

ENTWICKLUNG VON BRENNKAMMERSYSTEMEN VOM LABORMAßSTAB IN DIE PRAXIS AM BEISPIEL EINER TROCKENBRAUNKOHLEFEUERUNG

Dipl.-Ing. Tao Wen, Dipl.-Ing. Lars Schwarzer, Prof. Dr.-Ing. Michael Beckmann ^a
Dipl.-Ing. Thomas Schmidt, Dr.-Ing. Ronald Wilhelm ^b

a Technische Universität Dresden
b SAACKE GmbH Bremen

1 EINLEITUNG

Bei der Entwicklung von Brennern und Brennkammersystemen stellen die Effizienzsteigerung, die Emissionsminderung und die Reisezeitverlängerung nach wie vor wichtige Zielstellungen dar. Darüber hinaus spielen zunehmend Frage der Brennstoff- und Lastflexibilität eine Rolle. Biomassen, Prozessreststoffe und -nebenprodukte sowie Abfälle werden heutzutage zunehmend als Ersatzbrennstoffe für Mono- oder gemeinsam mit fossilen Brennstoffen für die Co-Verbrennung eingesetzt.

Je höher die Anforderungen an die Anlagen gestellt werden, desto präziser muss die Anlagenauslegung hinsichtlich der konstruktiven und betrieblichen Parameter werden (siehe Abbildung 1), d.h.

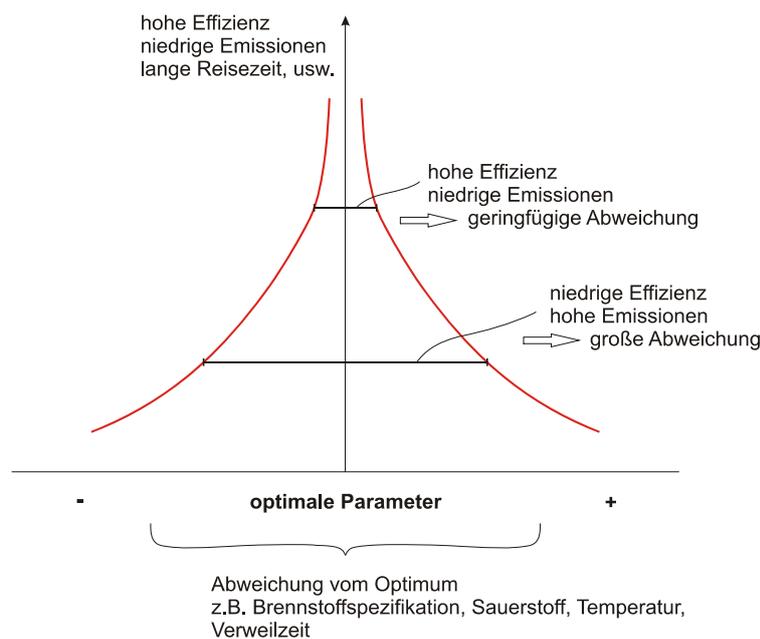


Abbildung 1: Zusammenhang zwischen den Anforderungen an Anlagen und dem Einstellungsbereich der Eingangsparameter.

die Anlagen müssen für den jeweiligen Einsatzfall (Brennstoff, Leistung, Flexibilität, Emission usw.) maßgeschneidert ausgelegt werden. Das bedeutet, dass über die Erfahrungen aus bereits ähnlichen Praxisanlagen hinaus zunehmend brennstofftechnische Untersuchungen an Pilotanlagen und mathematische Modelle die Auslegung unterstützen müssen. Diese Vorgehensweise ist generell nicht neu, wird jedoch in der Praxis mitunter nicht entsprechend berücksichtigt, was dann zu erheblichen Problemen z.B. bei der Inbetriebnahme oder im späteren Betrieb führen kann. Im vorliegenden Beitrag wird diese Strategie beispielhaft erläutert.

