

Ein braunkohlenbasierter Kombikraftwerksprozeß (ZDWSF) –Versuchsergebnisse und -erfahrungen

H.-B. Rombrecht, H. Ristau, H. J. Krautz –
BTU Cottbus, Lehrstuhl Kraftwerkstechnik;

Kurzfassung

Moderne Braunkohlenkraftwerke besitzen einen Nettowirkungsgrad von bis zu 43 %. Erhöhte Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit und die Minderung der Kohlendioxidfreisetzung verlangen jedoch noch höhere Wirkungsgrade. Anhand von Simulationsrechnungen können bei der Zirkulierenden Druckwirbelschichtfeuerung der zweiten Generation, die an der BTU in Cottbus untersucht wird, Wirkungsgrade von bis zu 55 % erwartet werden.

Konzept

Das Konzept basiert auf der Kombination von Gas- und Dampfturbinentechnik. Der Umsatz des Primärenergieträgers Braunkohle (getrocknet oder grubenfeucht) in ein gasturbinentaugliches Gas erfolgt zweistufig. Die erste Stufe beinhaltet die Teilvergasung in einer Zirkulierenden Wirbelschicht bei 16 bar und 850 °C. Das erhaltene Schwachgas wird mittels Heißgasfilter bei 650 °C gereinigt und kann dann in einer zweiten Stufe, der Nachbrennkammer, bei Temperaturen oberhalb des Ascheschmelzpunktes (>1100 °C) durch Restluftzufuhr vollständig verbrannt werden. Ein GuD- Prozeß schließt sich an.

Die BTU Cottbus betreibt eine 200 kW - Versuchsanlage. Die Anlage stellt ein nahezu komplettes Kraftwerkskonzept dar. Der verbrennungstechnische Teil wird vollständig abgebildet. Zielsetzung des Forschungsvorhabens ist die Schaffung von Auslegungsdaten für eine ZDWSF - Anlage der 2. Generation im halbindustriellen Maßstab (ca. 1- 10 MW). Die Anlage ist in der Zwei-Behälter-Bauweise ausgeführt. Der Reaktor, der Rohgaskühler (RGK), die Nachbrennkammer (NBK), die Materialteststrecke und die Quenche befinden sich in Druckbehältern, die von Stickstoff durchspült werden. Der Stickstoff besitzt den gleichen Druck wie die Prozeßteile, so daß die vorgenannten Komponenten nur thermisch aber nicht mechanisch belastet werden. Der Heißgasfilter (HGF) ist noch nicht in die Anlage implementiert, aber eine wesentliche Voraussetzung für die Bereitstellung eines gasturbinentauglichen Brenngases. Um den Kombikraftwerksprozeß vollständig untersuchen und bewerten zu können, ist ein HGF nachzurüsten. Diese Maßnahme soll Bestandteil eines fortgeschrittenen FuE-Vorhabens werden. Es werden alle relevanten Parameter der Betriebsführung untersucht. Dies sind vor allem die Gaszusammensetzung, der Ausbrand, die Vermeidung von Schadstoffemissionen und die Steuerung des Umlaufs.

Verfahrenstechnische Vorteile des ZDWSF- Konzeptes sind die realisierbaren hohen Gasturbineneintrittstemperaturen, der gute Ausbrand, der sich durch die starke Vermischung in der Wirbelschicht ergibt, die in-situ-Entschwefelung durch Kalkzugabe, die eine Rauchgasentschwefelung entbehrlich macht, die moderaten Wirbelschichttemperaturen, bei denen die NO_x-Erzeugung niedrig bleibt sowie das vergleichsweise breite Brennstoffspektrum, mit dem die Anlage beschickt werden kann.

Nach dem Einbau des Rohgaskühlers im Jahre 2003, der als Voraussetzung für den geplanten HGF benötigt wird, konnten Anfang 2004 die Versuchsfahrten wieder aufgenommen werden. Bis Ende 2004 wurde die Anlage 570 h heiß betrieben, davon 270 h im Kohlebetrieb.

