

# Künftige Technologien für CO<sub>2</sub>-freie Braunkohlekraftwerke – Grundlagenforschung an den Technikanlagen zur Verbrennung nach dem Oxyfuel-Verfahren und zur Trocknung in einer druckaufgeladenen Dampfwirbelschicht der BTU

Helge Kaß, Steffen Griebe, Olaf Höhne, Jörg S. Martin, Herbert Ristau, Hans Joachim Krautz  
Lehrstuhl Kraftwerkstechnik

## Kurzfassung

Die steigenden umweltpolitischen und wirtschaftlichen Anforderungen an die Energieversorgungsunternehmen führen zu der Forderung, die Energiebereitstellung aus fossil befeuerten Kraftwerken so effizient wie möglich und künftig auch kohlendioxidfrei zu gestalten. Um diesen Ansprüchen zu genügen, ist ein vielversprechender Weg beim Einsatz von Braunkohle, den Kraftwerksprozess auf Basis des Oxyfuel-Verfahrens mit integrierter Dampfwirbelschicht-Trocknung zu gestalten. An der BTU Cottbus stehen am Lehrstuhl Kraftwerkstechnik für die Entwicklung dieser innovativen und effizienten kohlendioxidfreien Technologie zwei Versuchsanlagen zur Verfügung, mit denen die Forschungsprojekte „Verbrennung von Lausitzer Braunkohle unter Oxyfuel-Prozessbedingungen in der 0,5 MWth Tangentialfeuerung“ und „Entwicklung eines Braunkohlekraftwerkskonzeptes mit integrierter druckaufgeladener Dampfwirbelschicht-Trocknung und Brennstoffzelle“ bearbeitet werden. Bisher konnte in ersten Versuchsfahrten an der Oxyfuel-Versuchsanlage eine Anreicherung von Kohlendioxid im Rauchgas von bis zu 85 Vol.-% erzielt werden. An der Versuchsanlage zur Drucktrocknung wurde der Verfahrensnachweis für die Druckaufgeladene Dampfwirbelschicht-Trocknung (DDWT) experimentell erbracht. Des Weiteren wurden die Theorie der druckaufgeladenen Kohletrocknung weiterentwickelt, einzelne Anlagenkomponenten und der Trocknungsbetrieb optimiert. Mit beiden o.g. Forschungsprojekten werden die wissenschaftlich-technischen Grundlagen gelegt, um künftig effiziente kohlendioxidfreie Kraftwerksprozesse realisieren zu können.

## Abstract

The increasing environmental and economic political requirements force the power companies to boost the efficiency of fossil-fired power plants and develop new technologies for carbon dioxide-free energy generation. In order to meet these requirements a promising concept in the lignite firing is an Oxyfuel-based method with integrated steam fluidised bed drying unit. At the chair of power plant technology of the BTU Cottbus two test facilities are available for the development of this innovative and efficient carbon dioxide-free technology. The chair is working on the research projects “Combustion of Lu-

satian Lignite under Oxyfuel Conditions in the 0.5 MW (thermal) Tangential Firing” and “Development of a Lignite Power Plant Concept with Integrated Pressurised Steam Fluidised Bed Drying and Fuel Cell”. So far a concentration of carbon dioxide in the flue gas of up to 85 %Vol. could be achieved during first test runs. At the test rig for the pressurised drying an experimental proof of concept was achieved. Furthermore the theory of the pressurised drying of lignite was enhanced, single components and the drying procedure were optimised. Both research projects provide fundamental scientific-technical insights, which form a basis for the development of efficient carbon dioxide-free power plant concepts in the future.

## 1 Einleitung

Die Reduktion des Kohlendioxid-Ausstoßes von fossil befeuerten Großkraftwerken zur Energieerzeugung stellt eine große Herausforderung für die Industrie und die Wissenschaft dar. Der Oxyfuel-Prozess ist neben der Effizienzsteigerung herkömmlicher Kraftwerkskonzepte eine vielversprechende Variante eines Kraftwerksprozesses, mit der diese Zielstellung erreicht werden kann. Grundlegender Unterschied zu konventionellen Kraftwerken ist beim Oxyfuel-Prozess die Verbrennung mit Sauerstoff und einem hohen Anteil an rezirkuliertem Rauchgas, wodurch der Kohlendioxidgehalt im Rauchgas aufkonzentriert wird. Nach einer weiteren Aufbereitung des Rauchgases durch Schwefeldioxid-Wäsche und Rauchgaskondensation werden Kohlendioxid-Gehalte von > 90 % erreicht, die anschließend eine weitere Verwendung oder Speicherung ermöglichen.

Um beim Oxyfuel-Prozesses auf der Basis von Braunkohlen einerseits einen mit modernen Kraftwerksblöcken vergleichbaren Wirkungsgrad zu erreichen und andererseits das Rauchgasvolumen und die damit verbundenen erhöhten Aufwendungen für die Aufbereitung zu minimieren, ist der Einsatz von vorgetrockneten Braunkohlen notwendig. Dieses wird durch die Integration eines Wirbelschicht-Braunkohlentrockners in den Kraftwerksprozess erreicht. Der Wirkungsgrad lässt sich durch die externe Trocknung der Braunkohle anstelle der derzeit üblichen Mahltrocknung mit Rauchgasrücksaugung um 4 bis 5 %-Punkte steigern.

An der BTU Cottbus stehen am Lehrstuhl Kraftwerkstechnik für die Entwicklung dieser innovativen und effizienten, kohlendioxidfreien Technologie zwei Versuchsanlagen zur Verfügung. Im Rahmen von Forschungsprojekten werden in Zusammenarbeit mit verschiedenen Industriepartnern aus der Energiewirtschaft und des Anlagenbaus, der Förderung durch das Bundesministerium für Wirtschaft und des Landes Brandenburg die verfahrens- und anlagentechnischen Grundlagen für diese Technologien erforscht.

## 2 Oxyfuel-Verfahren – Experimentelle Untersuchungen an der 0,5 MW<sub>th</sub> Versuchsanlage

Das CEBra – Centrum für Energietechnologie Brandenburg e. V. betreibt am Standort Jänschwalde seit 1998 eine von der L & C Steinmüller GmbH, Gummersbach entwickelte Brennkammer nach der Zykloidfeuerungs-technologie (Tangentialfeuerung mit trockenem Ascheabzug). Diese Technologie zeichnet sich durch eine homogene Vermischung zwischen Gas und Feststoff, eine gleichmäßige Temperaturverteilung sowie einen hohen Ausbrand durch partikelgrößenabhängige Verweilzeit aus. Zwischen 1998 und 2001 ist die Verbrennung mit hohen Rauchgasanteilen in der Verbrennungsluft und die damit verbundene flammenlose Verbrennung von fossilen Festbrennstoffen erfolgreich erprobt worden.

Nach der erfolgreichen Durchführung von Tastversuchen wurde im Rahmen einer Konzeptstudie mit dem Projektpartner ALSTOM Power Boiler GmbH der notwendige Aufwand für die Ertüchtigung und Erweiterung der bestehenden Technikanlage zum Oxyfuel-Prozess analysiert und deren Durchführung geplant. Die bestehende Anlage wurde ertüchtigt (Austausch der defekten und nicht ausreichend dimensionierten Baugruppen) und um die für den Oxyfuel-Prozess notwendigen Baugruppen (Sauerstoff- und Kohlendioxid-Versorgungsanlage, Rauchgaskondensator und Heißgaszyklon mit Aschekühlschnecke) erweitert.

Der Umbau der Technikanlage wurde mit der Inbetriebnahme im August 2006 abgeschlossen. Im Anschluss wurde mit einem 2-jährigen F+E-Vorhaben zur Erprobung des Oxyfuel-Prozesses begonnen.

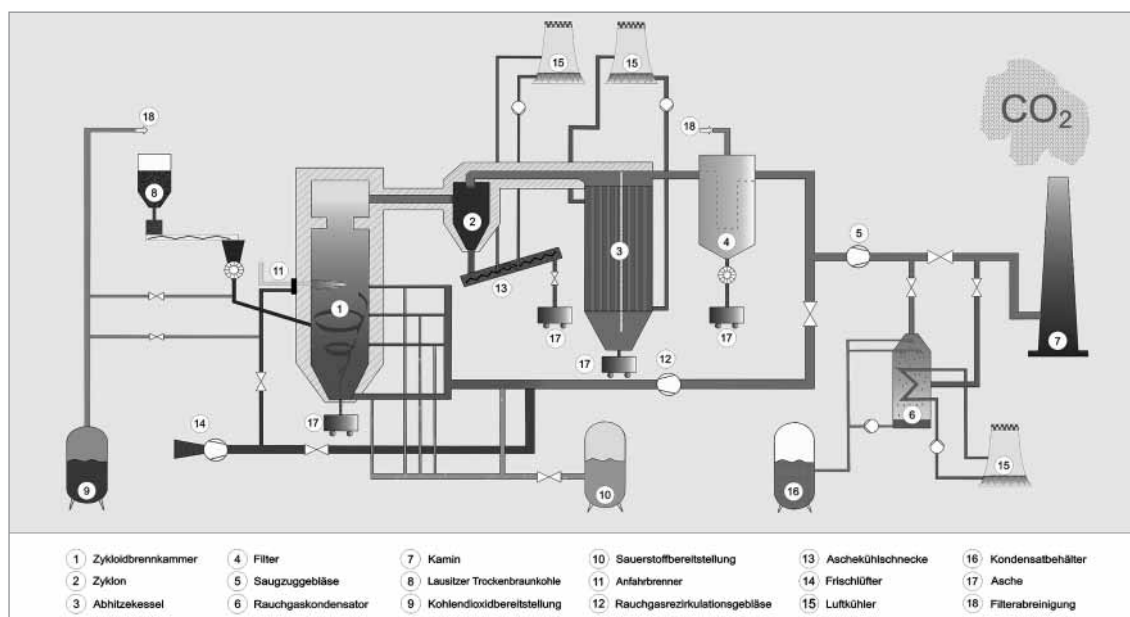
Die Zielstellungen des F+E-Vorhabens sind v. a.:

- die Charakterisierung des Verbrennungsverhaltens von Lausitzer Trockenbraunkohle (TBK) in einer CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>-Atmosphäre,
- die experimentelle Ermittlung der Prozessparameter wie z. B. O<sub>2</sub>-Gehalt im Oxydationsmittelgemisch, CO<sub>2</sub>-Gehalt im Abgas und optimale Verbrennungstemperatur,
- der erreichbare Ausbrand in allen Lastbereichen und An- und Abfahrprozessen,
- das Emissionsverhalten der Gaskomponenten Kohlenmonoxid (CO), Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) und Stickoxide (NO<sub>x</sub>),
- Untersuchungen zur Eigenentschwefelung und zum Einsatz von Entschwefelungsadditiven,
- Ermittlung des erforderlichen Aufwandes für die Rauchgasaufbereitung.

