

50 kW_{th} Oxyfuel-Staubfeuerungsversuchsanlage

Stand der experimentellen Untersuchungen

Dipl.-Ing. **S. Weigl**, TU Dresden, Dresden;
Dipl.-Ing. **R. Wilhelm**, TU Dresden, Dresden;
Dipl.-Ing. **S. Hellfritsch**, TU Dresden, Dresden;

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird die Staubfeuerungsversuchsanlage an der TU Dresden vorgestellt. Die Anlage hat eine thermische Leistung von 50 kW_{therm} und bietet neben der konventionellen Betriebsweise mit Luft auch verschiedene Möglichkeiten, die Verbrennung von Kohlestaub mit reinem Sauerstoff und rezirkulierten Rauchgas („Oxyfuel“) zu untersuchen. Nach einer Erläuterung von Anlagenkonzept und Betriebsweise werden erste Ergebnisse von Versuchsfahrten mit Trockenbraunkohle sowie der numerischen Verbrennungssimulation vorgestellt.

1. Grundkonzept und Betriebsweise der Versuchsanlage

An der TU Dresden wurde im Rahmen des Forschungsprojektes ADECOS an der Professur für Kraftwerkstechnik eine Versuchsanlage mit 50 kW Feuerungswärmeleistung ertüchtigt, in der Braunkohlenstaub auch nach dem Oxyfuel-Prinzip mit reinem Sauerstoff und rezirkuliertem Rauchgas verbrannt werden kann.

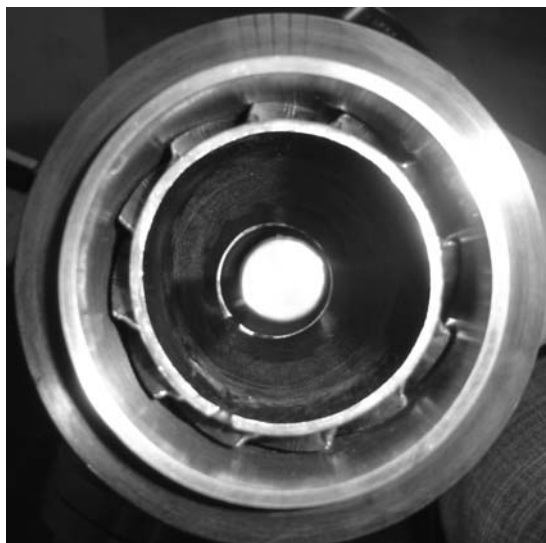
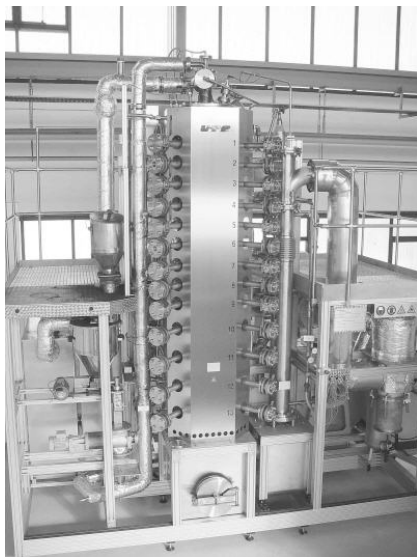


Bild 1a: Gesamtansicht der 50 kW_{therm} Staubfeuerungsversuchsanlage

Bild 1b: Frontalansicht Oxyfuel-Brenner

Die Inbetriebnahme erfolgte im März 2006. Das Anlagenkonzept beinhaltet bereits wesentliche Prozessvorschläge für ein mögliches Oxyfuel-Großkraftwerk [1]:

- Brennstofftransport zum Brenner mit einem Teilstrom der rezirkulierten Rauchgase
- Rezirkulation ohne vorherige Trocknung der Rauchgase
- Wiederaufwärmung der Rezirkulationsgase vor dem Brenner
- Anordnung der Entstaubung und Gebläse im kälteren Rauchgasabschnitt

Grundvoraussetzung für die Untersuchung von Oxyfuel-Betriebszuständen ist die Vermeidung von Luftteinbrüchen in den Prozess. An der Versuchsanlage sind die Rauchgaskanäle und Nebenanlagen daher weitestgehend gasdicht ausgeführt. Speziell konstruierte Messöffnungen verhindern zudem das Eindringen von Falschluff während des An- und Absetzens von Messsonden.