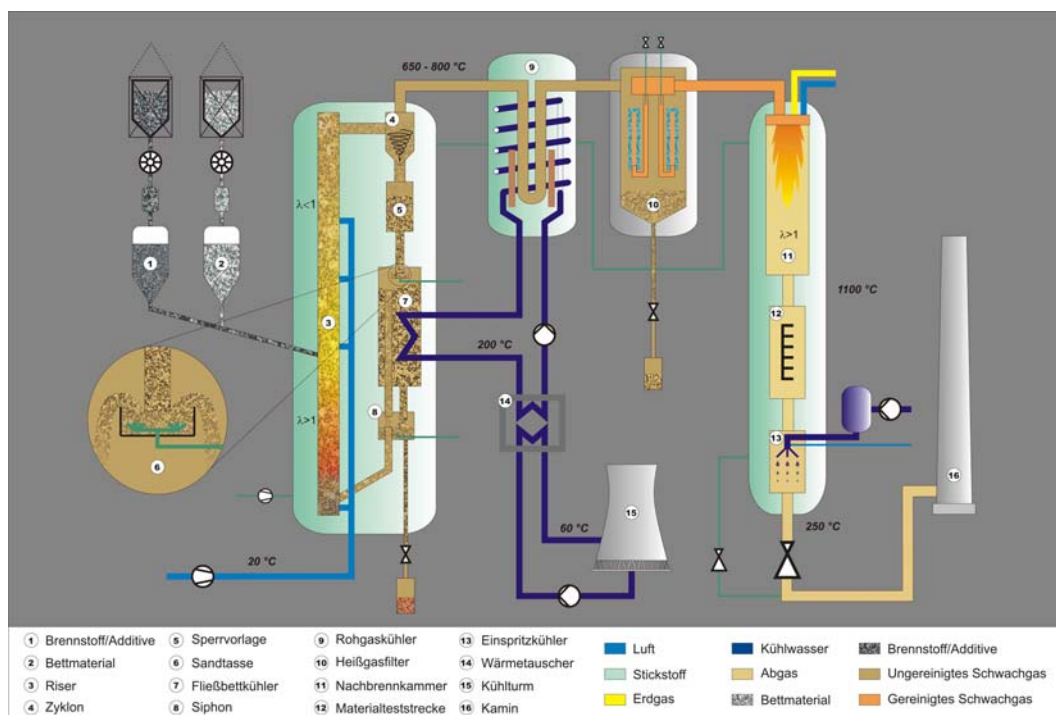


Abbildung 1: Fließbild der ZDWSF-Versuchsanlage der BTU Cottbus

Auslegungsdaten der Versuchsanlage:

Elektrische Luftvorheizung:	50	kW
Brennstoffleistung:	150	kW
Aschefließbettkühler:	120	kW
max. Reaktortemperatur:	950	°C
max. Reaktordruck:	16	bar
Riserhöhe:	6	m
Riserdurchmesser:	80	mm
Riserwerkstoff:	1.4876 (Incoloy 800 HT)	
Bettmaterial:	Quarzsand (0,1-0,7 mm)	
Brennstoff:	Roh-/ Trockenbraunkohle (0 –6 mm)	



Abbildung 2: BTU Versuchsanlage

Brennstoffanalyse		LTBK	LRFK	MRFK
H ₂ O	[%]	19	57	51,3
Asche	[%]	5,5	2,5	6
c	[%]	51,5	27,5	30,2
h	[%]	3,5	2,2	2,6
o	[%]	19	10,2	8
n	[%]	0,7	0,3	0,3
s	[%]	<0,8	0,3	1,6
LHV	[MJ/kg]	19	8,8	10,8

LTBK = Lausitzer Trockenbraunkohle (0-6 mm)
 LRFK = Lausitzer Rohfeinkohle (0-6 mm)
 MRFK = Mitteldeutsche Rohfeinkohle (0-6 mm)

Tabelle 1: Brennstoffdaten

Der RGK wurde im März 2004 eingebaut. Der HGF ist noch nicht vorhanden. Somit ist das beschriebene Konzept in der Versuchsanlage bis auf den HGF verwirklicht.