Die Ergebnisse sollen u. a. als Grundlage für die Erprobung des Oxyfuel-Prozesses in der 30 MW-Demonstrationsanlage der Vattenfall Europe Generation AG & Co. KG in Schwarze Pumpe genutzt werden.

### 2.1 Verfahrensbeschreibung der Versuchsanlage

Die wesentlichen Bestandteile der Versuchsanlage (Abb. 1) sind die adiabate 0,5 MW<sub>th</sub> Zykloidbrennkammer mit Brennstoffeintragssystem und Verbrennungsluftgebläsen, Heißgaszyklon mit Aschekühlschnecke und Kühlkreislauf, Heißwassererzeuger (Abhitzekeessel) mit Luftkühler und Umlaufpumpe, das Entstaubungsfilter mit Saugzuggebläse und Kamin. Während des Oxyfuel-Betriebs wird der Sauerstoff aus einer Tankanlage bereitgestellt. Der nicht rezirkulierte Teilstrom des Abgases wird in einem Rauchgaskondensator mit Kühlkreislauf entwässert.



**Abbildung 1:**  
Verfahrensschema der  
0,5 MW<sub>th</sub>-Technikanlage

Als Brennstoff wird hauptsächlich Lausitzer Trockenbraunkohle mit einer Korngrößenverteilung von 0 bis 6,3 mm und einem Wassergehalt von 19 Massen-% (Ma.-%) eingesetzt. Der Brennstoff wird der Brennkammer über ein Anlagensystem, bestehend aus Doppeltrogförderschnecke, Doppelpaddelmischer, zwei Rohrförderschnecken, volumetrischen Dosierer, Zellenradschleuse und Fallrohr, zugeführt. Das Brennstoffaufgabesystem ist auch für den Einsatz von alternativen Brennstoffen (z. B. pressfeuchter Klärschlamm oder Holzhackschnitzel) ausgelegt worden. Die Brennstoffe können im Doppelpaddelmischer mit der Trockenbraunkohle vermischt und anschließend der Brennkammer zugeführt werden. Die Zugabe der Entschwefelungsadditive erfolgt zur Doppeltrogförderschnecke, so dass die Additive mit dem Brennstoff gemeinsam in die Brennkammer eingetragen werden.

Das Oxidationsmittel (je nach Betriebsart Frischluft, Frischluft/Rauchgasgemisch oder mit Sauerstoff (O<sub>2</sub>) angereichertes Rauchgas) wird der Brennkammer über ein Frischluft- oder Rezirkulationsgebläse zugeführt und teilt sich in Wirbelluft, Primärluft und Sekundärluft (drei Luftebenen) auf. Im Oxyfuel-Betrieb kann der Sauerstoff dem gesamten Oxidationsmittelstrom oder – zur Prozessoptimierung – separat in den einzelnen Luftebenen zugeführt werden.

Nach der Verbrennung des Brennstoffes mit dem Oxidationsmittel in der Brennkammer verlässt das heiße Rauchgas mit einer Temperatur von max. 950 °C die Brennkammer und wird nach der Aschegrobabscheidung im Heißgaszyklon dem Heißwassererzeuger zugeführt. Im Heißwassererzeuger erfolgt eine Rauchgasabkühlung auf filterverträgliche Temperaturen von 130 °C bis 250 °C. Zur weiteren Rauchgasreinigung dient ein herkömmliches Gewebefilter. Anschließend wird das abgekühlte und entstaubte Rauchgas mittels Saugzug und Kamin an die Umgebung abgegeben. Die Rauchgasentnahme für das Rauchgasrezirkulationsgebläse befindet sich zwischen Gewebefilter und Saugzug. Zwischen Saugzug und Kamin ist im Bypass der Rauchgaskondensator angeordnet. Im Oxyfuel-Betrieb kann der Wasserdampf, der sich prozessbedingt im Rauchgas anreichert, kondensiert und abgeschieden werden.

Die bei der Verbrennung von Trockenbraunkohle entstehende Asche fällt an verschiedenen Stellen im System an. Im unteren Bereich der Brennkammer befindet sich eine Grobentaschung. Hier werden grobe Brennstoff- und/oder Inertpartikel, die auf den Brennkammerboden abgesunken sind, ausgeschleust. Im nachgeschalteten Heißgaszyklon wird ein Großteil der in der Brennkammer entstehenden Flugasche aus dem Rauchgasstrom abgeschieden. Die heiße Asche wird in der unterhalb des Zyklons angeschlossenen, wassergekühlten Aschekühlschnecke von 950 °C auf 40 °C abgekühlt und in einen Schüttgutcontainer ausgeschleust. Zur Vermeidung von Ascheablagerungen in den Rauchrohren des Heißwassererzeugers ist eine Schallbläseranlage integriert. Die im Heißwassererzeuger anfallende Asche wird in einer Aschetonne gesammelt. Nach dem Heißwassererzeuger werden die übrigen Aschepartikel weitestgehend im Entstaubungsfilter abgeschieden und über eine Zellenradschleuse einem Schüttgutcontainer zugeführt.

Der Heißwassererzeuger ist als zweizügiger Rauchrohrkessel ausgeführt. Das Rauchgas wird durch die Rauchrohre geleitet und gegen das im Mantelraum befindliche Kühlwasser abgekühlt. Dabei wird das

Kühlwasser bei max. 6 bar auf max. 110 °C aufgewärmt. Das heiße Kühlwasser wird anschließend in einem Luftkühler gegen die Umgebung auf ca. 80 °C abgekühlt [1].

Der Rauchgaskondensator zur Abscheidung des im Rauchgas enthaltenen Wassers (bis zu 30 Ma.-%) besteht aus einer Quenchstufe und einem Rückkühlregister. In der Quenchstufe wird im Kreislauf geführtes Kondensat in das heiße Rauchgas eingedüst und das Rauchgas abgekühlt. Anschließend wird das abgekühlte, mit Wasser gesättigte Rauchgas über einen wassergekühlten Wärmeübertrager geleitet und auf ca. 40 °C abgekühlt. Das dabei anfallende Kondensat wird in einer Prozesswanne gesammelt und kontinuierlich ausgeschleust. Bei der Kondensation des Wasserdampfes wird ein Teil des im Rauchgas enthaltenen SO<sub>2</sub> ausgewaschen. Die dabei entstehende Schwefelsäure wird zur Verringerung von Materialkorrosion mit Natronlauge kontinuierlich neutralisiert. Das abgekühlte Rauchgas verlässt abschließend über einen Tropfenabscheider den Kondensator.

Zur Reduzierung des Eintrages von Falschluff und der damit verbundenen Aushaltung von Stickstoff im Rauchgas werden an verschiedenen Stellen der Versuchsanlage die Verbraucher von Kühl- oder Spülluft auf CO<sub>2</sub> aus einer Tankanlage umgestellt. Zu den Verbrauchern zählen hauptsächlich die Kühlung des Flüssiggasbrenners, die Jet-Puls-Abreinigung des Schlauchfilters, die Druckluftversorgung der Schallbläseranlage und die Spülung der Brennstoffaufgabe.

Die Versuchsanlage ist zur vollständigen Massen- und Energiebilanzierung mit einer Vielzahl von Messeinrichtungen ausgestattet. Dazu zählen Temperatur- und Druckmessstellen in der Brennkammer und den einzelnen Oxidationsmittel-, Rauchgas- und Kühlwasserleitungen sowie jeweils einer rauchgasseitigen Emissionsmessung vor dem Heißwassererzeuger und im Kamin. Alle Messwerte werden von einem Prozessleitsystem erfasst und gespeichert und können anschließend ausgewertet werden. Der gesamte Prozess wird ebenfalls über das rechnergestützte Prozessleitsystem gesteuert und überwacht [2].

## 2.2 Versuchsdurchführung

Die Betriebsweise der Zykloidsbrennkammer ist generell in drei Betriebsarten möglich, dem Betrieb ohne Rauchgasrezirkulation (Frischluftbetrieb), Betrieb mit Rauchgasrezirkulation (Rauchgasbetrieb) und der Betrieb mit Rauchgasrezirkulation und reinem Sauerstoff aus einer Tankanlage (Oxyfuel-Betrieb). Wird die Verbrennung im Rauchgasbetrieb realisiert, beträgt der Rauchgasanteil an der Verbrennungsluft max. 60 Ma.-% und der Sauerstoffgehalt ca. 10,5 Vol.-%. Bei dieser Art der Verbrennungsführung findet eine flammenlose Verbrennung der Trockenbraunkohle bei 950 °C statt. Für den Oxyfuel-Betrieb wird das rezirkulierte Rauchgas mit reinem Sauerstoff auf bis zu 20,9 Vol.-% angereichert und dem Verbrennungsprozess zugeführt.