Kern der Versuchsanlage ist eine 2,5 Meter lange, senkrecht angeordnete zylindrische Brennkammer mit einem Innendurchmesser von 290 mm. Die 5 Brennkammersegmente sind mit einer keramischen Schutzschicht ausgekleidet und im Außenmantel jeweils separat durch Luft gekühlt [2]. Der Deckenbrenner für Kohlestaub ist als Drallbrenner konzipiert und basiert auf CFD-Analysen für verschiedene Betriebszustände. Er ist hinsichtlich der Zuführung von Primär- und Sekundärgasgemischen sowie zusätzlicher Sauerstoffeindüsungen weitgehend flexibel gestaltet. Der Brennkammer ist ein Rauchgaskühler nachgeschaltet, in welchem das Rauchgas auf etwa 200 °C gekühlt wird. In dem sich anschließenden Kerzenfilter wird Flugasche aus dem Rauchgasstrom entfernt, die Abreinigung der Filter erfolgt im Oxyfuel-Modus mit Kohlendioxid. Nach dem Filter wird der Rauchgasstrom geteilt. Die eigentliche Rauchgasmenge fördert der Saugzug, welcher auch die Druckregelung der Anlage übernimmt, zum Kamin oder den nachgeschalteten Versuchsanlagen. Der größere Rezirkulationsanteil wird dagegen durch einen Ventilator wieder zum Brenner befördert. Dazu wird die Rauchgasrezirkulation auf einen primären und sekundären Rezirkulationsstrang verteilt. Diese führen unterschiedliche Rauchgasmengen und können jeweils bis 400 °C beheizt werden. Mit der Primärrezirkulation wird der Brennstoff zum Brenner gefördert. Die Zuteilung erfolgt aus dem Kohlestaubbunker heraus mittels Dosierschnecke sowie einer nachgeschalteten Zellenradschleuse. Im Oxyfuel-Modus kommt auch der Sekundärstrang der Rauchgasrezirkulation zum Einsatz, dieser führt den Großteil der Rezirkulationsmenge und ist damit die Hauptstellgröße für die unterschiedlichen zu untersuchenden Betriebsfälle. Die Sauerstoffzugabe kann in beide Rezirkulationsströme

erfolgen. Im sekundären Rauchgasweg ist dafür eine entsprechende Vormischkammer im Brenner vorhanden, über die auch der Hauptteil des Sauerstoffs eingebracht wird. Im Gegensatz dazu besitzt der mit Kohlestaub beladene Primärstrang eine Zentrallanze, welche am Brennermund endet und vorrangig zur Stabilisierung der Flamme eingesetzt wird. Für erste Versuche ist die Zentrallanze noch nicht in Benutzung gewesen.

