

Brandenburgisch Technische Universität Cottbus
Lehrstuhl Kraftwerkstechnik
Walther-Pauer-Str. 5
03046 Cottbus
Tel.: 0355 – 694600
Fax: 0355 – 694011

Untersuchung des Verbrennungsverhaltens von Brennstoffen

Ansprechpartner: Dipl.-Ing. Stephanie Tappe, Dipl.-Ing. Helge Kaß

Kurzbeschreibung:

Der LS KWT beschäftigt sich im Bereich der Verbrennung fossiler Energieträger hauptsächlich mit den neuen Carbon Capture and Storage Technologien (CCS-Technologien).

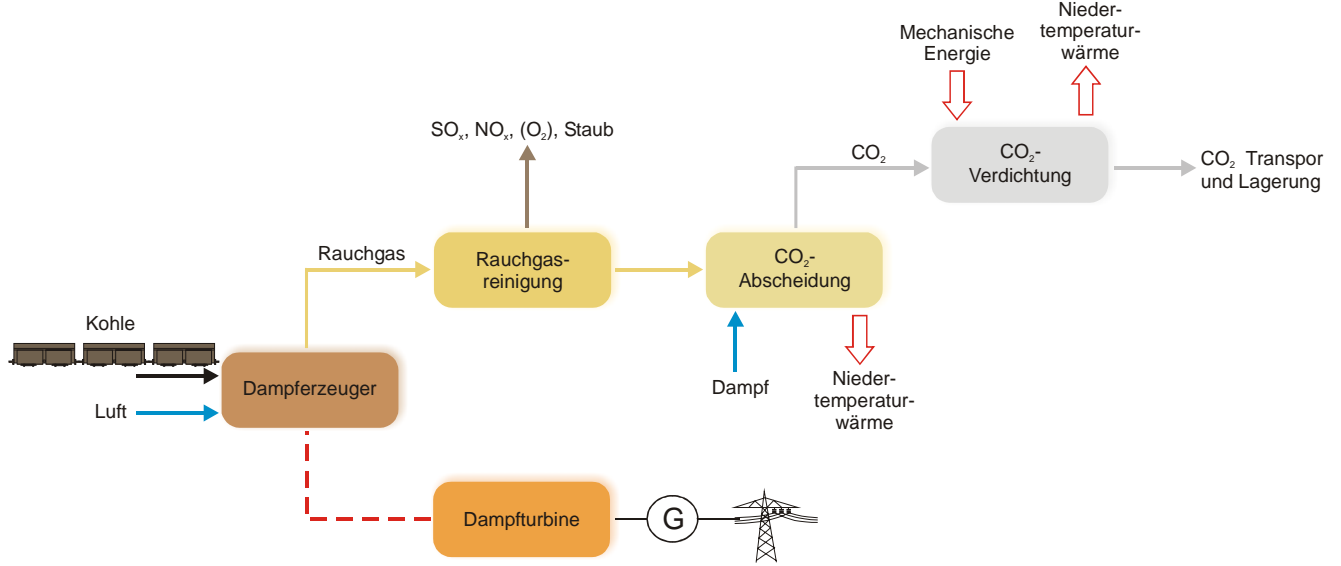
Hauptmerkmal dieser Technologien stellt die Abscheidung des Kohlendioxids dar, das bei der Verbrennung fossiler Energieträger entsteht. Das abgeschiedene Gas kann anschließend zur weiteren Nutzung verwendet oder in geologischen Lagerstätten verpresst werden.