Von Januar bis einschließlich April 2005 wurde die Anlage 265 h heiß gefahren, davon 165 h mit Braunkohle-Feuerung. Aufgrund des kontinuierlichen Anlagenbetriebs während der Versuche ist sicherzustellen, daß täglich mindestens 3 Leitstandsfahrer und 3 studentische Hilfskräfte verfügbar sind.

Ende 2005 wurden die ersten Versuche mit ungetrockneter Rohfeinkohle durchgeführt.

Anfahrprozeß

Im ersten Schritt wird die NBK durch atmosphärisches Erdgas auf mehr als 600 °C aufgeheizt. Oberhalb dieser Temperatur wird dann auf Druckerdgas gewechselt. Ein Flammendetektor ist nicht mehr nötig. Das Anfahren des Risers erfolgt mit heißer Luft. Eine Heizwendel erwärmt das Primärluftrohr auf einer Länge von 6 m, und die dadurch erwärmte Luft heizt dann den Riser auf. Vorteilhaft an diesem Vorgehen ist, das keine Flammenüberwachung durch ein Aufheizen mit Gas notwendig ist. Nachteilig ist die lange Aufheizzeit. Sobald der Riser eine Temperatur von 300 °C besitzt, beginnt die Zufuhr von Trockenbraunkohle (TBK). TBK zündet bereits bei 300 °C, so daß die letzte Phase des Anfahrens erheblich schneller verläuft als das Erwärmen durch die elektrische Heizwendel. Insgesamt dauert das Anfahren

ca. 18 h. Eine Versuchsfahrt wird daher auch immer mit mindestens 5 Tagen angesetzt, um ausreichend Zeit für die Versuche zu haben.

Ergebnisse

Die Versuche wurden allesamt bei einem Systemdruck von 4 bar, abs durchgeführt. Der verwendete Brennstoff war Lausitzer TBK. Die Luftzufuhr wurde so geregelt, daß im Riser eine Luftzahl im Bereich zwischen $0,5 < \lambda < 1,1$ eingestellt war.