Zu Beginn jeder Versuchsfahrt erfolgt nach der Inbetriebnahme des Kühlkreislaufes des Heißwassererzeugers und der Vorbelüftung der Brennkammer die Aufheizphase der Versuchsanlage. Hierbei wird die Brennkammer mit einem 200 kW Flüssiggasbrenner auf Zündtemperatur der TBK von 650 °C aufgeheizt. Ab dieser Temperatur kann

der Eintrag der Trockenbraunkohle erfolgen und der Flüssiggasbrenner abgeschaltet werden. Durch die Erhöhung der Brennstoffwärmeleistung wird die Anlage auf den stationären Betriebspunkt (Nennlastbetrieb 500 kW und 950 °C Brennkammertemperatur) gebracht.

Zum Schutz des Schlauchfilters vor Kondensation des Rauchgases wird der Filter bis zu einer Rauchgastemperatur hinter dem Heißwassererzeuger von 130 °C im Bypass umfahren. Gleichzeitig wird der Filter durch eine Mantelheizung auf Betriebstemperatur aufgeheizt. Nach dem Erreichen einer Rauchgastemperatur von > 130 °C kann der Filter zugeschaltet werden.

Zur Durchführung der Versuche unter Oxyfuel-Bedingungen wird ein stationärer Betriebszustand mit einem Verhältnis zwischen Frischluft und rezirkuliertem Rauchgas von 50/50 Ma.-% angefahren. Nach Erreichen des stationären Referenzpunktes erfolgt die Umschaltung auf den Oxyfuel-Versuchsbetrieb. Dazu wird die Sauerstoffversorgungsanlage zugeschaltet und der Sauerstoff kontinuierlich dem Oxidationsmittel zugeführt. Gleichzeitig wird sukzessiv der zugeführte Frischluftmassenstrom verringert und der Rauchgasmassenstrom erhöht, bis keine Frischluft mehr in das System eingetragen wird. Dieser Betriebspunkt wird durch Veränderungen in der Luftstufung in den einzelnen Verbrennungsluftstufen bis zum Erreichen einer durchschnittlichen Brennkammertemperatur von ca. 950 °C optimiert. Nach Erreichen eines stationären Oxyfuel-Betriebspunktes kann das Frischluftgebläse außer Betrieb genommen werden.

Abschließend kann der Rauchgaskondensator in Betrieb genommen werden. Dazu werden die Prozesswasserpumpe eingeschaltet und die Bypassklappen zwischen Saugzug und Kamin geöffnet.

Zur Optimierung der gestuften Verbrennung und zur Senkung des O<sub>2</sub>-Gehaltes im Rauchgas kann in jeder Oxidationsmittelebene durch Zumischung von Sauerstoff ein separater O<sub>2</sub>-Gehalt (bis max. 35 Vol.-%) eingestellt werden.

### 2.3 Versuchsergebnisse im Oxyfuel-Betrieb

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse wurden im Rahmen von Tastversuchen zur Konzeptentwicklung [5] und der Inbetriebnahme der Anlage erzielt.

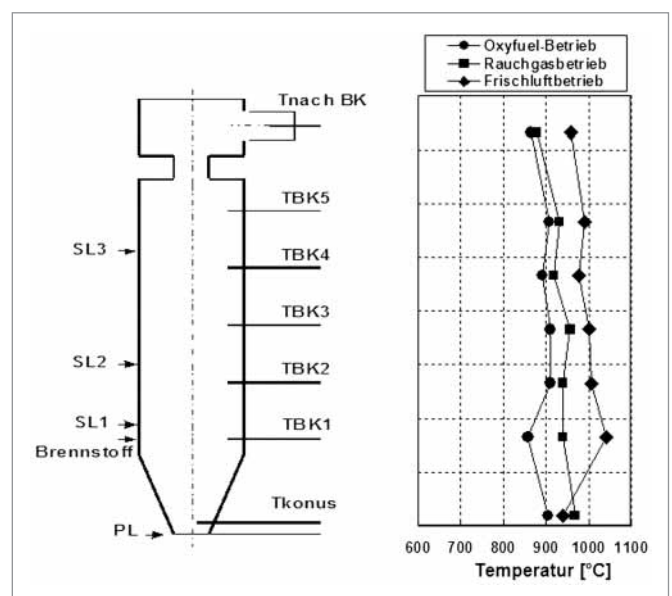
Das Anfahren des Oxyfuel-Betriebes kann in zwei unterschiedlichen Weisen erfolgen. Einerseits wird von einem Referenzpunkt die O<sub>2</sub>-Konzentration im Oxidationsmittel schrittweise erhöht, der Frischluftmassenstrom verringert und die Rezirkulationsgasmenge erhöht. Um die Betriebsstabilität zu bewerten, werden verschiedene Anfahrbetriebspunkte, charakterisiert durch die O<sub>2</sub>-Konzentration im Oxidationsmittel, für ca. 30 Minuten konstant gehalten. Eine weitere Möglichkeit des Anfahrens besteht darin, dass man kontinuierlich, ohne Einstellung von stationären Betriebspunkten, die Sauerstoff- und Rezirkulationsgasmenge erhöht und gleichzeitig den Frischluftmassenstrom absenkt, bis keine Frischluft mehr eingetragen werden muss (Gleitfahrweise). Bei beiden Anfahrverläufen wurden vergleichbare CO<sub>2</sub>-Konzentrationen von max. 81 Vol.-% bei einer O<sub>2</sub>-Konzentration im Rauchgas von 8,5 Vol.-%

erzielt. Die Zeit zum Erreichen eines stationären Oxyfuel-Betriebspunktes konnte in der Gleitfahrweise auf ca. 1 Stunde verkürzt werden.

Zur Bewertung des Oxyfuel-Prozesses wurden die Ergebnisse zur Temperaturverteilung und zur Schadstoffbildung (NO, CO und SO<sub>2</sub>) in der Brennkammer mit repräsentativen Ergebnissen aus der Frischluft- und Rauchgasfahrweise verglichen [6]. In Abb. 2 sind die vertikalen Temperaturprofile der Brennkammer für die verschiedenen Betriebsweisen dargestellt. Man erkennt, dass es bei der Frischluftfahrweise (Luftzahl = 2,1) zur Ausbildung einer Hauptverbrennungszone im Bereich der Brennstoffaufgabe kommt. In diesem Bereich wird das Sauerstoffangebot der Frischluft direkt zur Verbrennung genutzt. Für den stabilen Betrieb ist eine Luftstufung zwischen Primär- und Sekundärluft von 54/46 Ma.-% eingestellt worden.

Mit steigendem Rauchgasanteil (bis zu Luftzahl = 1,17) vergleichmäßig sich die Temperaturverteilung über die Brennkammer. Im Bereich des Brennstoffeintrags steht weniger Sauerstoff für die Verbrennung zur Verfügung, so dass die reagierenden Kohlepartikel mit der aufwärts gerichteten Rotationsströmung in die oberen Bereiche der Brennkammer gelangen. In diesen Bereichen wird durch die Zugabe von Sekundärlüften 2 und 3 der vollständige Ausbrand erreicht. Im Rauchgasbetrieb wurde eine Luftstufung zwischen Primär- und Sekundärluft von 50/50 Ma.-% gefahren.

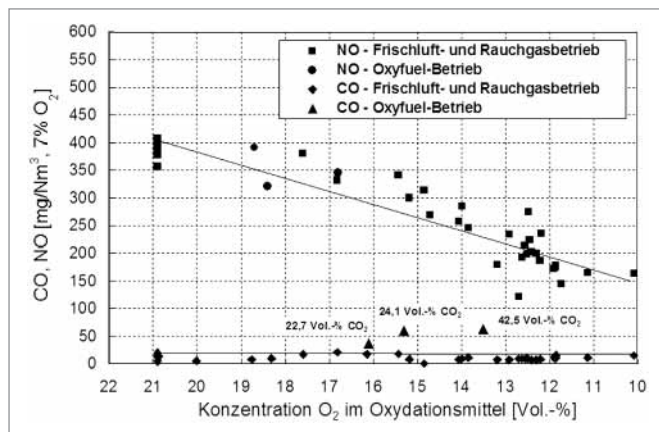
Bei der Betriebsweise unter Oxyfuel-Bedingungen ist eine mit dem Rauchgasbetrieb vergleichbare Temperaturverteilung erkennbar. Der Primärluftanteil wurde bei einer Luftzahl von 1,57 auf 45 Ma.-% reduziert. Trotz des höheren Sauerstoffgehaltes im Oxidationsmittel im Vergleich zum Rauchgasbetrieb und auf Grund der flammenlosen Verbrennung sowie der homogenen Vermischung des Oxidationsmittels und den Kohlepartikeln ist das vertikale Temperaturprofil dieser Betriebsweise mit dem Rauchgasbetrieb vergleichbar.



**Abbildung 2:** Vertikale Temperaturverteilung in der Brennkammer für den Frischluft-, Rauchgas- und Oxyfuel-Betrieb

In Abb. 3 ist die Konzentration von NO und CO in Abhängigkeit der Sauerstoffkonzentration im Oxidationsmittel dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die NO-Konzentrationen im Frischluftbetrieb mit den derzeit erreichten Konzentrationen im Oxyfuel-Betrieb in der gleichen Größenordnung von 320 bis 415 mg/Nm<sup>3</sup> (alle Werte sind auf 7 % O<sub>2</sub> bezogen) liegen. Bei sinkendem Sauerstoffgehalt im Oxidationsmittel sinkt der NO-Konzentration auf Werte von 150 bis 250 mg/Nm<sup>3</sup> ab. Daraus folgt, dass sich die Bildung und Minderung von NO unter Oxyfuel-Bedingungen nicht wesentlich von der Normalverbrennung mit Luft unterscheidet und eine Abhängigkeit von der Sauerstoffkonzentration im Oxidationsmittel vorhanden ist.

Die Konzentrationen von CO im Frischluft- und Rauchgasbetrieb liegen in einer vergleichbaren Größenordnung zwischen 10 und 20 mg/Nm<sup>3</sup>, so dass man von einer nahezu vollständigen Verbrennung ausgehen kann. Durch die Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Konzentration beim Oxyfuel-Betrieb wurden erhöhte CO-Konzentration im Rauchgas von ca. 50 mg/Nm<sup>3</sup> gemessen.