Derzeit werden drei verschiedene Optionen zur Abscheidung des Kohlendioxids aus dem Kraftwerksprozess diskutiert:

- Abscheidung von CO₂ nach der Verbrennung (Post-Combustion)
- Abscheidung von CO₂ vor der Verbrennung (Pre-Combustion)
- Verbrennung mit Sauerstoff statt Luft (Oxyfuel-Combustion)

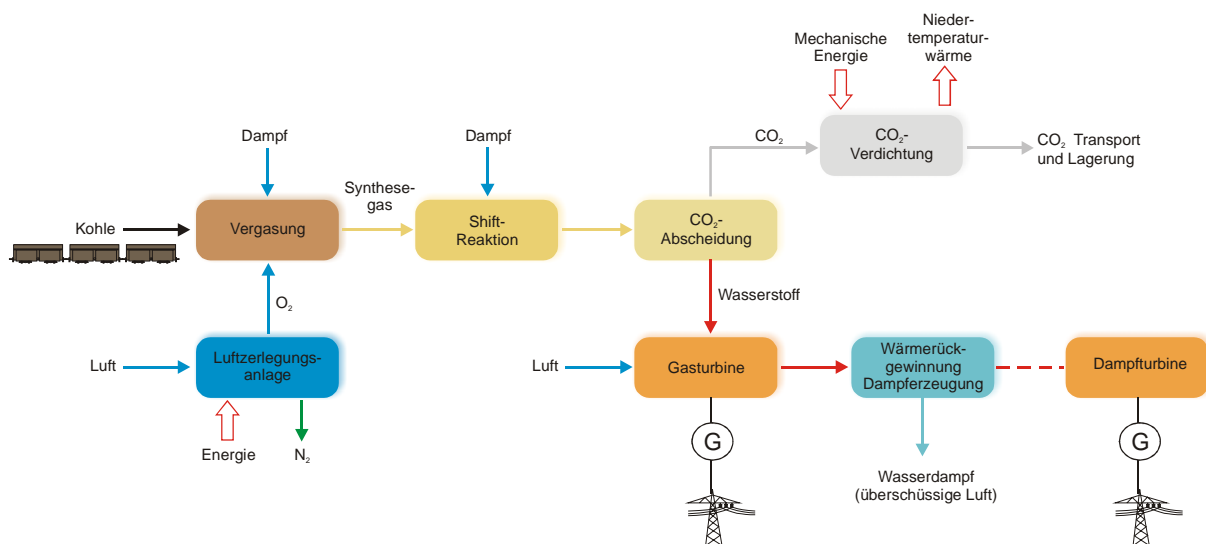
1. Post-Combustion

In ein konventionelles Kraftwerk wird ein CO₂-Gastrennverfahren (CO₂-Wäscher) integriert, mit dem das CO₂ nach der Verbrennung aus dem Rauchgas entfernt wird. Die erforderlichen Gastrennverfahren sind in der chemischen Industrie bereits seit langem bewährt, jedoch ist ihr Einsatz großtechnisch noch nicht erprobt. Der Wirkungsgrad des Kraftwerks werden durch die Entnahme zusätzlicher Energie für die CO₂-Abscheidung reduziert (Schema 1).