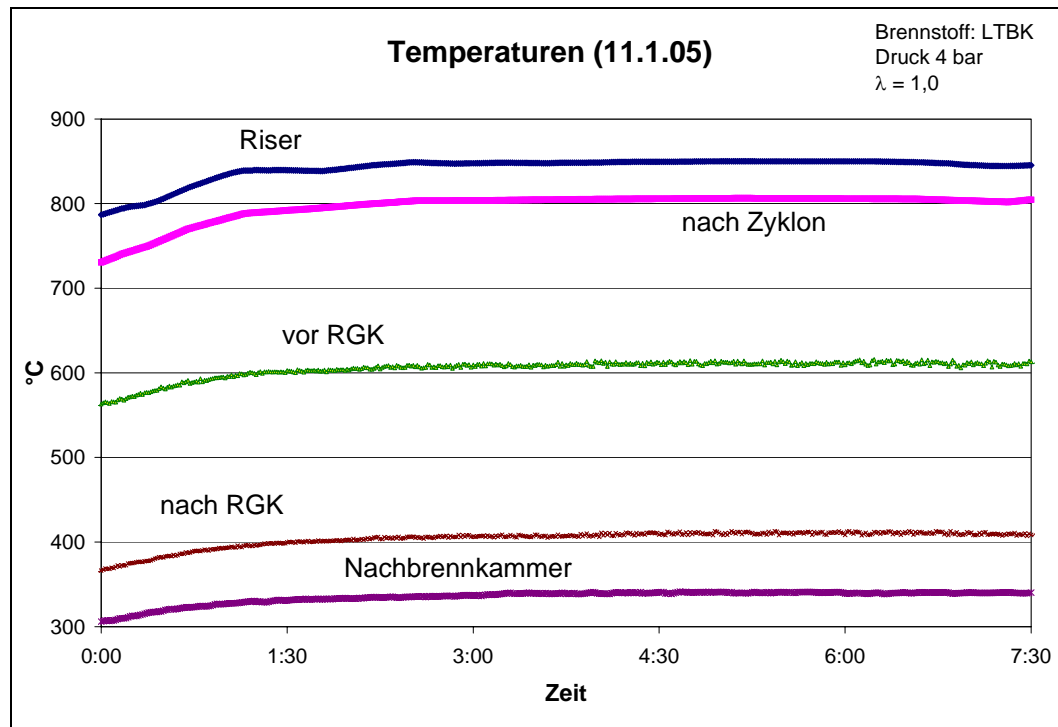


Abbildung 3: Rauchgastemperaturen entlang der Anlagenkomponenten

Abbildung 3 zeigt die Temperaturverteilung entlang der Anlagenkomponenten. Die Riser-temperatur wurde bei 850 °C gehalten. Bemerkenswert sind die Differenzen zwischen dem Riser und dem RGK sowie dem RGK und der NBK. Obwohl nur 2-3 m Rohr zwischen diesen Meßstellen liegen, kühlt das Gas um mehr als 100 °C ab. Es wird erwartet, daß sich diese Differenzen bei höheren Durchsätzen verringern.

über- und unterstöchiometrische Fahrweise

Abbildung 4 zeigt die Trockengaszusammensetzung im Vergasungsbetrieb. Die Stickstoffspülströme lagen bei 5 %. Die Spülung verhindert die Kondensation in den Brennstoffeintragsrohren. Die Fluidisierung wurde mit Luft betrieben.

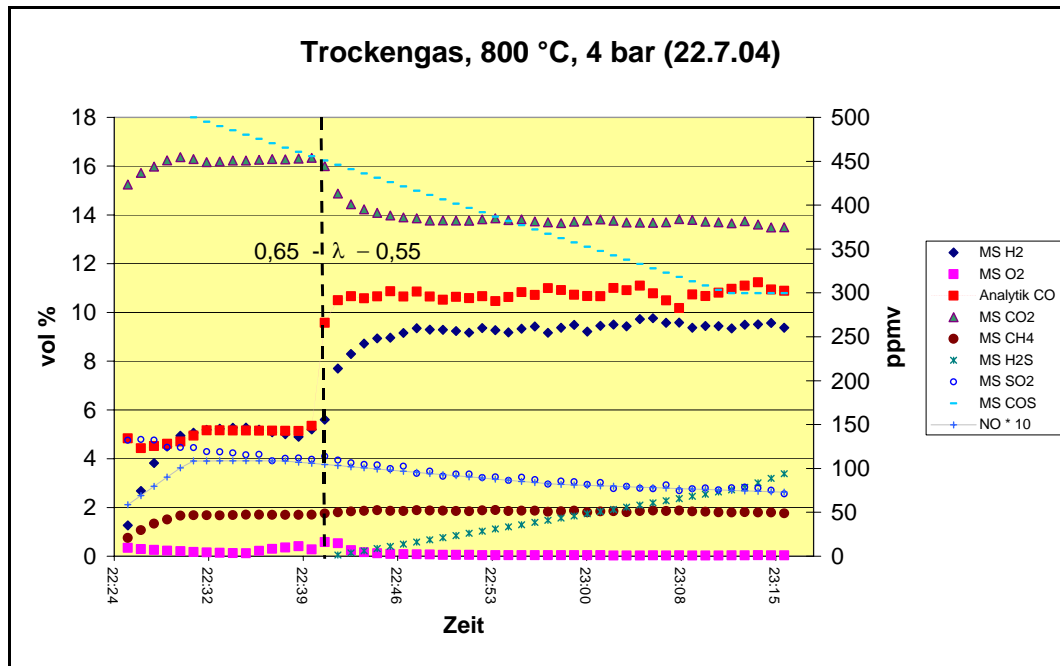


Abbildung 4: Trockengaszusammensetzung bei Vergasung (LTBK)

