirken wird.

Dann können die nach dem Umbau zu erwartenden Betriebsdaten, wie z.B. thermodynamische Bedingungen und Emissionswerte, abgeschätzt werden.

Die in den Versuchen sowie in den Großanlagen durch Zyklonumbau erzielten Ergebnisse zeigen zwar klar die Verbesserung der damit erreichten Zyklonabscheidung und deren deutlichen Einfluß auf den Aschehaushalt der Anlage (Tafeln 1 und 2), sie lassen aber nur sehr grobe Schätzungen hinsichtlich der Quantität der Auswirkungen zu. Die folgende einfache Überlegung zeigt, daß man auf der Basis von Massenstrombilanzen zu einem quantitativen Verständnis gelangen kann: Brennraum, Eintrittskanäle, Zyklone und Ascherückführleitungen bilden zusammen einen Kreislauf für den zirkulierenden Feststoff. Dieser Kreislauf wird von außen mit Inertmaterial, d.h. unverbrennbarem Feststoff wie Kohleasche und Sand, gespeist. Auch wird ihm Inertmaterial in Form von Bettasche, Zyklon- oder Filterasche entnommen. Der gesamte zugeführte und der gesamte abgezogene Feststoff-Massenstrom müssen im Gleichgewichtszustand der Anlage gleich groß sein. Andernfalls würde der Kessel entweder leer- oder vollaufen.

Die Konsequenzen dieser Überlegung werden anhand eines einfachen Beispiels deutlich:

Kohlezufuhr: $\dot{M}_{\text{Kohle}} = 100 \text{ t/h}$

Aschegehalt in der Kohle: 3 %,
somit Aschezufuhr
mit der Kohle $\dot{M}_A = 3 \text{ t/h}$

Zufuhr von Inertmaterial
(Sand, Zyklon-
oder Filterasche) $\dot{M}_{\text{Inj}} = 0 \text{ t/h}$

Bettascheabzug $\dot{M}_B = 1 \text{ t/h}$

Zyklonabscheidegrad $\eta = 99,4 \%$

Da der gesamte zugeführte und der gesamte abgezogene Feststoffmassenstrom gleich groß sein müssen, folgt für die Emission

$$\dot{M}_{\text{Em}} = \dot{M}_A + \dot{M}_{\text{Inj}} - \dot{M}_B = (3 + 0 - 1) \text{ t/h} = 2 \text{ t/h} \quad (2)$$

Dann ist der Massenstrom der umlaufenden Asche

$$\dot{M}_{\text{Uml}} = \frac{\dot{M}_{\text{Em}}}{1 - \eta/100} = 333 \text{ t/h} \quad (3)$$

Wenn man dem Kessel 0,5 t/h Sand zuführt, d.h., $\dot{M}_{\text{Inj}} = 0,5 \text{ t/h}$, und dabei Zufuhr und Entnahme aller anderen Massenströme nicht ändert, dann steigt die Emission entsprechend (2) von 2 auf 2,5 t/h, der Massenstrom des umlaufenden Feststoffs wächst um 25 % auf

$$\dot{M}_{\text{Uml}} = \frac{2,5 \text{ t/h}}{1 - 0,994} = 417 \text{ t/h} \quad (4)$$

Derselbe Zuwachs kann erreicht werden, wenn man anstelle einer Zugabe von Sand den Zyklonabscheidegrad η von 99,40 % auf 99,52 % steigert:



$$\dot{M}_{Uml} = \frac{2 \text{ t/h}}{1 - 0,9952} = 417 \text{ t/h} \quad (5)$$

Somit hat eine Erhöhung des Zyklonabscheidegrades von 99,40 auf 99,52 % dieselbe Wirkung wie die Zugabe von 0,5 t/h oder 350 t/Monat Sand!