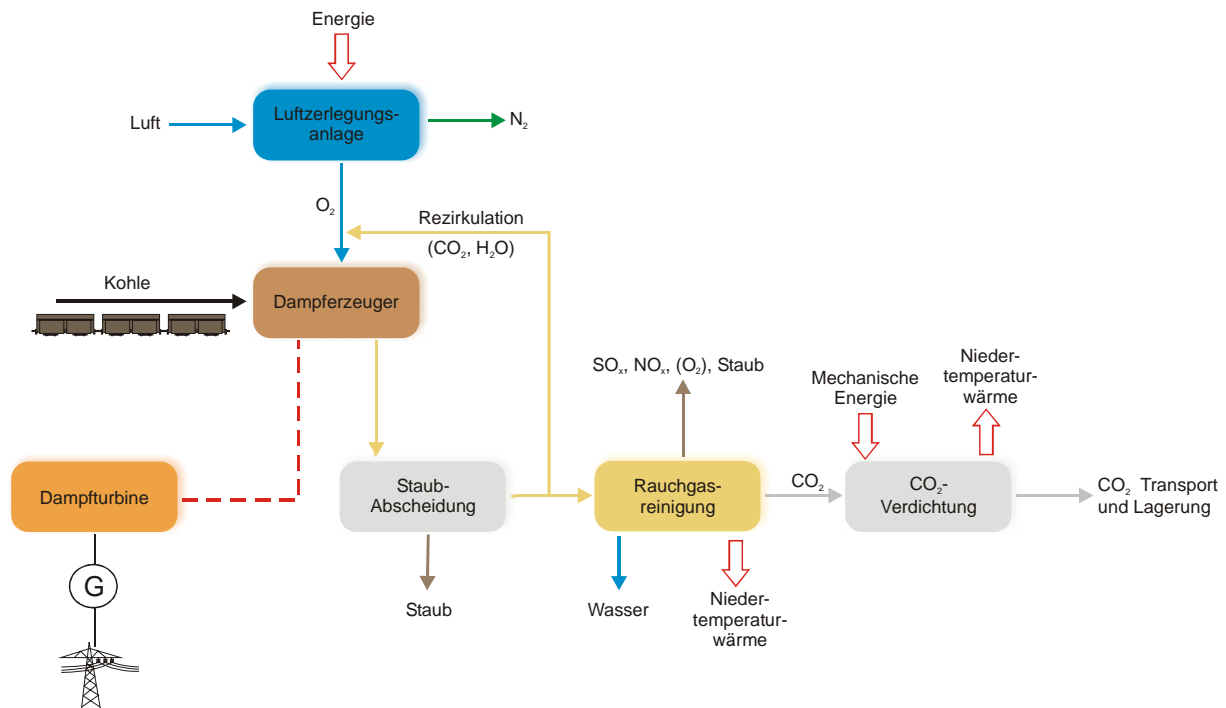
2. Pre-Combustion

Bei der Anwendung des IGCC-Prozesses (Integrated Gasification Combined Cycle Process) wird mittels Vergasung ein Synthesegas erzeugt. Die kohlenstoffhaltigen Bestandteile des Synthesegases werden vor der Verbrennung zu CO₂ umgewandelt und abgeschieden. Für die Energieerzeugung wird ein Gas verbrannt, das im Wesentlichen nur noch Wasserstoff enthält (Schema 2).



3. Oxyfuel-Combustion

Im Unterschied zur herkömmlichen Verbrennung von Kohle mit Luft, wird beim Oxyfuel – Prozess reiner Sauerstoff und zurückgeführtes Rauchgas eingesetzt. Dies hat den Vorteil, dass der in der Luft enthaltene Stickstoff sich nicht im Rauchgas befindet, sondern durch Kohlendioxid (CO₂) ersetzt wird. Dadurch wird eine Anreicherung des CO₂ im Rauchgas erreicht. Das CO₂ kann anschließend hochkonzentriert aufgefangen und verdichtet bzw. verflüssigt werden um in geeigneten unterirdischen Formationen gelagert zu werden (Schema 3).



Verbrennung von Lausitzer Braunkohle unter OXYFUEL-Prozessbedingungen in der 0,5 MWth – Tangentialfeuerung

Das CEBra, Centrum für Energietechnologie Brandenburg e. V. betreibt seit 1998 eine 0,5 MWth – Tangentialfeuerung mit trockenem Ascheabzug. Die Versuchsanlage wurde von Oktober 2005 bis August 2006 für die experimentelle Erprobung des Oxyfuel – Prozesses umgebaut und in Betrieb gesetzt. Dabei ist die Versuchsanlage mit einer Tankanlage zur Bereitstellung von O₂ und CO₂, einem Rauchgaskondensator und einem Heißgaszyklon erweitert, sowie die übrigen Anlagenkomponenten an die Bedingungen des Oxyfuel – Prozesses (erhöhte Sauerstoffkonzentration, Rauchgasmassenstrom und Rauchgastemperatur) angepasst worden. Nach dem Umbau kann mit der Versuchsanlage u. a. die flammenlose Verbrennung von Lausitzer Trockenbraunkohle mit einem Rauchgas-/Sauerstoffgemisch (Oxyfuel – Betrieb) bei ca. 950 °C durchgeführt und das Ziel der Maximierung des CO₂ – Gehaltes im Rauchgas erreicht werden.