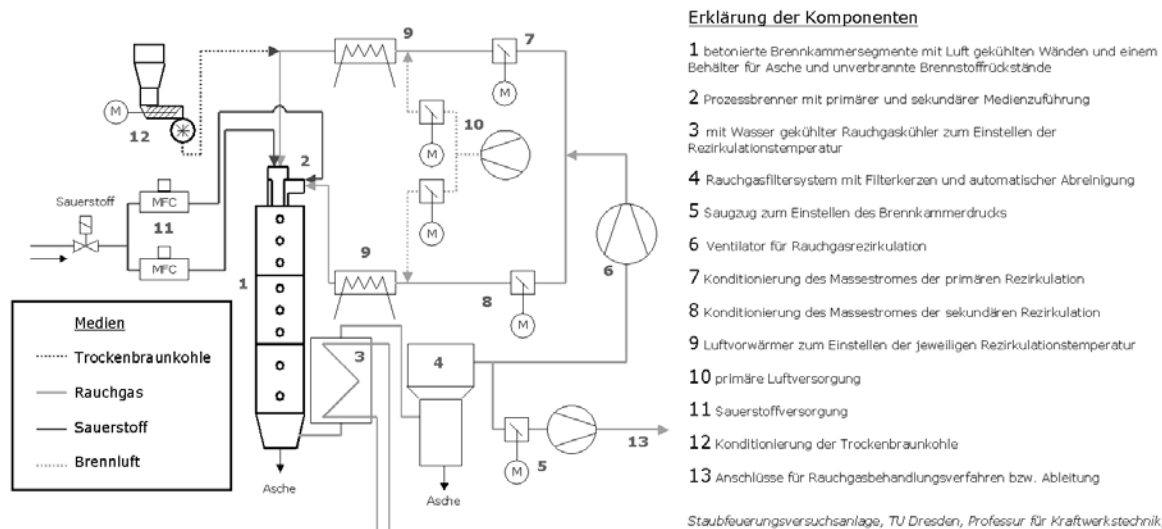


Bild 2: Fließschema der Staubfeuerungsversuchsanlage

Mittels eines ebenfalls vorhandenen Frischluftventilators kann die Versuchsanlage auch im konventionellen Luftbetrieb gefahren werden. Der Brennstofftransport erfolgt dabei entweder mit rezirkuliertem Rauchgas oder Frischluft. Der Frischluftventilator kann auch für die gezielte Zugabe von Falschluff benutzt werden, um beispielsweise den Einfluss auf die Schadstoffreduktionsmechanismen bei der Rezirkulation von Rauchgasen zu untersuchen. Weitere Forschungsaspekte sind der Übergang zwischen den Verbrennungsmodi „Luft“ und „Oxyfuel“ (z.B. zum Anfahren einer Großanlage) und das dynamische Verhalten des Gesamtsystems.

Alle Teile der Anlage werden durch eine SPS gesteuert, die Bedienung erfolgt vom Leitrechner aus. Für die verschiedenen Versuchsmessungen mittels Sonden und mobiler Messgeräte ist weitere Auswertetechnik installiert.

Ein typischer Anfahrvorgang der Anlage umfasst das Umwälzen von Heißluft, Vorheizen mit Gas und die anschließende Zündung der Kohleflamme. Nach Erreichen eines stationären Betriebszustandes kann in den Oxyfuel-Betrieb übergegangen werden. Die Ablaufsteuerung der SPS ermöglicht dabei den stufenlosen Übergang zwischen den Betriebspunkten anhand vorzugebender Kennlinien.

Das Oxyfuel-Rauchgas aus der Staubfeuerungsversuchsanlage kann direkt in angeschlossenen Anlagen für weitere Forschungsarbeiten genutzt werden. Beispielsweise wird der Einfluss der geänderten Rauchgaszusammensetzung in einer modular aufgebauten Kalkstein-REA untersucht, welche verschiedene Anlagenkonzepte vom Sprühturm über das Zweikreisverfahren bis zum Gasblasenwäscher nachbilden kann. Für die Zukunft ist auch der Betrieb einer Destillationskolonne mit verdichtetem Rauchgas als innovativer Ansatz zur Entschwefelung von Oxyfuel-Rauchgasen vorgesehen.

2. Systematik der Versuchsdurchführung und erste Ergebnisse

Bereits bei ersten Versuchen im Oxyfuel-Modus mit Trockenbraunkohlestaub konnten Kohlendioxidkonzentrationen von bis zu 95% (trocken) im Rauchgas gemessen werden. Die Hauptverunreinigungen sind Sauerstoff, welcher aus der überstöchiometrischen Verbrennung resultiert, sowie SO_2 , CO und NO_x . Eine Bilanzierung ergab, dass im Rahmen der Vertrauensintervalle für die Mess- und Stellwerte kein Falschlufteinbruch nachweisbar ist.