Das allgemeine mathematische Modell zur Berechnung des Umlaufasche-Massenstromes berücksichtigt alle möglichen dem Kreislauf zugeführten und entnommenen Feststoff-Mengenströme wie z.B. den Abzug von Zyklonasche oder die Zugabe von Kalk. Um die Körnung der umlaufenden Asche zu berechnen, werden Bilanzgleichungen für die Massenströme jeder Teilchengröße d aufgestellt, wobei an die Stelle des Gesamtabseidegrades η der Fraktionsabscheidegrad $\eta_F(d)$ tritt. Die Parametrisierung des Abriebs der zirkulierenden Teilchen wird an die gemessenen Daten vor dem Zyklonumbau angepaßt. $\eta_F(d)$ wird entsprechend E. Muschelknautz et al. [1] berechnet. Näheres siehe [12].

Schlußfolgerungen

Durch kleine Änderungen der Zyklongeometrie wurde der Betrieb von sieben ZWSF-Kraftwerken deutlich verbessert. Die Wirkung einer Zyklonoptimierung auf Mengenstrom und Körnung der umlaufenden Asche kann, basierend auf Massenstrombilanzen, der Zyklontheorie nach E. Muschelknautz et al. [11] und auf gemessenen Anlagendaten vor dem Umbau, abgeschätzt werden.

Die Ergebnisse der Arbeiten zeigen klar, daß die Abscheideleistung der Rückführzyklone in zirkulierenden Wirbelschichtfeuerungen einen entscheidenden Einfluß auf Mengenstrom und Körnung der Umlaufasche hat. Schon sehr kleine Abscheidegradverbesserungen im Bereich von Prozentbruchteilen wirken sich drastisch auf beide Größen aus! Daher muß der Zyklon zur Erreichung der angestrebten Betriebsparameter für die Umlaufasche sehr genau ausgelegt werden. Die positiven Ergebnisse von Zyklonumbauten in den großen Wirbelschichtanlagen zeigen, daß in vielen Anlagen ein großes Optimierungspotential hinsichtlich der Zyklonabscheideleistung noch nicht ausgeschöpft ist. Wird dieses Potential genutzt, so sind die Folgen eine Reduktion der Zufuhr von Fremdasche (Sand, Zyklonasche, Filterasche), eine deutliche Verbesserung der Wärmeabgabe, eine Stabilisierung des Anlagenbetriebes und andere, in der Einführung genannte Wirkungen, die alle zu erheblichen Kosteneinsparungen führen.

Danksagung

Die Arbeit wurde von der VGB-FORSCHUNGSSTIFTUNG im Rahmen des For-

schungsprojektes 163 gefördert. Hierfür sei an dieser Stelle gedankt.

Bezeichnungen		
Δb	m	Verbreiterung des Gasstrahls im Zykloneintrittsbereich
c	m/s	Teilchengeschwindigkeit
c_e	m/s	Teilchengeschwindigkeit am Kanalende
d_{50}	μm	Median-Korndurchmesser
d_{\min}	μm	minimaler Korndurchmesser
d_{\max}	μm	maximaler Korndurchmesser
d_s^*	μm	Grenzkorndurchmesser des Zyklons
D	m	typische Kanalbreite (zur Berechnung der Froude-Zahl)
e	m	exzentrische Verschiebung
F^*	–	Froude-Zahl
g	m/s^2	Erdbeschleunigung
k	–	Exponent im Ausdruck für die Sinkgeschwindigkeit
L	–	dimensionslose Weglänge entlang des Kanals
l	m	Weglänge entlang des Kanals
\dot{M}_A	t/h	in der Kohlezufuhr enthaltene Aschemenge
\dot{M}_B	t/h	Bettascheabzugsrate
\dot{M}_{Em}	t/h	Emissionsrate
\dot{M}_{Gas}	t/h	Gas-Massenstrom
\dot{M}_{Inj}	t/h	Zufuhr rate von Inertmaterial wie Sand, Zyklon- oder Filterasche aus Bunkern
\dot{M}_{Kohle}	t/h	Kohlezufuhr rate
\dot{M}_S	t/h	Feststoff-Massenstrom
\dot{M}_{Uml}	t/h	Umlaufasche-Massenstrom
p	Pa	Druck
Δp_E	Pa	Druckverlust im Kanal
Δp_{Zykl}	Pa	Zyklondruckverlust
$Q_3(d)$	%	Summenhäufigkeit
Re_s	–	Reynolds-Zahl der Teilchen
t	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur
u_a	m/s	Umfangsgeschwindigkeit am Zyklonmantel
u_i	m/s	Umfangsgeschwindigkeit unter dem Tauchrohr
\bar{u}	m/s	mittlere Umfangsgeschwindigkeit = $\sqrt{u_a \cdot u_i}$
v	m/s	Gasgeschwindigkeit
v_e	m/s	Gasgeschwindigkeit am Kanalende
v_{Kanal}	m/s	Gasgeschwindigkeit am Kanal anfang
\dot{V}	m^3/s	Gasdurchsatz
w_s	m/s	Sinkgeschwindigkeit der Teilchenwolke