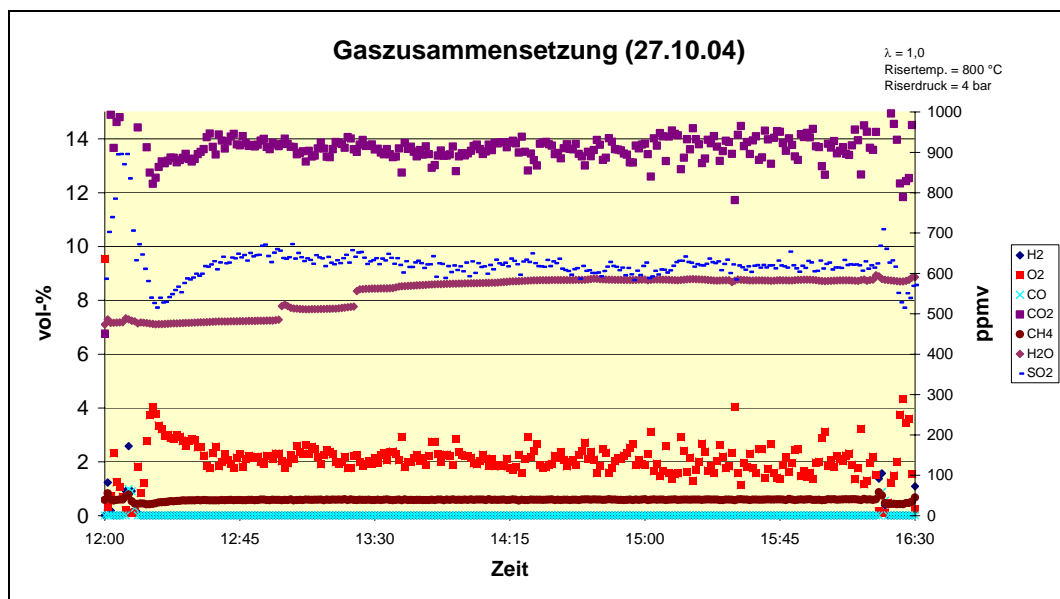


Abbildung 5: Gaszusammensetzung bei stöchiometrischer Verbrennung (LTBK)

Abbildung 5 zeigt die Gasanalyse bei stöchiometrischer Verbrennung (4bar, 800 °C) von LTBK.

Luftstufung und Fluidisierung des Umlaufs

Die Steuerung des Umlaufs im Reaktor geschieht mittels sogenannter L-Ventile. Der Vorteil dieser Lösung ist, daß es keine bewegten Anlagenteile gibt. Andererseits gibt es außer der

Primärluft noch zahlreiche weitere Luft einträge (siehe Abbildung 6). Die Fluidisierung kann durch Luft oder Stickstoff (sauerstoffabgereicherte Luft) geschehen. Die ersten Untersuchungen wurden mit Stickstoff durchgeführt. Es gab keinerlei Probleme mit dem Umlauf aber der hohe Stickstoffeintrag erniedrigte den Sauerstoffpartialdruck im Reaktor und kühlte ihn ab. Anfang 2004 wurden dann die ersten Versuche mit Luft als Fluidationsmittel durchgeführt. Nach einiger Zeit zeigten sich Probleme im Bettmaterialumlauf. Nach Öffnen des Reaktors wurden Klumpen gefunden, die aus Asche und Quarzsand bestanden. Obwohl vorherige Berechnungen zeigten, daß sich durch die Temperaturen im Aschefließbettkühler bei der Verbrennung von Restkoks solche Klumpen nicht bilden können, kam es durch lokale Temperaturspitzen eben doch zur Quarzschmelze.