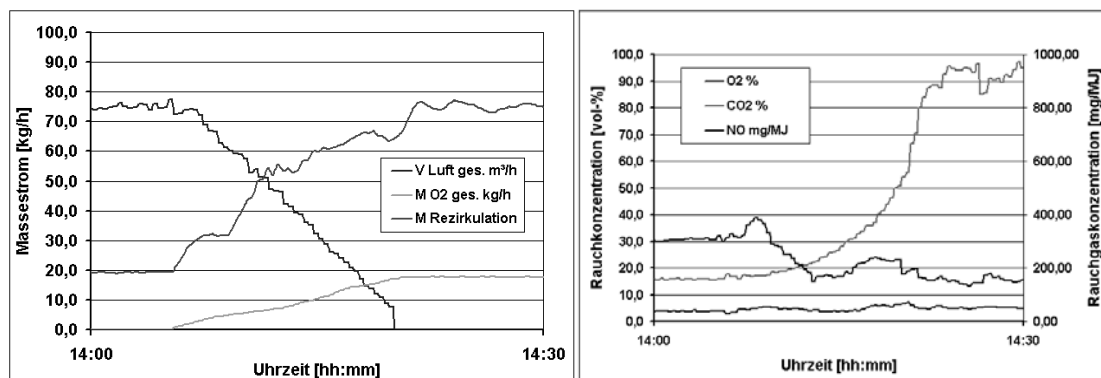


Bild 3a: Masseströme beim Umschaltprozess

Bild 3b: Rauchgaskonzentrationen beim Umschaltprozess

Gegenstand erster Untersuchungen war unter anderem das dynamische Anlagenverhalten beim Umschaltvorgang von Luft zu Oxyfuel. In den Abbildungen 3a und 3b ist ein solcher Umschaltprozess mit realistischem Sauerstoffüberschuss dargestellt.

Es zeigte sich nach mehrmaliger Wiederholung, dass durch die Rückführung von überschüssigem Sauerstoff während der Erhöhung der Rezirkulationsmenge ein temporärer Anstieg der Sauerstoffkonzentration im Rauchgas zu verzeichnen ist. Übertragen auf eine Großanlage bedeutet dieses dynamische Phänomen, dass während der Umschaltphase beträchtliche Einsparungen an Sauerstoff möglich sind, weil der notwendige O_2 -Überschuss teilweise aus der stetig steigenden Rauchgasrezirkulation gedeckt werden kann.

In Abbildung 3b ist ebenfalls gut zu erkennen, dass die bezogenen Emissionen von NO_x im Oxyfuel-Betrieb um etwa ein Drittel geringer sind als bei Verbrennung mit Luft. Dies hängt nur zum Teil mit dem fehlenden Luftstickstoff zusammen, vielmehr wird bereits gebildetes NO_x durch die Rauchgasrezirkulation und damit Rückführung in die Flamme wieder zersetzt. Der Versuchsplan für den nächsten Projektabschnitt umfasst im wesentlichen sogenannte Kennfeldversuche und Messungen in der Brennkammer zur Validierung von Simulationsergebnissen. Für eine bessere Vergleichbarkeit und Nachvollziehbarkeit wurden einige Definitionen aufgestellt (vgl. Bild 4).

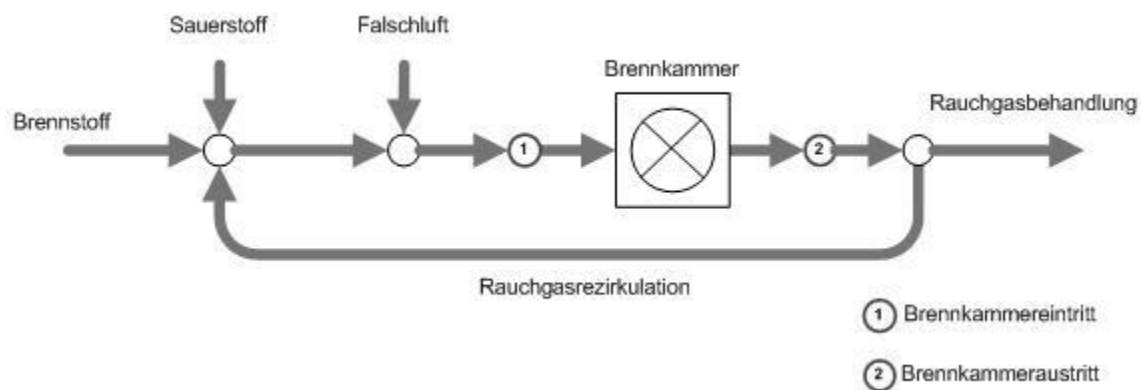


Bild 4: Definition der Punkte um die Brennkammer

Eine grundsätzliche Kennzeichnung unterschiedlicher Oxyfuel-Betriebsfälle soll über den Gesamtsauerstoffgehalt (feucht) am Brenneraustritt inklusive möglicherweise vorhandener Falschluff erfolgen. Eine sich ergebende Summe von 23 Prozent Sauerstoff (feucht) am Punkt 1 (Bild 4) würde damit als *Oxyfuel 23* bezeichnet. Der in Bild 3 gegen Ende des Umschaltvorgangs vorliegende Betriebsfall besitzt einen Sauerstoffgehalt von 25 % am Brenner. Die vorgeschlagene Definition erscheint von allen möglichen Varianten am sinnvollsten für den Vergleich und die Charakterisierung von Zündeigenschaften in Oxyfuel-Gasatmosphäre. Darüber hinaus erübrigt sich eine explizite Angabe des Rezirkulationsverhältnisses, da dieses je nach Sauerstoffbedarf des Brennstoffs und spezifischer Rauchgasmenge nicht vergleichbar ist.