φ	$^{\circ}$	Winkel der exzentrischen Verschiebung
η	%	Zyklonabscheidegrad
η_{Gas}	Pa s	Viskosität des Gases
μ	–	Beladung
ρ_{Gas}	kg/m^3	Gasdichte

Literatur

- [1] Muschelknautz, U., und Muschelknautz, E.: Abscheideleistung von Rückführzyklonen in Wirbelschichtfeuerungen. Bericht zum VGB-Forschungsprojekt 163 (1998).
- [2] Muschelknautz, U., und Muschelknautz, E.: Special design of inserts and short entrance ducts to recirculating cyclones. Proceedings of CFB V-Conference, Peking (1996).
- [3] Frydrychowski-Horvatin, J., und Vostan, P.: Auslegungsgrundlagen und erste Betriebserfahrungen mit dem weltgrößten ZWS-Kraftwerk in Gardanne, Südfrankreich. VDI-Berichte 1314 „Wirbelschichtfeuerungen: Erfahrungen und Perspektiven“, VDI-Gesellschaft Energietechnik, Berlin (1997).
- [4] Levy, D., Roulet, V., Daubert, M., und Lucat, P.: First operating period of province soprolif 250 MWe CFB boiler. 14th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion ASM, Vancouver/Canada (1997).
- [5] Muschelknautz, E., Krambrock, W., und Schlag, H.-P.: Druckverlust bei der pneumatischen Förderung. VDI-Wärmeatlas, 8. Auflage, Lh 1-16 (1997).
- [6] Muschelknautz, E., and Greif, V.: Cyclones and other gas-solids separators. Circulating Fluidized Beds, Black Academic & Professional (1996).
- [7] Muschelknautz, S., und Klug, F.: Propeller-sonde zur Betriebsmessung von Gas-Feststoff-Strömungen bei hohen Temperaturen. Tagungsbericht zur VGB-Konferenz „Wirbelschichtsysteme“, Essen (1990).
- [8] Hugi, E.: Auslegung hochbeladener Zyklonabscheider für zirkulierende Gas/Feststoff-Wirbelschicht-Reaktorsysteme. VDI-Fortschrittsberichte Reihe 3, Nr. 502 (1997).
- [9] Trefz, M.: Die verschiedenen Abscheidevorgänge im höher und hochbeladenen Zyklon unter besonderer Berücksichtigung der Sekundärströmung. VDI-Fortschrittsberichte Reihe 3, Nr. 295 (1992).
- [10] Trefz, M., and Muschelknautz, E.: Extended cyclone theory for gas flow with high solids concentration. Chem. Eng. Technol. 16 (1993), pp. 153–165.
- [11] Muschelknautz, E., and Krambrock, W.: Zyklone zur Abscheidung von Feststoffen aus Gasen. VDI-Wärmeatlas, 8. Auflage, Lja 1-11 (1997).
- [12] Muschelknautz, U., und Muschelknautz, E.: Berechnung des Zyklonabscheidegrades und von dessen Auswirkung auf den Feststoffkreislauf in einer zirkulierenden Wirbelschichtfeuerung. VDI-Berichte 1390 „Modellierung und Simulation von Dampferzeugern und Feuerungen“, VDI-Gesellschaft Energietechnik, Braunschweig (1998).