Die Klumpen wurden im ganzen Reaktor verteilt und setzten sich an engen Stellen fest, wo sie den Umlauf behinderten (siehe Abbildung 7). Daher wird der AFK nun wieder mit Stickstoff fluidisiert. Die Sandtasse und der Ascheaustrag können problemlos mit Luft fluidisiert werden. In dieser Kombination wurden keine Probleme beobachtet. Die Verdünnung durch Stickstoff liegt nun bei ca. 10 % der eintretenden Luft.

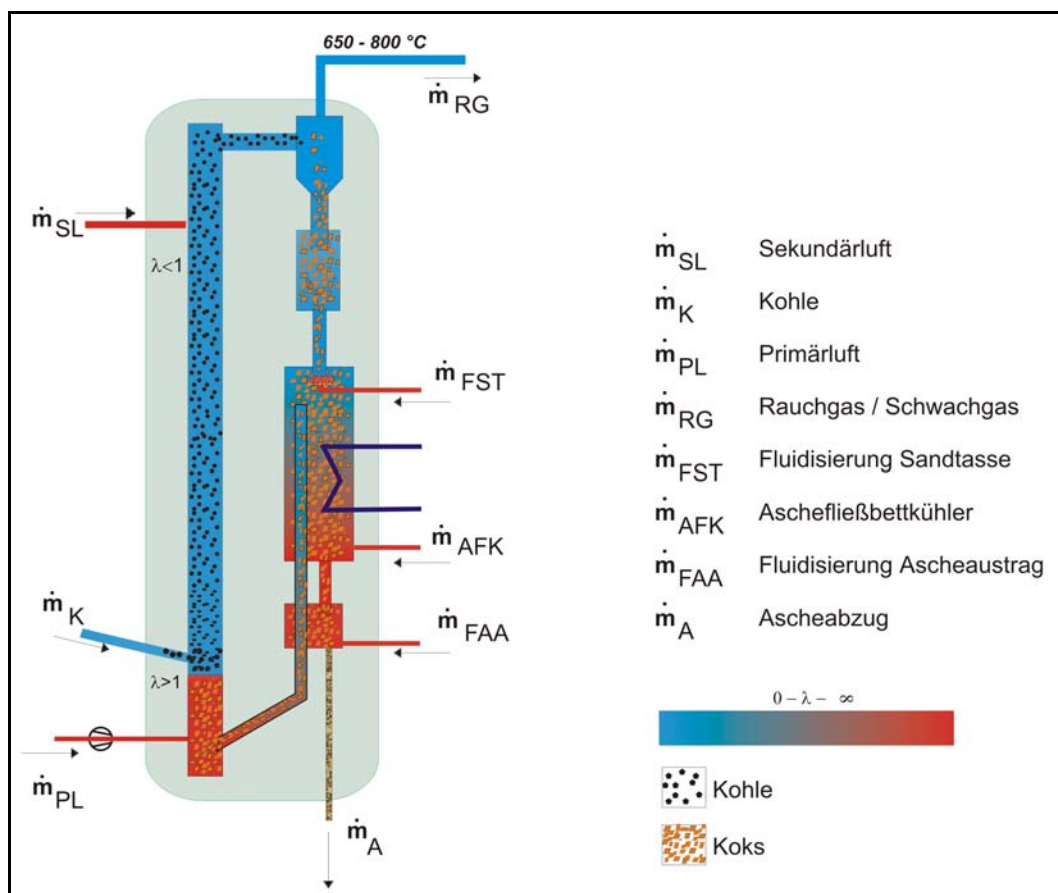


Abbildung 6: Übersicht über die Luftzugabe in den Reaktor

Ein anderer Aspekt der Luftstufung ist die Bildung von Zonen mit verschiedener Luftzahl. Von der Sperrsäule bis zum Einlauf in den Riser trifft der im Zyklon abgeschiedene Restkoks auf einen Luftüberschuß. Dies begünstigt die Umsetzung des unverbrannten Anteils der Kohle.