Seit September 2006 wird in Kooperation mit Vattenfall Europe Generation und EVN AG die Erprobung des Oxyfuel – Prozesses an der Versuchsanlage durchgeführt. Im Rahmen eines zweijährigen FuE-Vorhabens wird die Verfahrensentwicklung mit den Schwerpunkten

- Optimierung der Betriebsparameter des Oxyfuel – Prozesses,
- Erprobung der wesentlichen Anlagenkomponenten,
- Untersuchung der Einflussgrößen auf die Bildungsmechanismen der Emissionen

stattfinden.

- Brennstoffwärmeleistung: 0,5 MWth
- Verbrennungstemperatur: 900 – 1.000°C
- Partikelgröße: 0 - 6,3 mm (TBK), 0 – 2 mm (Steinkohle),
- max. CO₂-Konzentration: 92 Vol.-% im trockenen Rauchgas
- Rauchgastemperatur vor Brennkammer: ca. 250 °C

Aufbau der Versuchsanlage im Technikum Jänschwalde:

Die Versuchsanlage zur Erprobung des Oxyfuel – Prozesses besteht aus einer Brennkammer (1) mit einer Brennstoffwärmeleistung von 0,5 MW, die nach dem Prinzip der Zykloidfeuerung die eingesetzte Trockenbraunkohle verbrennt. Über einen im Brennkammerkonus befindlichen Drallteller wird die Verbrennungsluft in eine aufwärts gerichtete Drallströmung versetzt, in der die Brennstoffpartikel flammenlos und dadurch mit sehr geringen Emissionen verbrennen. Ein weiterer Unterschied zur herkömmlichen Brennkammer besteht darin, dass das heiße Rauchgas mit ca. 950 °C die Brennkammer verlässt und in einem externen Wärmeübertrager (3) (Rauchrohrkessel) abgekühlt wird. Um diese zentralen Bauteile sind die im Kraftwerksbau üblichen peripheren Anlagenteile angeordnet. Die Verbrennungsgasversorgung wird über ein Frischluftgebläse (14) und ein Rauchgasgebläse (12) realisiert. Zwischen der Brennkammer und dem Rauchrohrkessel wird das Rauchgas in einem Zyklon (2) vorentstaubt. Nach dem Rauchrohrkessel erfolgt die Abscheidung der übrigen Asche in einem Gewebefilter (4). Das Saugzuggebläse (5) sorgt für den notwendigen Unterdruck in der Versuchsanlage und leitet das Rauchgas über den Kamin (7) an die Umgebung ab. Für die Umsetzung des Oxyfuel-Prozesses wird die Frischluft durch ein Gasgemisch aus reinem Sauerstoff (10) und zurückgeführtes Rauchgas ersetzt. Die Vermischung der beiden Gasströme erfolgt unmittelbar vor Eintritt in die Brennkammer. Durch die Nutzung von reinem Sauerstoff und Rauchgas erreicht man eine Aufkonzentrierung aller Rauchgasbestandteile und hauptsächlich von Kohlendioxid und Wasserdampf. Zur weiteren Aufkonzentrierung des CO₂ wird der Wasserdampf in einem Rauchgaskondensator (6) auskondensiert und aus dem Prozess entfernt. Mit dieser Verfahrensweise können CO₂-Konzentrationen von ca. 95 Vol.-% erreicht werden. Die restlichen Rauchgasbestandteile sind O₂, Ar, N₂ und Wasserdampf, die in der Versuchsanlage nicht entfernt werden können. Der N₂-Anteil im Rauchgas stammt zum einen aus dem Brennstoff und zum anderen aus Falschlufteinbrüchen, die nicht vollständig zu vermeiden sind.