**Abbildung 3:**  
Emissionen der Gaskomponenten CO und NO

Bezüglich der SO<sub>2</sub>-Konzentrationen hat sich bisher gezeigt [6], dass mit steigendem Rauchgasanteil im Oxidationsmittel die Konzentrationen von SO<sub>2</sub> reduziert werden. Ursprüngliche Werte von 1.160 mg/Nm<sup>3</sup> im Frischluftbetrieb können im Rauchgasbetrieb (11,1 Vol.-% O<sub>2</sub> im Oxidationsmittel) auf ca. 600 mg/Nm<sup>3</sup> vermindert werden. Es erfolgt eine so genannte Eigenschwefelung an den kalziumreichen Aschebestandteilen der Braunkohle. Die Effizienz dieser Reaktion wird durch die erhöhte Reaktionszeit des rezirkuliertem Rauchgases mit den Aschepartikeln in der Brennkammer und die geringeren Partikeloberflächentemperaturen, die ein Versintern reaktiver Oberflächen vermindern, im Vergleich zum Frischluftbetrieb erhöht. Im Oxyfuel-Betrieb sind SO<sub>2</sub>-Konzentrationen von bis zu 2.500 mg/Nm<sup>3</sup> nach der Brennkammer gemessen worden. Die hohe Konzentration begründet sich durch Rückführung von Rauchgas und der damit verbundenen Anreicherung des SO<sub>2</sub>.

Beim Betrieb des Rauchgaskondensators wurde festgestellt, dass durch die stattfindenden Reaktionen die SO<sub>2</sub>-Konzentration verringert wird. Es werden Werte nach Rauchgaskondensator von 500 mg/Nm<sup>3</sup> erreicht. Der Rauchgaskondensator stellt hier eine Rauchgaswäsche dar.

Abschließend werden in Tab. 1 die Rauchgaszusammensetzungen der verschiedenen Betriebsweisen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass im Oxyfuel-Betrieb ein hoher CO<sub>2</sub>-Gehalt im feuchten Rauchgas von ca. 80 Vol.-% (entspricht ca. 85 Vol.-% im trockenen Rauchgas) erreicht werden konnte. Der Stickstoffgehalt von 3,4 Vol.-% resultiert hauptsächlich aus dem eingetragenen Falschlufanteil. Durch weitere Optimierungsmaßnahmen, wie der Senkung der O<sub>2</sub>-Konzentration im Rauchgas nach Brennkammer und Verringerung des Falschlufteintrages können CO<sub>2</sub>-Gehalte von bis zu 92 Vol.-% im trockenen Rauchgas erreicht werden.

**Tabelle 1:**  
Rauchgaszusammensetzung verschiedener Betriebsarten

Rauchgaskomponente	Einheit	Frischlufbetrieb	Rauchgasbetrieb	Oxyfuel-Betrieb
N <sub>2</sub>	[Vol.-%, f]	74,20	70,60	3,41
O <sub>2</sub>	[Vol.-%, f]	11,53	2,96	10,09
CO <sub>2</sub>	[Vol.-%, f]	7,60	14,09	79,71
H <sub>2</sub> O	[Vol.-%, f]	6,63	12,28	6,50
SO <sub>2</sub>	[Vol.-%, f]	0,04	0,07	0,29*
Normdichte	[kg/Nm <sup>3</sup> ]	1,28	1,29	1,78

\*) ohne Rauchgaskondensator

### 3 Druckaufgeladene Dampfwirbelschicht-Trocknung grubenfeuchter Braunkohle – Betriebs- und experimentelle Ergebnisse von der 0,5 t/h Versuchsanlage

#### 3.1 Ziele des Verbundforschungsvorhabens

Am Lehrstuhl Kraftwerkstechnik der BTU Cottbus wurde 2002 eine Versuchsanlage zur Druckaufgeladenen Dampfwirbelschicht-Trocknung (DDWT) grubenfeuchter Braunkohlen errichtet und anschließend in Betrieb genommen. Die Abb. 4 zeigt die Anlage im Labor des Lehrstuhls Kraftwerkstechnik. Das F+E-Vorhaben ist Teil des Verbundforschungsvorhabens „Entwicklung eines Braunkohlekraftwerkskonzeptes mit integrierter druckaufgeladener Dampfwirbelschichttrocknung und Brennstoffzelle“. Daran beteiligt sind Vattenfall Europe Generation AG & Co. KG, Vattenfall Europe Mining AG, Mitteldeutsche Braunkohlengesellschaft mbH, CEBra e. V., ALSTOM Power Generation AG, Babcock Borsig Service GmbH und die BTU Cottbus. Das Forschungsvorhaben wird vom Bundesministerium für Wirtschaft, vertreten durch den Projektträger in Jülich, unterstützt.

Ausgehend vom Stand der modernen Konzepte für Braunkohlenkraftwerke soll untersucht werden, welche weiteren Potenziale durch den Einsatz eines Braunkohle-Drucktrockners zu erschließen sind und wie dieser in den Kraftwerksprozess integriert werden kann. Des Weiteren soll brennstoffseitig die Voraussetzung für zukünftige Kraftwerkstechnologien (Trockenbraunkohleblock, Oxyfuel, GuD-Prozesse) geschaffen werden. Die Ziele sind im Vergleich zu atmosphärischen Wirbelschicht-trocknern kompaktere Anlagen, die neben den erwarteten Investitionskostenvorteilen auch höhere integrale Wärmedurchgangskoeffizienten (k-Werte) zwischen Tauchheizfläche und Wirbelbett und hohe Nettowirkungsgrade eines Braunkohlekraftwerks erreichen [7], [8].



**Abbildung 4:**  
DDWT-Versuchsanlage an der BTU Cottbus

Die Inhalte der Forschungsarbeiten am Lehrstuhl Kraftwerkstechnik sind:

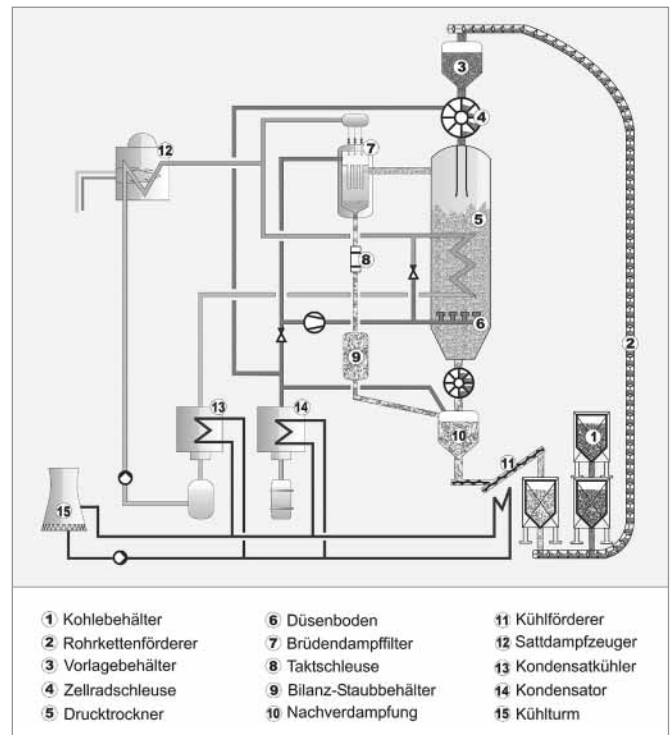
- Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur druckaufgeladenen Trocknung von grubenfeuchten Rohfeinkohlen,
- Aufbau, Inbetriebnahme und Betrieb des Versuchstrockners, Optimierung der Anlagentechnik und Erprobung von Einzelkomponenten im Hinblick auf einen Großtrockner,
- Verfahrensnachweis der Drucktrocknung im Technikummaßstab,
- Entwicklung und Erprobung von An- und Abfahrtechnologien, Störfallsimulation,
- Messprogramme zur Ermittlung und Bewertung der Einflussgrößen einer druckaufgeladenen Dampfwirbelschicht und zur optimierten Trocknung von grubenfeuchten Rohfeinkohlen verschiedener Qualitäten,
- Untersuchungen zu Auslegungsverfahren einer druckaufgeladenen Dampfwirbelschicht (spezifischer Wärmebedarf für die Kohlewasserverdampfung, Strömungsverhalten in der Wirbelschicht, Wärmeübertragung in der DDWT und deren Einfluss auf das Trocknungsverhalten von realen Braunkohlen),
- Auswertung und Gegenüberstellung von atmosphärischer und druckaufgeladener Kohletrocknung.

Das F+E-Vorhaben wird Ende 2006 abgeschlossen.

### 3.2 Verfahrensbeschreibung des Versuchstrockners

Mit dem Aufbau des Versuchstrockners, der gemeinsam mit dem CEBra e.V. errichtet und vom Land Brandenburg gefördert wurde, sind die Voraussetzungen geschaffen, um auf Grundlage von theoretischen Vorbetrachtungen und experimentellen Untersuchungen im Labormaßstab die Druckaufgeladene Dampfwirbelschicht-Trocknung in einer Technikanlage zu erproben [7], [8], [12]. Dabei kann durch den Einsatz von Rohfeinkohlen verschiedener Qualitäten (Herkunft, Körnung, Wassergehalt, Faser-Xylit-Anteil etc.) und der Erprobung einzelner Anlagenteile im Gesamtsystem bereits eine Bewertung möglicher Anlagenkomponenten im Hinblick auf den Einsatz im Großtrockner erfolgen.

Das Anlagenprinzip der Versuchsanlage ist in Abb. 5 dargestellt und wird im folgenden kurz erläutert.