Die zweite Kenngröße zur eindeutigen Festlegung eines Oxyfuel-Betriebspunktes ist die Sauerstoffkonzentration (feucht) am Brennkammerende (Punkt 2 in Bild 4). Über diesen Kennwert können Vergleiche hinsichtlich des Ausbrandverhaltens hergestellt werden, insbesondere zur äquivalenten Verbrennung mit Luft. Beachtet werden muss, dass durch den höheren Wassergehalt und den fehlenden Stickstoff im Oxyfuel-Rauchgas die trocken gemessenen Werte höher sind als bei konventioneller Verbrennung mit Luft.

Ziel der Untersuchungen an der TU Dresden ist die Aufnahme eines vollständigen Oxyfuel-Kennfeldes für die im Projekt ADECOS zu untersuchenden Trockenbraunkohlen, je eine aus dem Lausitzer und dem Rheinischen Revier. Dazu werden der Sauerstoffgehalt am Brenner im Bereich von 17 bis 35 % (feucht) sowie die Konzentration am Brennkammerende von 2 bis 6 % (feucht) variiert (Oxyfuel 17 bis Oxyfuel 35 mit jeweils 2 bis 6 % Restsauerstoff). Hinzu kommt die Untersuchung des Einflusses von Falschluff auf den Prozess für ausgewählte Betriebsfälle. In jedem untersuchten Punkt werden die Rauchgas- und Aschezusammensetzung analysiert. Mittels Ansatzproben, welche an mehreren Positionen und damit verschiedenen Temperaturen in die Brennkammer eingebracht werden, können zudem etwaige Veränderungen der Schlackezusammensetzung (z.B. erhöhte Karbonatbildung) untersucht werden.

Mit den gewonnenen Erkenntnissen lassen sich unter anderem Vorgaben für die Konstruktion und den Betrieb von Oxyfuel-Dampferzeugern sowie die Planung späterer Großanlagen ableiten.

3. Simulation der Verbrennungsvorgänge in der Staubfeuerungsversuchsanlage (SVA)

Parallel zu den experimentellen Untersuchungen erfolgen Modellierung und numerische Simulation der Verbrennungsvorgänge. Dazu wird das kommerzielle CFD-Programm FLUENT[®] verwendet. Ziel ist vor allem die Untersuchung der Brennkammer hinsichtlich der Temperatur-, Geschwindigkeits-, Druck-, Partikel- (Bild 5) und Speziesverteilung im Versuchsreaktor. Die Ergebnisse der Simulation sind anhand der Versuchsdaten der Staubfeuerungsversuchsanlage zu validieren.

Für die Modellierung ist ein 3D-Geometriemodell erstellt worden, das die Brennkammer inklusive der Brennergeometrie der SVA nachbildet. Das Geometriemodell wird mit dem Programm Gambit[®] vernetzt und besteht aus ca. 500.000 Zellen. In Bild 5 ist das 3D-Modell der schlanken zylindrischen Brennkammer mit Flugbahnen einiger aus dem Drallbrenner ausströmenden Braunkohlenpartikel (Flugrichtung auf den Betrachter zu) dargestellt und die Gitterstruktur der Brennkammer angedeutet.

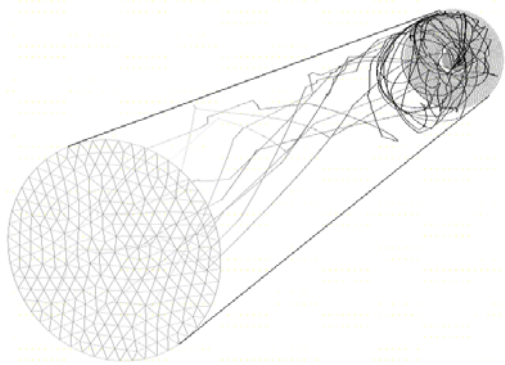


Bild 5: Brennkammer der SVA mit Partikelbahnen und Gitterstruktur

Zur Validierung des CFD- Modells werden an der Staubfeuerungsversuchsanlage sowohl in radialer als auch in axialer Ebene Temperatur- und Gasemissionsmessungen durchgeführt [3]. Als Referenzversuch ist zunächst ein mittlerer Oxyfuel-Versuch (25 Vol.-% Sauerstoff am Brennkammereintritt) gewählt worden.