20 kWth-Atmosphärische Laborverbrennungsanlage -ALVA 20-

1. Aufbau von ALVA 20

Mit dem Ziel, große Probenmengen bei hohen Aufheizraten und turbulenten Gaszusammensetzungen zu verbrennen, wurde am Lehrstuhl Kraftwerkstechnik der BTU Cottbus eine 20 kWth-atmosphärische Laborverbrennungsanlage ALVA 20

aufgebaut. Mit ihr ist es möglich, Verbrennungsuntersuchungen unter realen Bedingungen umfassend zu erforschen.

ALVA 20 besteht im Wesentlichen aus den Komplexen Verbrennungsgasbereitstellung, Dosierung, Brennkammer, Rauchgasleitung, Rezirkulationsleitung und Mess- und Leitsystem.

Verbrennungsgasbereitstellung

Als Verbrennungsgas wird sowohl herkömmliche Umgebungsluft (1) als auch ein technisches Modellgas, das zu unterschiedlichen Anteilen aus Sauerstoff und Kohlendioxid besteht, eingesetzt. Die Bereitstellung der technischen Gase erfolgt durch zwei Flüssiggastanks (2) (3).

Mit Hilfe eines elektrischen Luftherhitzers (4) und eines mit Propan betriebenen Gasbrenners (5) besteht die Möglichkeit, das Verbrennungsgas vor der Eindüsung in die Brennkammer vorzuwärmen.

Brennstoffdosierung

Die Brennstoffdosierung kann sowohl kontinuierlich als auch diskontinuierlich über zwei voneinander unabhängige Systeme realisiert werden.

Für kontinuierliche Verbrennungsversuche wird der Brennstoff über eine automatisierte Dosiervorrichtung (8) in die Brennkammer eingetragen. Bei diesem Dosiersystem wird der Brennstoffmassenstrom über die Drehzahl der Förderschnecke eingestellt.

Über eine separate Brennstoffeintragsvorrichtung (9) ist es möglich, eine definierte, abgewogene Brennstoffmenge diskontinuierlich zu dosieren, wobei die gesamte Brennstoffprobe nahezu zeitgleich in die Brennkammer gelangt.

Brennkammer

Das Kernstück von ALVA 20 stellt die Brennkammer dar (6), die mittels einer Mantelkeramikheizung (7) von außen elektrisch beheizt wird. Vier verschiedene vertikale Ebenen ermöglichen eine tangentielle Eindüsung des Verbrennungsgases, so dass eine turbulente, drallbeaufschlagte Rotationsströmung innerhalb der Brennkammer erzeugt wird. Der Brennkammer schließt sich eine Nachbrennkammer an, die zur Strömungsberuhigung dient.

Rauchgasleitung

Das entstehende Rauchgas wird in einem Zyklon (10) grob von Feststoffpartikeln gereinigt. Mittels einer luftbetriebenen Quenche (12) wird das Rauchgas abgekühlt und anschließend über ein Saugzuggebläse (13) durch den Kamin (17) in die Atmosphäre geleitet.

Rezirkulationsleitung

Alternativ zur Einleitung in die Atmosphäre ist eine teilweise Rückführung des Rauchgases in die Brennkammer möglich. Das Rauchgas wird hierzu in einem wasserbetriebenen Gegenstromwärmetauscher (14) abgekühlt und dann mit Hilfe eines Rezirkulationsgebläses (16) in die Sammelleitung des Verbrennungsgases gefördert. Die zurückgeführte Rauchgasmenge ist über die Leistung des Rezirkulationsgebläses steuerbar.