**Abbildung 5:**  
Funktions- und Anlagenprinzip der DDWT-Versuchsanlage

Die zu trocknende Kohle mit einem Wassergehalt von bis zu 60 % wird aus einem Rohkohlebehälter ausgetragen über einen Rohrkettenförderer zum Kopf des Trockners, in den Vorlagebehälter transportiert. Von dort aus wird sie über ein Zellenrad in den druckaufgeladenen Bereich eingeschleust. Im Trockner bildet die Kohle eine mittels Dampf fluidisierte Wirbelschicht aus. Während sich die trocknende Kohle nach unten durch den Trockner bewegt, tritt der Kohlebrüden nach oben aus dem Trockner aus. Der Restwassergehalt der Trockenkohle beträgt je nach Vorgabe zwischen 10 und 20 %. In einem Gewebefilter wird der Kohlebrüden vom Staub gereinigt und gelangt über ein Entspannungsventil zu den Brüedampfkondensatoren. Ein Teil der Kohlebrüden wird vor dem Entspannungsventil vom Brüedenumlaufgebläse abgezo-

gen, verdichtet und dient anschließend als Fluidisationsmittel für die Wirbelschicht. Die notwendige Verdampfungswärme für die Kohletrocknung wird durch Heizdampfcondensation realisiert und über Tauchheizflächen im Trockner an die Wirbelschicht übertragen. Der Heizdampf wird von einem Sattdampfkessel bereitgestellt. Die Trockenbraunkohle wird über ein Zellenrad aus dem Drucktrockner ausgeschleust und gelangt in den drucklosen Nachverdampfungsbehälter. Der aus dem Gewebefilter abgeschiedene Staub wird über eine Takt-schleuse ausgetragen. Er gelangt in einen Bilanz-Staubbehälter und erreicht anschließend ebenfalls den Nachverdampfungsbehälter. Abschließend wird die Trockenkohle in einem Kühlförderer gekühlt und in den Trockenkohlebehälter transportiert.

Der Versuchstrockner ist mit umfangreicher Mess- und Leittechnik für Betriebsführung und wissenschaftliche Untersuchungen ausgestattet, alle wesentlichen Daten werden auf einer grafischen Oberfläche des Prozeßleitsystems dargestellt und für die Auswertung der Versuchsfahrten gespeichert. Die folgenden Werte repräsentieren die Auslegungsdaten der DDWT-Versuchsanlage.

**Tabelle 2:**  
Auslegungsdaten der DDWT-Versuchsanlage

<b>Rohfeinkohle</b> Durchsatz: Feuchte:	250-500 50-60	kg/h %
<b>Trockenbraunkohle</b> Durchsatz: Feuchte:	125-250 10-20	kg/h %
<b>Kohlewasserdampf/Brüden</b>	125-250	kg/h
<b>spezifischer TBK-Durchsatz</b>	1000-2000	kg/(m <sup>2</sup> * h)
<b>Durchmesser der Wirbelschicht</b>	437	mm
<b>Wirbelschichtgrundfläche</b>	0,15	m <sup>2</sup>
<b>Wirbelschichthöhe</b> liegend fluidisiert	2000-3000 ca. 3600	mm mm
<b>Trocknerhöhe</b>	ca. 6000	mm
<b>Systemdruck (abs.)</b>	1,2-6,5	bar
<b>Systemtemperatur</b>	110-175	°C
<b>Heizmedium</b>	Sattdampf	–
<b>treibende Temperaturdifferenz</b>	38-40	K
<b>Kornspektrum</b>	0 bis ≤ 6	mm

### 3.3 Betriebs- und experimentelle Ergebnisse vom Versuchstrockner

Ein wichtiger Teil des Forschungsvorhabens ist die Erprobung und Bewertung der Anlagenkomponenten. Von besonderer Bedeutung sind hierbei die Aggregate, die für den Druckbetrieb erforderlich sind und auch im Referenz- und in einem späteren Großtrockner zum Einsatz kommen sollen. Im Folgenden werden einige Inbetriebnahmeergebnisse und wesentliche experimentelle Versuchsergebnisse zusammenfassend vorgestellt. Weitere Ergebnisse sind in MARTIN et al., 2004, 2005 dargestellt [9], [10], [11].

### Rohfeinkohleaufgabe, Rohrkettenförderer und Vorlagebehälter

Im Rahmen der Inbetriebnahme der Anlage zeigte sich, dass der eingesetzte Rohrkettenförderer entgegen den ursprünglichen Erwartungen des Anlagenbauers nicht zur Dosierung von Trockenbraunkohlen oder Rohfeinkohlen eingesetzt werden kann. Um den optimalen Füllgrad des Rohrkettenförderers zu gewährleisten, waren vorgelagerte Dosierorgane nachzurüsten, die sich jedoch nicht nachteilig auf die Genauigkeit der für die Trocknerbilanzierung notwendigen online Kohlewägung auswirkten.

Für die Trockenbraunkohlen genügt als Dosierorgan eine einfache Zellenradschleuse, die zur Vermeidung von Störungen durch Xylit mit Schneidkanten ausgerüstet ist. Die grubenfeuchten Rohfeinkohlen werden in Big Bags angeliefert und nun mittels eines speziellen Behälters auf den Rohrkettenförderer dosiert. Dieser Behälter hat senkrechte Wände, an denen die Rohfeinkohlen gut nachrutschen können und verfügt am waagerechten Boden über einen Austräumer zur Dosierung. Durch diese Zwangsförderung kann auf einen Austragskonus mit steilen Winkeln verzichtet werden, wodurch auch Bauhöhe eingespart wird.

Durch die Nachrüstung der Dosierorgane und entsprechende Ermittlung der Austragskennlinien konnten Störungen des Rohrkettenförderers auf Grund von Überfüllung beseitigt werden.

### Gewebefilter zur Kohlebrüden-Entstaubung

Zur Reinigung der aus dem Trockner austretenden staubbeladenen Kohlebrüden wird an Stelle des sonst üblichen Elektrofilters erstmalig ein druckfester Gewebefilter eingesetzt. Ziel sind Abscheidegrade nach Filter von unter 20 mg/Bm<sup>3</sup>, so dass in nachgeschalteten Gebläsen (Fluidisierungsmittelumlaufgebläse und ggf. Brüdenverdichter) keine Erosions- oder Verschmutzungsprobleme durch Kohlenstaub auftreten.

Der druckfeste Gewebefilter des Versuchstrockners wird periodisch mit Dampf abgereinigt. Als Filtermaterial kommt ein beschichtetes Glasfasergewebe zum Einsatz. Die Qualität der Reinigung des druckbeaufschlagten Wasserdampfes aus der Wirbelschicht mittels Gewebefilter ist ausreichend. Der gereinigte Wasserdampf führt nicht zu Betriebseinschränkungen von Kreislaufgebläse oder Kondensatoren. Mit Hilfe des Gewebefilters wurden bis zu 30 Ma-% der Trockenbraunkohle als Staub abgeschieden und somit an der Wirbelschicht „vorbeigeführt“. Dies erhöht den spezifischen Trocknerdurchsatz.

### Zellenradschleusen für den Ein- und Austrag von Kohle

Stand der Technik für den kontinuierlichen Ein- und Austrag von Schüttgütern in Druckanlagen sind Mehrbehälterschleusensysteme nach dem Lock-Hopper Prinzip. Mit dem Ziel der Senkung der spezifischen Investitionskosten eines Drucktrockners wurden in der Versuchsanlage druckfeste Zellenradschleusen erprobt, die im Großtrockner nach entsprechender Anpassung und Optimierung an Stelle der Mehrbehälterschleusensysteme zum Einsatz kommen sollen. Dafür werden Zellenradschleusen verschiedener Hersteller erprobt. Ziel sind möglichst kostengünstige Systeme, die neben hoher Verfügbarkeit und Standzeiten von mindestens 8000 Stunden bis zur Revision einen geringen Eigenbedarf und geringe Dampfleckagen aufweisen. Der Eintrag der zum Anhaften neigenden Rohfeinkohle bei gleichzeitiger Überwindung des Differenzdruckes zum Trocknersystem stellt eine besondere Herausforderung dar.

Die eingesetzte Eintragungsschleuse hat ein konisch ausgeführtes Zellenrad. Im Betrieb kann der Rotor zur aktiven Einstellung des Spaltmaßes mittels eines Hilfsantriebes seitlich verfahren werden. Die permanent gemessene Stromaufnahme des Hauptantriebes ist ein Maß für den zu überwindenden Reibungswiderstand des Rotors und dient als Parameter für die Einstellung eines minimalen Spaltmaßes zu jedem Betriebszeitpunkt. Den vor allem beim An- und Abfahren auftretenden unterschiedlichen Wärmedehnungen zwischen dem dampfbeheizten Gehäuse und dem Zellenrad selbst sowie dem sich bei längerem Betrieb einstellenden Verschleiß kann so optimal Rechnung getragen werden. Das seitliche Nachfahren des Rotors ermöglicht die Beibehaltung eines Spaltmaßes von ca. 100 µm selbst dann noch, wenn nach sehr langen Betriebszeiten ein Materialabrieb am Zellenrad im Millimeterbereich auftreten sollte. An den Seitenscheiben dieser Zellenradschleuse werden flächenpressende Dichtungen eingesetzt, deren Packungsträger so konzipiert sind, dass sie trotz des seitlichen Verfahrens des Zellenrades immer den gleichen Anpressdruck haben. In Versuchen konnte gezeigt werden, dass die eingesetzte konische Zellenradschleuse geringe Dampfleckagen von 20 bis 30 kg/h aufweist. Das Volumen der getesteten Versuchsschleuse beträgt ca. 4,4 l. Der Hersteller hat auch Erfahrungen im Bau von sehr großen Zellenradschleusen. Daher kann diese Technik ggf. auch für einen Großtrockner zum Einsatz kommen.

Der Trockenbraunkohleaustrag mittels Zellenradschleuse und die folgende rekuperative Trockenbraunkohlewasserkühlung arbeiten bestimmungsgemäß.

#### **Messtechnik und Bilanzierung des Versuchstrockners**

Für die Betriebsführung und zur Bewertung der Druckaufgeladenen Dampfwirbelschicht-Trocknung ist die Versuchsanlage mit umfangreicher Mess- und Sicherheitstechnik ausgestattet. Im Folgenden wird diesbezüglich nur auf einige Besonderheiten eingegangen.