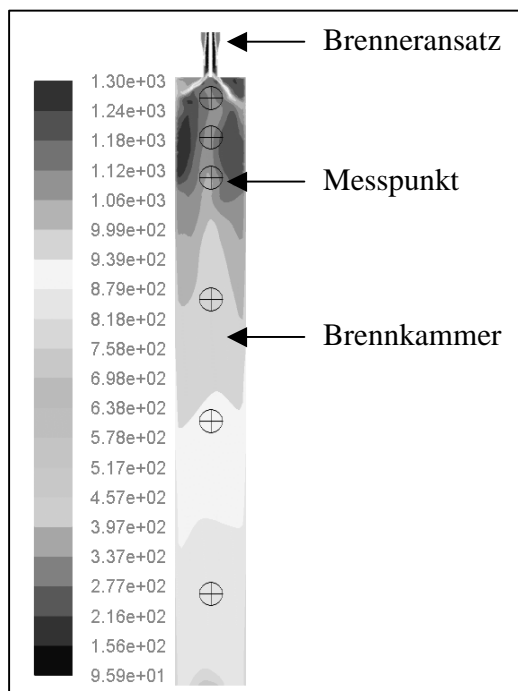


Bild 6a: Temperaturprofil [°C] der SVA mit Messebenen

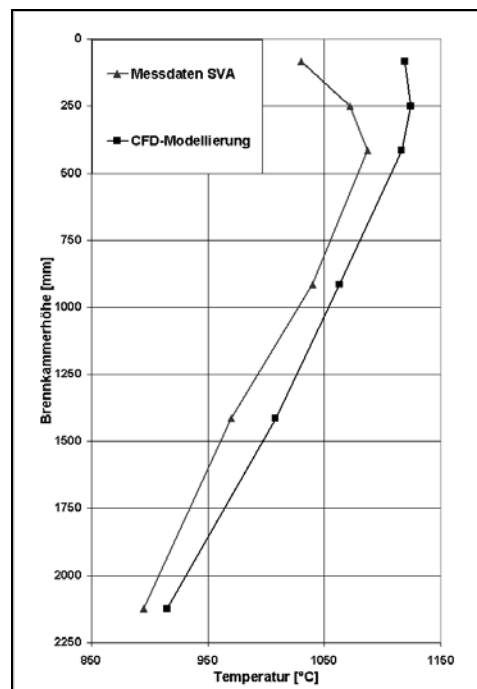


Bild 6b: Temperaturprofile von Messung und Rechnung in der Brennkammerachse

Die Abbildung 6a zeigt exemplarisch das berechnete Temperaturprofil mit den entsprechenden Messebenen (axial) in der Brennkammer. Der Vergleich mit ersten Messdaten (Abbildung 6b) zeigt eine annähernde Übereinstimmung mit der Rechnung. Die

Differenzen zwischen Rechnung und Messung sind hauptsächlich auf die Abweichungen beim eingesetzten Brennstoff zurückzuführen, der für die Berechnung idealisiert wurde.

4. Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde ein Überblick über die Forschungsarbeiten an der TU Dresden zur Verbrennung von Braunkohlestaub im Oxyfuel-Prozess gegeben. Die hierfür ertüchtigte, 50 kW_{th} Staubfeuerungsversuchsanlage wurde vorgestellt und erste Versuchsergebnisse zum Umschaltverhalten in den Oxyfuel-Betrieb präsentiert. Die experimentellen Untersuchungen werden ergänzt durch numerische Simulation der Brennkammer. Es wurde ebenfalls dargestellt, welche Systematik der Versuchsdurchführung in der nächsten Projektphase zugrundeliegt. Die vorgestellten Arbeiten sind Bestandteil des Projekts ADECOS, welches im Rahmen der COORETEC-Initiative vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie finanziell unterstützt wird.

5. Literatur

- [1] Gampe, U. , et. al.: Entwicklungsstand des Oxyfuel-Prozesses für Braunkohlekraftwerke ,Kraftwerkstechnisches Kolloquium, Dresden 2006
- [2] Effenberger, H.: Dampferzeugung, Berlin: Springer-Verlag 2000
- [3] Joos, F.: Technische Verbrennung, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag 2006