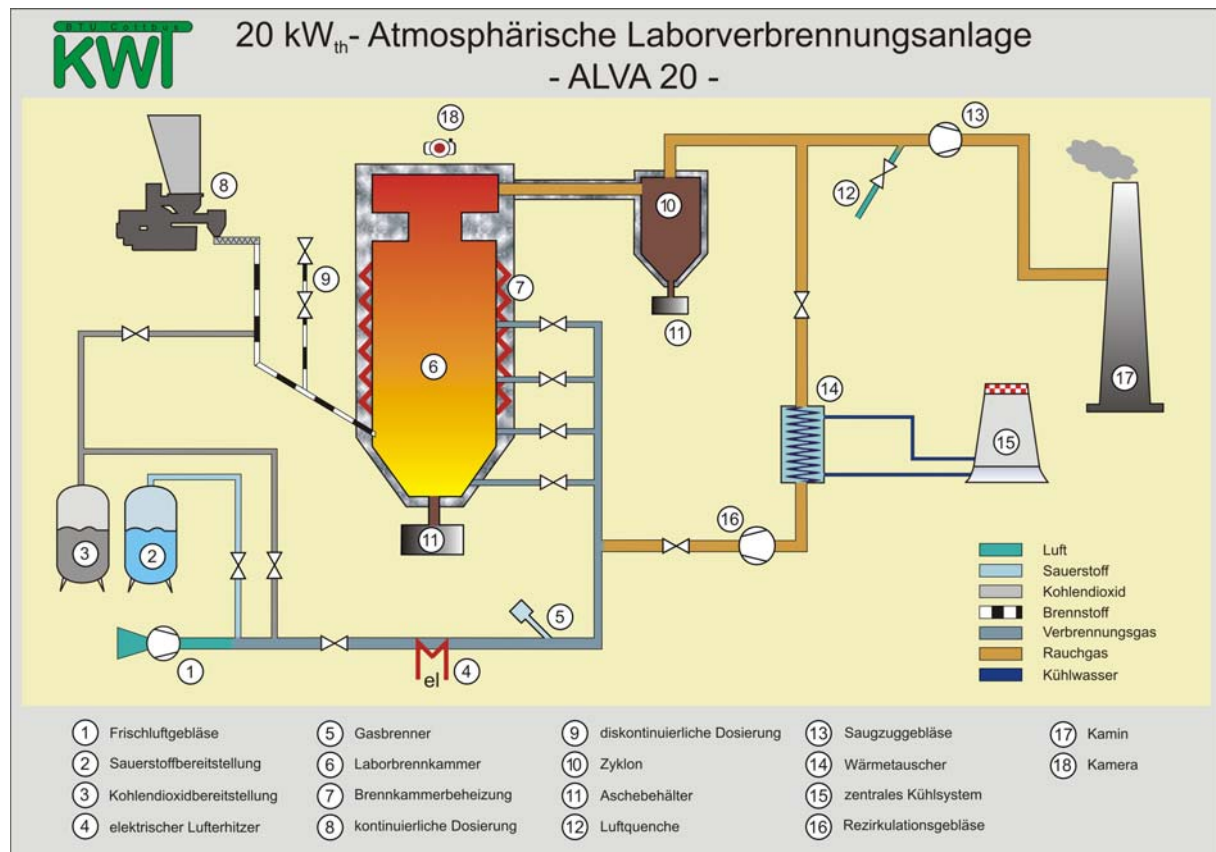
Mess- und Leitsystem

Zur Erstellung einer umfassenden Energie- und Massenbilanzierung werden an mehreren Messstellen Temperatur, Druck und Durchfluss kontinuierlich erfasst. Für Prozessuntersuchungen, bei denen die Auswirkungen der Prozessführung auf die Rauchgaszusammensetzung im Vordergrund stehen, wird eine Gasanalyse eingesetzt, die direkt hinter der Brennkammer angeordnet ist. Mit ihr lassen sich die wesentlichen Komponenten Sauerstoff, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Stickoxid und Schwefeldioxid messen.