Die exakte Bestimmung der Massenströme der eingetragenen Rohfeinkohle und der ausgeschleusten Trockenbraunkohle ist für die Bilanzierung besonders wichtig. Deshalb wird das Gewicht der Kohlebehälter während des Betriebes permanent erfasst und automatisch gespeichert. Mittels Eichgewichten wurde vor Ort überprüft, dass die Messunsicherheit der eingesetzten Wägezellen im gesamten Messbereich (bis 4000 kg) kleiner als 200 g ist. Die eingesetzten Rohfeinkohlen und die erzeugten Trockenbraunkohlen werden hinsichtlich Wassergehalt und Partikelgrößenverteilung beprobt, so dass die Leistung des Versuchstrockners genau bestimmt werden kann.

Zusammen mit der messtechnischen Erfassung der Daten von Fluidisierungs- und Heißdampf sowie der anfallenden Kohlebrüden (Massenströme, Druck, Temperatur) und der genauen Bestimmung der einzelnen Kondensatmassenströme ist eine umfassende Bilanzierung des Trockners möglich.

Der während des Betriebes erreichte k-Wert einzelner oder aller Versuchstrocknerheizflächen wird mit einer online k-Wert-Bestimmung ermittelt. Dazu werden die Kondensatmassenströme aus den dampfbeheizten Wärmeübertragerflächen unter Einbeziehung der Heißdampfparameter und der sich einstellenden Dampftemperaturen im Trockner erfasst. Auf diese Weise lassen sich die Auswirkungen einer

veränderten Betriebsführung auf die Effektivität des Trocknungsprozesses zeitnah feststellen.

Weiterhin werden die Massenströme nach dem Leckdampfkondensator der Eintrittszellenradschleuse und dem Kondensator nach Austrittszellenradschleuse und Nachverdampfungsbehälter bestimmt. Die Brüden nach den Schleusen sind teilweise stark mit Kohlepartikeln beladen. Daher kam es häufig zu Verschmutzungen im Bereich der entsprechenden Kondensatoren. Eine Umrüstung zu Fallfilmkondensatoren mit zusätzlicher ganzflächiger Benetzung verhindert das Anbacken von Partikeln.

#### **Begleitheizungen und Wirbelschicht-Tauchheizflächen**

Für den Übergang vom atmosphärischen auf den druckaufgeladenen Anlagenbetrieb zeigt sich, dass die Optimierung der Begleitheizungen aller von Kohlebrüden berührten Anlagenkomponenten erforderlich war, um Kondensation durch eine mit der Systemdruckerhöhung einhergehenden Erhöhung der Sattdampftemperatur sicher auszuschließen.

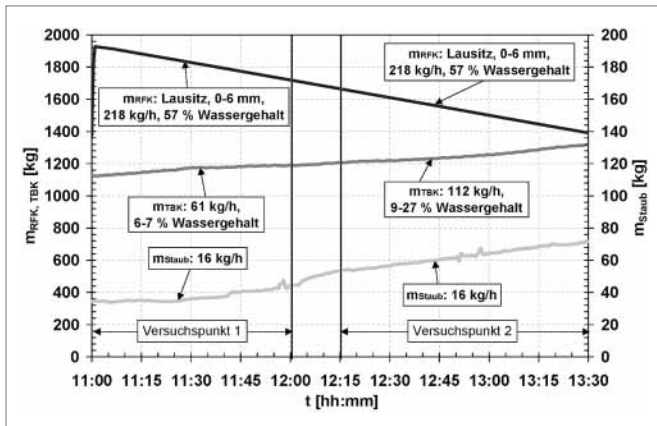
Im Wirbelschichtbereich des Trockners sind Tauchheizflächen angeordnet, mit denen die aufzuwendende Trocknungsenergie an die zu trocknenden Feinkohlen übertragen wird. An diesen Tauchheizflächen erfolgten im Rahmen des Forschungsvorhabens erste Optimierungsschritte. Die Gesamthöhe wurde um ein Drittel reduziert, um eine Übertrocknung der Feinkohlen zu vermeiden. Zur detaillierten Analyse der erreichbaren k-Werte in Abhängigkeit vom Einbauort innerhalb der Wirbelschicht wurden die verbleibenden Tauchheizflächen in 4 Segmente unterteilt, deren k-Werte zeitgleich mit Hilfe der oben beschriebenen online k-Wert-Bestimmung erfasst werden. Es zeigte sich, dass zwischen den integralen k-Werten des gesamten Wärmeübertragers und den k-Werten der einzelnen Segmente deutliche Unterschiede auftreten können.

Bisher waren an den Tauchheizflächen des Versuchstrockners weder nennenswerte Erosion noch bleibende Verschmutzungen und Anbackungen (Fouling) zu erkennen. Auch konnten die Auswirkungen von negativen Randeffekten im Bereich zwischen Trocknerwand und Heizflächen nicht nachgewiesen werden.

#### **Verfahrensnachweis**

Nach umfangreichen Referenzversuchen zur atmosphärischen Trocknung von Rohfeinkohlen aus dem Mitteldeutschen und dem Lausitzer Braunkohlerevier und der Entwicklung von Anlagentechnik und Betriebsregime der Versuchsanlage laufen seit 2005 Versuche, bei denen die Effekte der Wirbelschicht-Trocknung unter Druck untersucht werden.

Der Verfahrensnachweis für die Druckaufgeladene Dampfwirbelschicht-Trocknung von Rohfeinkohle im Technikummaßstab wurde erbracht. Dabei war von besonderem Interesse, dass dieser Nachweis in einer kontinuierlich arbeitenden Anlage erfolgte. Abb. 6 zeigt exemplarisch die beständige Abnahme der zu trocknenden Rohfeinkohle von einem Versuchstag. Gleichzeitig nimmt die Menge der erzeugten Trockenkohle und des Staubes sukzessive zu. Bei der Versuchsanlage werden die erzeugten Produkte Trockenbraunkohle und Staub in einem Behälter zusammengeführt. In künftigen Drucktrocknern können diese je nach Verwendungszweck getrennt aus der Anlage geführt werden.

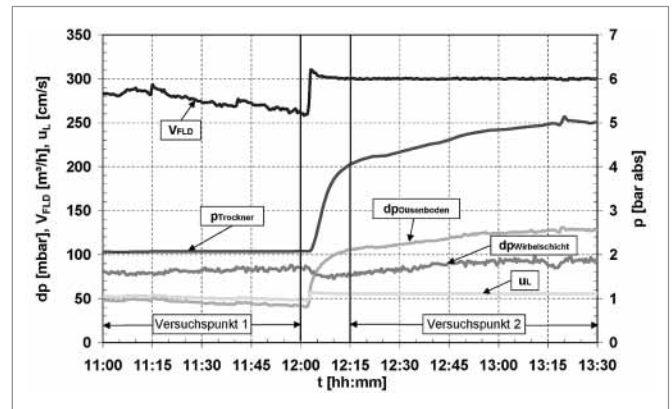


**Abbildung 6:**  
Exemplarischer Verlauf der Massenströme Rohfeinkohle, Trockenbraunkohle und Staub im Versuchsbetrieb

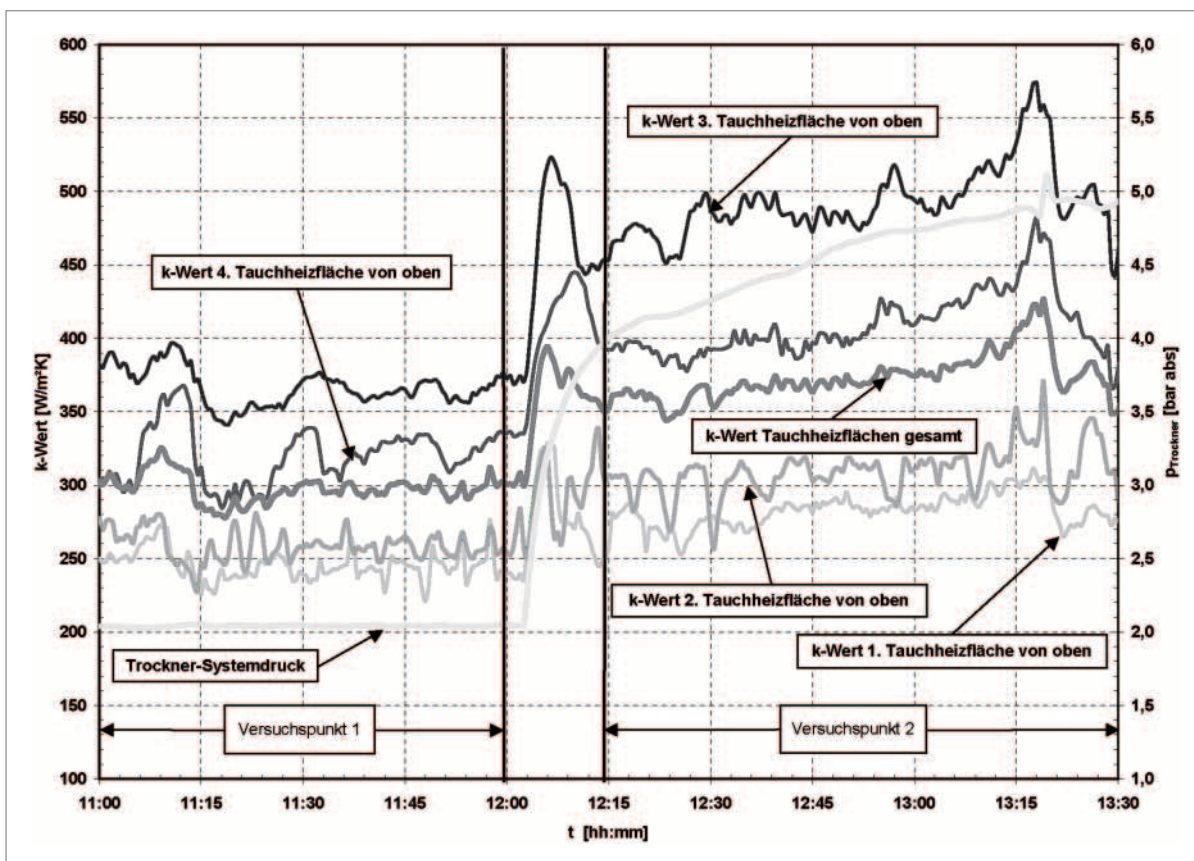
Die zu diesem Versuchstag gehörenden Fluidisierungsparameter zeigt Abb. 7. Besonders deutlich wird das Ansteigen des Druckverlustes des Wirbelschichtdüsenbodens aufgrund der Dichtezunahme des Fluidisierungsmittels bei steigendem Systemdruck.