Abbildung 7: Verstopfung im Zyklonausgang

Kohlenstoffumsatz

Einer der wohl wichtigsten Parameter des Verbrennungsprozesses ist der Kohlenstoffumsatz. Wie in Abbildung 5 gezeigt, sollte bei einer vollständigen Verbrennung kein Restsauerstoff im Rauchgas mehr vorhanden sein. Trotzdem wurden 2 % gemessen. Dies bedeutet, daß sich 10 % des vorhandenen Sauerstoffs und somit auch 10 % des Brennstoffs nicht umgesetzt haben. Die Kohlenstoffbilanz zeigte einen C-Umsatz von ca. 90 %, was mit dem Sauerstoffwert gut übereinstimmt. Dies ist noch nicht optimal und bedarf weiterer Optimierung. Der unverbrannte Kohlenstoff verläßt den Reaktor nicht über den Ascheabzug, weil praktisch keine Asche während des Versuchs abgezogen worden ist. Die Asche wird als Flugstaub ausgetragen. Die Kenntnis der exakten Menge an unverbranntem Kohlenstoff ist für eine geschlossene Bilanz unerlässlich, ist aber zur Zeit nicht bestimmbar. Es war geplant, eine Partikelmessung zusammen mit dem HGF zu installieren. Beides existiert jedoch noch nicht. Der Restkoksgehalt im Bettmaterial liegt bei ca. 0,5 %.

Betriebserfahrungen

Die entscheidende Voraussetzung für einen reibungslosen Betrieb ist das Funktionieren des Bettmaterialumlaufs. Jede Störung im Umlauf hat unmittelbaren Einfluß auf die anderen Anlagenkomponenten. Die Brennstoffzufuhr wird bei Differenzdrücken zwischen Reaktor und Brennstoffdosierer von mehr als 40 mbar unterbrochen. Daraufhin fallen dann die Reaktortemperaturen drastisch ab, und es wird schwierig, den Prozeß wieder zu stabilisieren. Daher

kann jeder Klumpen, der im AFK durch Ascheverschmelzung entsteht, den Versuch beenden, wenn er an einem ungünstigen Ort steckenbleibt. In Abbildung 7 befindet sich ein Klumpen direkt unterhalb des Zyklonauslasses und blockiert dadurch den Umlauf.

Nachbrennkammer und Quenchkühler

In der NBK wird das Schwachgas vollständig verbrannt. Im Quenchkühler wird das Abgas durch Einspritzen von Wasser unter 300 °C gekühlt, bevor es dann in den Schornstein eintritt. Nach einer Versuchsfahrt muß der Quenchkühler gereinigt werden, da wegen des fehlenden HGF die Flugasche an der Wand haftet und mit dem kondensierenden Wasser Klumpen bildet. Wenn sich diese Klumpen während des Versuchs lösen, können sie zur Verstopfung des Siebes vor dem Druckhalteventil führen. Das Druckhalteventil selbst ist für ein staubfreies Abgas ausgelegt und verursacht daher zahlreiche Probleme.

Zusammenfassung

Die Anlage wurde 2004 nach dem Einbau des RGK 570 h lang betrieben, davon 296 h mit Kohlefeuerung. Von Januar bis April 2005 waren es 265 h bzw. 165 h mit Kohle. Die Untersuchungen wurden im über- und unterstöchiometrischen Bereich durchgeführt. Die Bettmaterialzirkulation wurde erstmals mit Luft anstelle von Stickstoff durchgeführt.

Im April 2005 wurden die ersten Versuche mit Rohfeinkohle erfolgreich durchgeführt.

Das weitere Forschungsprogramm sieht Versuche bei verschiedenen Drücken und Temperaturen vor. Darüber hinaus werden verschiedene Brennstoffe hinsichtlich Herkunft und Wassergehalt und der Einsatz von Dolomit für die in-situ-Entschwefelung getestet.

Danksagung

Die Autoren danken den Industriepartnern und dem Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) für die gewährte Unterstützung.