Für die Abbranduntersuchungen kommt eine Sauerstoff-Festelektrolytsonde zum Einsatz. Sie erfasst kontinuierlich den Sauerstoffpartialdruck innerhalb der Brennkammer.

Zur optischen Beobachtung der Verbrennung ist oberhalb der Brennkammer eine Kamera (18) montiert, deren Bilder auf einem Monitor am Leitstand angezeigt werden.

Die Bedienung der einzelnen Anlagenkomponenten erfolgt sowohl manuell (Kugelhähne, Ventile) als auch über ein rechnergestütztes Leitsystem (Gebläse, Dosierung). Das Leitsystem dient weiterhin zur kontinuierlichen Erfassung und Speicherung sämtlicher Messdaten.



2. Untersuchungsmöglichkeiten von ALVA 20

Die 20-kW_{th}-Atmosphärische Laborverbrennungsanlage (ALVA 20) wurde entwickelt, um das Abbrandverhalten von Festbrennstoffen unter realitätsnahen Bedingungen untersuchen zu können. Durch die Möglichkeit, den Brennstoff kontinuierlich oder diskontinuierlich in die Anlage einzubringen, lässt sie sich für eine Vielzahl unterschiedlicher Untersuchungen nutzen. Sie zeichnet sich außerdem durch eine hohe Verweilzeit, einer hohen Aufheizrate der Brennstoffpartikel, einer turbulenten

Strömung innerhalb der Brennkammer und daraus resultierenden guten Vermischung von Brennstoff und Verbrennungsgas aus.

Es können sowohl grundlagenbezogene Kinetikuntersuchungen, die die Verbrennungsbedingungen industrieller Verbrennungen berücksichtigen als auch anwendungsorientierte Prozessuntersuchungen im Labormaßstab durchgeführt werden.

Grundlagenbezogene Kinetikuntersuchungen

Bei der Betrachtung der reaktionskinetischen Vorgänge der Verbrennung stehen insbesondere folgende Untersuchungsgrößen im Vordergrund:

- Verbrennungszeit der Flüchtigen, des Koks und des gesamten Ablaufs
- Abbrandverlauf
- effektive Reaktionsgeschwindigkeit
- makrokinetische Reaktionsparameter (Aktivierungsenergie, effektiver Reaktionsgeschwindigkeitskoeffizient, Reaktionsordnung)

Anwendungsbezogene Prozessuntersuchungen

Bei der Untersuchung von Verbrennungsprozessen stehen folgende Schwerpunkte im Vordergrund:

- Emissionsbildungsmechanismen
- Emissionsminderungsmaßnahmen
- Prozessoptimierung

3. Betriebsparameter von ALVA 20

ALVA 20 zeichnet sich durch eine hohe Flexibilität und einen weiten Einsatzbereich aus. Eine Übersicht über die möglichen Versuchseinstellungen ist wie folgt:

- Brennstoff: Braunkohle, Steinkohle
- Verbrennungsgas: Luft, Rauchgas, Oxyfuel, O₂/CO₂ Modellgas
- Dosierung: kontinuierlich, diskontinuierlich
- Brennstoffwärmeleistung: 0-20 kWth
- Frischluftmenge: 0-50 kg/h
- Sauerstoffverhältnis: 1-2,3
- Verbrennungsgastemperatur: 20-220 °C Prozessuntersuchungen
- Verbrennungsgastemperatur: 800-1100 °C Abbranduntersuchungen
- rezirkulierte Rauchgasmenge: 0-45 kg/h
- Partikelkörnung: 0-6,3 mm
- Additivzugabe: Kalk, Dolomit (vorgemischt)

4. Aktuelle Forschungsprojekte an der Versuchsanlage ALVA 20

In einem laufenden DFG-geförderten Forschungsvorhaben (Kr 1855/9-1) mit dem

Titel „Charakterisierung des Abbrandverhaltens von Braunkohlen in einer O₂/CO₂-Atmosphäre“ wird das Abbrandverhalten verschiedener Braunkohlen untersucht. Dabei soll speziell der Einfluss einer veränderten Verbrennungsgasatmosphäre auf die Kinetik der Verbrennungsreaktion bestimmt werden. Eine Übertragung der Verbrennungskinetik von Luft auf die in einer O₂/CO₂-Atmosphäre ist wegen der unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften von N₂ und CO₂ nicht möglich, so dass sie experimentell erforscht werden muss.