Die vorausberechnete Erhöhung des  $k$ -Wertes als wesentlicher Auslegungsparameter eines Wirbelschicht-Trockners durch Anhebung des Trockner-Systemdrucks und/oder Verminderung der Partikelgröße,

konnte experimentell nachgewiesen werden. Dies zeigen die Daten aus dem Versuchsbetrieb in Abb. 8. Die Änderungen der  $k$ -Werte als Reaktion auf eine Druckerhöhung wird deutlich erkennbar. Alle anderen Parameter des Trocknungsbetriebes, wie z.B. Heizdampfdruck, Kohledurchsatz und Leerrohrgeschwindigkeit des Fluidisierungsmittels wurden bei diesem Versuch konstant gehalten. Des Weiteren werden unterschiedliche spezifische Wärmedurchgangskoeffizienten über der Trockner-Tauchheizflächenhöhe deutlich. Diese bilden die Grundlage für weiterführende Optimierungen der Heizflächen.



**Abbildung 7:**  
Exemplarischer Verlauf der Fluidisierungsparameter abhängig von Trocknerdruck

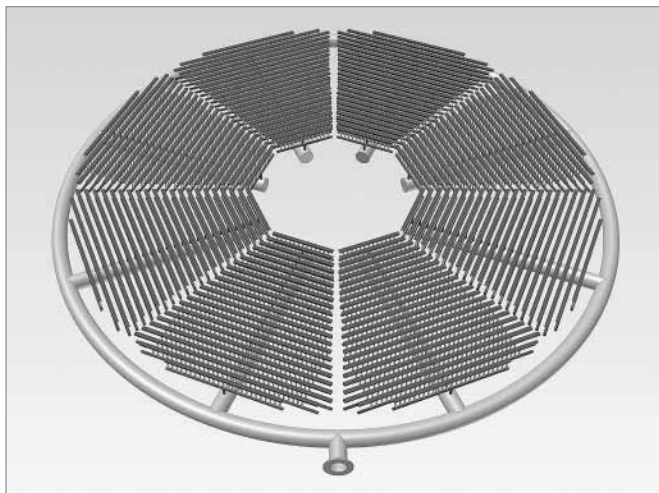


**Abbildung 8:**  
Exemplarischer Verlauf der  $k$ -Werte der Tauchheizfläche abhängig vom Trocknerdruck

### 3.4 Scale up der Trocknungstechnologie

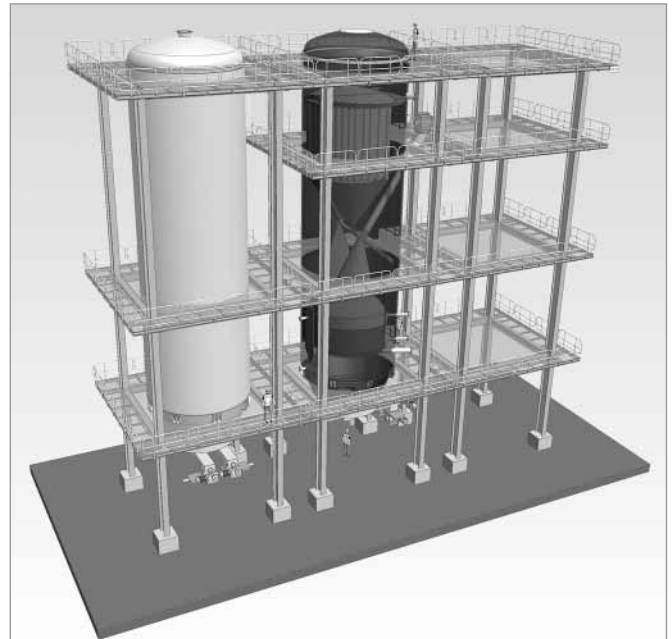
Ein Schwerpunkt für die Realisierung künftiger Braunkohlekraftwerkstechnologien ist eine Großtrockneranlage, die den gesamten Brennstoffbedarf eines Kraftwerksblocks zur Verfügung stellt. Aufbauend auf den Erkenntnissen und Erfahrungen, die mit der DDWT-Versuchsanlage an der BTU Cottbus gesammelt wurden, ist der nächste verfahrenstechnische Schritt ein scale up Nachweis der Trocknungstechnologie. Dieser soll mit der Realisierung einer Großtechnischen Versuchsanlage (GTVA) erfolgen. Dafür wird z.Z. das F+E-Vorhaben „Konzeptentwicklung für eine Großtechnische Versuchsanlage zur Druckaufgeladenen Dampfwirbelschicht-Trocknung von Braunkohlen“ bearbeitet. Daran sind die Partner ALSTOM Power Boiler GmbH, Babcock-Hitachi Europe GmbH, Babcock Power Service GmbH, STEINMÜLLER Instandsetzung Kraftwerke GmbH, CEBra, Magdeburger Förderanlagen und Baumaschinen mbH, Hochschule Zittau/Görlitz, Siemens AG, Vattenfall Europe Generation AG & Co. KG, Vattenfall Europe Mining AG, Vattenfall Power Consult und die BTU Cottbus beteiligt.

Um die Wirbelschicht sicher beherrschen zu können, wird im Großtrockner die Wirbelschichtgrundfläche in mehrere Module unterteilt. In Abb. 9 ist diese Aufteilung am Beispiel des Düsenbodens dargestellt. Zwei Module werden in der GTVA realisiert.



**Abbildung 9:**  
Modulaufteilung eines Großtrockners am Beispiel des Düsenbodens

Mit der GTVA sollen die an der Versuchsanlage der BTU Cottbus erhaltenen Mess- und Versuchsergebnisse validiert werden. Des Weiteren werden Komponenten und Anlagentechnik zur Sicherung einer hohen Verfügbarkeit erprobt. Durch eine Langzeiterprobung ist die Dauerbetriebsreife nachzuweisen. Die GTVA hat einen Rohbraunkohledurchsatz von ca. 70 t/h mit einer Wirbelschichtgrundfläche von insgesamt ca. 14 m<sup>2</sup>. Um die oben genannte in Modulbauweise realisieren zu können ist ein Trockner mit einem Durchmesser von ca. 5 m notwendig. Die Höhe des Trockners beträgt ca. 20 m. In Abb. 10 ist die Gesamtansicht der GTVA dargestellt. Es sind v. l. n. r. der Trockenbraunkohlespeicher, der Drucktrockner und Platzbedarf für weitere Komponenten, z. B. Regelungsorgane, Brüdenumlaufgebläse usw. abgebildet.



**Abbildung 10:**  
Gesamtansicht der GTVA mit Trockenbraunkohlespeicher und Freiraum für periphere Komponenten

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Nach erfolgreicher Durchführung erster Verbrennungsversuche unter Oxyfuel-Bedingungen und der Ertüchtigung und Erweiterung der bestehenden Technikanlage zum Oxyfuel-Prozess ist die Anlage im August 2006 in Betrieb genommen worden. Daran schließen sich umfangreiche theoretische und experimentelle Untersuchungen im Rahmen des zweijährigen Forschungsvorhabens „Verbrennung von Lausitzer Braunkohle unter Oxyfuel-Prozessbedingungen in der 0,5 MW<sub>th</sub> Tangentialfeuerung“ an, die gemeinsam mit den anderen Projektpartnern die wissenschaftlich-technischen Grundlagen des Oxyfuel-Prozesses untersuchen. Ziel ist die Maximierung der Kohlendioxidkonzentration im Abgas (> 90 %), sowie die Minimierung des Sauerstoffgehalts und der im Abgas enthaltenen Schadgase SO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub>. Weiterhin sollen prozessspezifische Anlagenteile wie der Rauchgaskondensator und die heiße Rauchgasrückführung für den großtechnischen Einsatz erprobt werden. Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens werden u. a. für den Bau und den Versuchsbetrieb der 30 MW-Oxyfuel-Demonstrationsanlage der Vattenfall Europe Generation AG & Co. KG in Schwarze Pumpe genutzt.

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Entwicklung eines Braunkohlekraftwerkskonzeptes mit integrierter druckaufgeladener Dampfwirbelschichttrocknung und Brennstoffzelle“, dass an der BTU Cottbus bearbeitet wird, wurde ein 0,5 t/h Versuchstrockner errichtet und in Betrieb genommen. Neben theoretischen werden an dem Versuchstrockner umfangreiche experimentelle Untersuchungen für den atmosphärischen und druckaufgeladenen Betrieb durchgeführt. Damit wird die Basis geschaffen, um anhand der gewonnenen Mess- und Versuchsergebnisse eine Großtechnische Versuchsanlage detailliert planen zu

können. Das Konzept für das scale up der Trocknungstechnologie wird z. Z. in einem laufenden Forschungsvorhaben entwickelt. Nach dem Bau und erfolgreichem Betrieb einer Großtechnischen Versuchsanlage ist der Einsatz eines Großtrockners möglich. Mit einer wirtschaftlich und energetisch optimierten Trocknung ist auch eine solide Brennstoffgrundlage für künftige effiziente kohlendioxidfreie Kraftwerkskonzepte auf der Basis von Braunkohle geschaffen.

## Literatur

- [1] **GRIEBE, S.; KRAUTZ, H. J.; 2001:** Development of a cycloid firing system for lignite and co-combustion of sewage sludge and biomass with high efficiency and low emission. 18<sup>th</sup> International Pittsburgh Coal Conference, Newcastle (Australia).
- [2] **KRAUTZ, H. J.; GRIEBE, S.; KAB, H.; KLUGER, F.; 2005:** Konzeptengineering für den Umbau der CEBra – Technikanlage zum Oxyfuel-Prozess. Unveröffentlicht.
- [3] **HASSA, R.; 2005:** Der Oxyfuel-Prozess als ein Weg in die Clean – Coal – Initiative. Vortrag anlässlich des „Clean Coal“ – Symposiums der BTU Cottbus, Cottbus, 2005.
- [4] **ALTMANN, H.; STAMATELOPOULOS, G.-N.; 2005:** Steps towards the minimisation of CO<sub>2</sub> emissions from coal-fired power plants. Conference and Exhibition for the European Power Generation Industry, POWER-GEN Europe 2005, Milan (Italy), 2005.
- [5] **GRIEBE, S.; KRAUTZ, H. J.; 2005:** Erste Verbrennungsversuche zum Oxyfuel-Prozess in einer 0,5 MW<sub>th</sub> – Tangentialfeuerung. Beitrag zum 22. Deutschen Flammentag. VDI-Berichte 1888. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2005, 71-78.
- [6] **GRIEBE, S.; KRAUTZ, H. J.; 2001:** Untersuchungen zur Verbrennung von Braunkohle und Mischbrennstoffen in einer Zykloidfeuerung. Unveröffentlicht, 2001
- [7] **MARTIN, J. S.; LÖFFLER, S.; KRAUTZ, H. J.; 2003:** Druckaufgeladene Dampfwirbelschicht-Trocknung grubenfeuchter Braunkohle – Innovatives Verfahren zur Erhöhung des Kraftwerkswirkungsgrades und Reduzierung der Stromgestehungskosten. Beitrag zum 21. Deutschen Flammentag. In: VDI-Berichte 1750. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 543-551.
- [8] **LÖFFLER, S.; MARTIN, J. S.; 2002:** Untersuchung zu den Einflussgrößen auf die Wärmeübertragung bei der Druckaufgeladenen Dampfwirbelschichttrocknung von Braunkohle. Beitrag zur Tagung Braunkohle-Dampfwirbelschichttrocknung. In: Tagungsband. VDI Dresdener Bezirksverein e.V.
- [9] **MARTIN, J. S.; HÖHNE, O.; KRAUTZ, H. J.; MANDEL, H.; 2004:** Druckaufgeladene Dampfwirbelschichttrocknung von Braunkohlen – Inbetriebnahme und erste Untersuchungsergebnisse am Versuchstrockner der BTU Cottbus. Beitrag zum XXXVI. Kraftwerkstechnische Kolloquium. In: Tagungsband. Institut für Energietechnik der Technischen Universität Dresden.
- [10] **MARTIN, J. S.; HÖHNE, O.; KRAUTZ, H. J.; MANDEL, H.; 2005:** Druckaufgeladene Dampfwirbelschicht-Trocknung als Weg zur Effizienzsteigerung in Braunkohlekraftwerken: Betriebsergebnisse vom Versuchstrockner der BTU Cottbus. Beitrag zum 22. Deutschen Flammentag. In: VDI-Berichte 1888. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 565-572.
- [11] **MARTIN, J. S.; HÖHNE, O.; KRAUTZ, H. J.; MANDEL, H.; 2005:** Druckaufgeladene Dampfwirbelschichttrocknung als Weg zur Effizienzsteigerung in Braunkohlekraftwerken: Neueste Betriebsergebnisse vom Versuchstrockner der BTU Cottbus. XXXVII. Kraftwerkstechnische Kolloquium. In: Tagungsband. Institut für Energietechnik der Technischen Universität Dresden.
- [12] **BUSCHSIEWEKE, F.; KÖNIG, J.; 1999:** Untersuchungen zur Braunkohletrocknung in einer druckaufgeladenen Dampfwirbelschicht. Beitrag zu: Entwicklungslinien der Energie- und Kraftwerkstechnik. In: VDI-Berichte 1495. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 273-286.

Helge Kaß, Steffen Griebe, Olaf Höhne,  
Jörg S. Martin, Herbert Ristau, Hans Joachim Krautz  
Lehrstuhl Kraftwerkstechnik



**Dipl.-Ing. Helge Kaß** (30) studierte von 1996 bis 2004 Umweltingenieurwesen und Verfahrenstechnik mit der Vertiefung Energieverfahrenstechnik an der BTU Cottbus. Er ist seit 2004 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Kraftwerkstechnik der BTU Cottbus und beschäftigt sich hauptsächlich mit der Entwicklung von Kraftwerkstechnologien zum Oxyfuel-Prozess.



**Dipl.-Ing. Jörg S. Martin** (39) studierte in Zittau und Stuttgart Maschinenbau/Energietechnik. Nach Projekten in den Bereichen kommunaler Energieversorgungskonzepte (Hirschberg a.d.B.) und solarer Wasseraufbereitung (Toledo, Spanien) arbeitete er von 1998 bis 2001 am Energieressourcen-Institut in Jänschwalde an der Entwicklung und Erprobung eines mehrstufigen Biomasse-Festbettvergasers mit Crackstufe für höhere Kohlenwasserstoffe (Teere) zur Erzeugung eines motorfähigen Schwelgases für die Kraft-Wärme-Kopplung. Anschließend begann seine Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Kraftwerkstechnik der BTU Cottbus mit dem Schwerpunkt Entwicklung und Erprobung einer Druckaufgeladenen Dampfwirbelschicht-Trocknungsanlage für Braunkohlen.



**Dipl.-Ing. Steffen Griebe** (37) studierte von 1990 bis 1995 Verfahrenstechnik mit der Vertiefung Energie- und Umweltverfahrenstechnik an der Technischen Hochschule Zittau und der Bergakademie TU Freiberg. Von 1996 bis 1997 war er als Entwicklungingenieur der Fa. L. & C. Steinmüller GmbH im Geschäftsbereich Forschung und Entwicklung tätig; Betreuung von industriellen Entwicklungsvorhaben im Bereich der Energie- und Umwelttechnik, insbesondere der Wirbelschichttechnologie, Zyklidfeuererzeugung, Druckkohlenstaubfeuerung und Abgasreinigung. Anschließend nahm er die Tätigkeit als Projektingenieur am Energieressourcen-Institut e. V. auf und war für die Industrieforschungsvorhaben zur Entwicklung der Zyklidfeuererzeugungstechnologie und zu Untersuchungen eines Wanderbettfilters verantwortlich. Seit 2002 übernahm er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Kraftwerkstechnik der BTU Cottbus hauptsächlich die Aufgaben zur Koordinierung und Durchführung der Entwicklungsarbeiten zum Oxyfuel – Prozess und führt Arbeiten zur Modellierung der Zyklidbrennkammer durch.



**Dr.-Ing. Herbert Ristau** (57) studierte von 1968 bis 1971 Automatisierungstechnik an der Fachschule in Hennigsdorf/Berlin und von 1974 bis 1980 Informationstechnik an der Technischen Universität Dresden. In der Zeit von 1972 bis 1974 und von 1980 bis 1990 arbeitete er als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Dampferzeuger und Turbinen im Institut für Kraftwerke in Vetschau/VEAG. Von 1991 bis 1996 war er als wissenschaftlicher Assistent an der Brandenburgischen Technischen Universität, Fakultät Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik tätig. 1996 promovierte er. Seit 1997 ist er in der Fakultät Elektrotechnik und Maschinenbau als Leiter des Technikums am Lehrstuhl Kraftwerkstechnik tätig.



**Dipl.-Ing. Olaf Höhne** (31) studierte von 1996 bis 2000 Ver- und Entsorgungstechnik mit der Vertiefung Technische Gebäudeausrüstung an der Fachhochschule Lausitz. Anschließend absolvierte er bis 2003 ein Aufbaustudium an der Technischen Universität Dresden im Studiengang Maschinenbau, Studienrichtung Energietechnik. Seit 2003 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Kraftwerkstechnik der BTU Cottbus und beschäftigt sich hauptsächlich mit den wissenschaftlichen Grundlagen von druckaufgeladenen Trocknungsprozessen für Braunkohlen.



**Prof. Dr.-Ing. H. J. Krautz** (53) studierte von 1974 bis 1978 Thermischen und hydraulischen Maschinenbau/Gas- und Dampfturbinenkonstruktion an der Technischen Universität Dresden. Von 1978 bis 1995 war er in mehreren Unternehmensbereichen des ostdeutschen Energieverbundunternehmens VEAG Vereinigte Energiewerke AG Berlin tätig. Innerhalb der VEAG Beteiligung an der Inbetriebnahme der Großkraftwerke Boxberg und Jänschwalde und mehrere Jahre Forschungs- und Entwicklungstätigkeit u. a. als Mitarbeiter, Gruppenleiter und Teilbereichsleiter im Ingenieurunternehmen für Kraftwerks-, Energie- und Umwelttechnik (VEAG/IFK) Vetschau – in dieser Zeit (1987) Promotion an der TH Zittau – und von 1991 bis 1995 Projektverantwortlicher für die Entscheidung neuer Kraftwerkskonzepte mit Druckwirbelschichtfeuerung in der Hauptverwaltung Berlin. 1996 übernahm er die Leitung des Lehrstuhls Kraftwerkstechnik an der BTU Cottbus. Die derzeitigen Lehr- und Forschungstätigkeit liegen in den Bereichen druckbeaufschlagter Prozesse der Energieumwandlung, Modellierung und Komponentenentwicklung neuer Kraftwerkstypen mit deutlich reduzierten CO<sub>2</sub>-Emissionen. Er ist Mitglied des wissenschaftlichen Beirates der VGB (seit 1998), Mitglied im Vorstand VDI-GET (seit 2003), Mitorganisator des Deutschen Flammentags (seit 2003), Mitglied im Combustion Institut Pittsburgh/PA (USA) Deutsche Sektion und Vorstandssprecher des CEBra e.V. (seit 2006).