Die Modifizierung des Verbrennungsgases wirkt sich insbesondere auf die Verbrennungstemperatur und somit auf die Verbrennungsgeschwindigkeit aus. Des Weiteren beeinflussen die erhöhten O₂- bzw. CO₂-Konzentrationen die Teilvorgänge der Verbrennungsreaktion, vor allem die Reaktionsmechanismen.

Um die theoretischen Grundlagen zu erweitern, wird neben einer Variation der Gaszusammensetzung der Einfluss von Brennstoffzusammensetzung, Verbrennungstemperatur und Korngröße auf das Verbrennungsverhalten erfasst, da sie die Verbrennungskinetik entscheidend mit beeinflussen.

Projekte:

- Bildung einer Nachwuchsforschergruppe im Rahmen des Innovationsverbundes „CO₂-armes Kraftwerk“ unter Einbezug regionaler und überregionaler KMU zur kooperativen Forschung, Entwicklung und Vermarktung innovativer Kraftwerkstechnologien
- Verfügbarkeitsuntersuchungen zur Bewertung der Zeit- und Arbeitsverfügbarkeit eines Oxyfuel-Kraftwerkes im Vergleich zu einem rohbraunkohlegefeuerten Kraftwerk mit integrierter atmosphärischer Dampfzirkulation (Referenzanlage)
- FuE-Leitungen im Rahmen des Versuchsprogrammes zum Test der anlagentechnischen Komponenten und des Verbrennungs- und Emissionsverhaltens an der auf Oxyfuel-Prozess umgebauten Testanlage
- Charakterisierung des Abbrandverhaltens von Braunkohlen in einer O₂/CO₂ – Atmosphäre
- Umbau Oxyfuel- CEBra Anlage (Anlagentechnische Erweiterung einer 0,5 MWth Technikumsanlage zur Demonstration des Oxyfuel-Prozess)
- Erste Betriebsphase Oxyfuel Technikumsanlage
- Umbau der CEBra – Versuchsanlage für den Oxyfuel Betrieb
- Innovative in Situ CO₂-Capture Technology for Solid Fuel Gasification (ISCC)
- CO₂-Messsystem zur Bewertung von Oxyfuelprozessen an Technikumsanlagen des Lehrstuhls Kraftwerkstechnik
- Ermittlung des Marktpotentials für die Einführung der atmosphärischen Zyklidfeuerung im Bereich der dezentralen Wärmeverversorgung
- Untersuchungen an der atmosphärischen Zyklidfeuerung mit wassergekühltem Brennkammerkonus
- Isotherme Modellierung einer Zyklidfeuerung
- Beeinflussung von flüchtigen dampfförmigen Alkaliemissionen im Rauchgas von Druckwirbelschichtfeuerungsanlagen der zweiten Generation
- Untersuchungen zur Braunkohlendruckverbrennung an einer 200 kW-Versuchsanlage mit Zirkulierende Druckaufgeladene Wirbelschichtfeuerung der 2. Generation und Heißgasreinigung

- Experimentelle Untersuchungen zur Verbrennung von ostdeutschen Braunkohlen und Biomassen in einer vertikal angeordneten, druckbeaufschlagten, adiabaten Brennkammer mit aufgeprägter Rotationsströmung
- Untersuchungen zur Verbrennung von Braunkohle und Mischbrennstoffen in einer Zykloidfeuerung