2 METHODEN UND STRATEGIE

Für bekannte fossile Festbrennstoffe und konventionelle Verbrennungsprozesse wie z.B. Braunkohlestaubfeuerung werden die Feuerungssysteme in der Regel mit Hilfe der Laboranalyse und den langjährigen Erfahrungen ausgelegt. Die fossilen Festbrennstoffe werden seit Jahrhunderten zur Energieumwandlung eingesetzt und sind deshalb bereits umfangreich untersucht worden, z.B. in [1].

Bei der Auslegung eines Brennkammersystems für einen neuen, unbekanntem Brennstoff oder bei der Entwicklung / Optimierung einer neuen Prozessführung treten zu den Laboruntersuchungen in der Regel Versuche im Technikums- und Pilotmaßstab hinzu (siehe z.B. [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]).

Zur Beschreibung der komplexen Wechselwirkungen der Haupteinflussgrößen und zur Verminderung des Versuchsaufwandes sind mathematische Modelle sehr hilfreich. Mit Hilfe der mathematischen Modelle lassen sich Optimierungsrichtungen abschätzen und wichtige Informationen für die konstruktive Gestaltung gewinnen. Dabei können je nach Fragenstellung vereinfachte mathematische Modelle z.B. auf der Basis von Grundelementen wie Kolbenstrom- und Rührkesselreaktor ebenso wie Modelle auf der Basis Finite-Volumen-Methode (FVM) usw. zur Anwendung kommen. Die Frage hinsichtlich der Detaillierung einer Modellvorstellung muss sich dabei aber auch an der Verfügbarkeit der erforderlichen Modellparameter und Stoffwerte orientieren. Mitunter werden in CFD-Modellen nicht die kinetischen Parameter des zu untersuchenden Brennstoffes, sondern Daten aus der Literatur verwendet, was die Genauigkeit der Aussage sehr beeinträchtigt.

Wichtig ist die Rückkopplung aus der Praxis, um einerseits die Auslegung auf der Basis von Erfahrungen abzusichern und weiter zu verbessern, „scale-up“-Faktoren für Technikums- und Pilotversuche besser abschätzen zu können und eine weitere Anpassung der Modelle sowie der Modellparameter vornehmen zu können. Die zuvor beschriebenen Entwicklungsschritte sind in Abbildung 2 mit Beispielen für Untersuchungen und Zielstellungen dargestellt.

Entwicklungsschritte

Laboruntersuchungen	<u>Brennstofftechnisches Labor</u> - Elementaranalyse, Feuchteanalysator, Muffelofen, Kalorimeter, FTIR, Siebmaschine, Schmelz-Mikroskop, Zündofen, FIELD-Rohr, TGA usw.
Untersuchung an Pilotanlagen	<u>Technikum</u> - Versuchsanlagen für Staubfeuerung diverser Leistungen: Brennkammer 50 kW und 1 MW.
Mathematische Modellierung	- Erstellung einfacher mathematischer Modelle mit Bilanzgleichungen, - Entwicklung komplexer numerischer Modelle mit Hilfe der kommerziellen Simulationsprogramme, wie z.B. FLUENT, Epsilon usw.
Validierung in der Praxis	<u>Brennkammerhersteller / Industriepartner</u> - Auslegung des Brennkammersystems für den vorgegebenen Brennstoff, - Festlegung der Optimierungsmaßnahmen für bestehende Anlagen.

Abbildung 2: Entwicklungsschritte eines Brennkammersystems für staubförmige Brennstoffe.

3 LABORUNTERSUCHUNGEN

In dem hier gesteckten Rahmen wird hinsichtlich der Laboruntersuchungen nur auf die Brennstoffcharakterisierung und dabei speziell auf die reaktionskinetischen Eigenschaften eingegangen. Laboruntersuchungen können selbstverständlich auch im Zusammenhang mit Werkstoff- und Korrosionsfragen [10] oder Schadstoffbildungs- und -abbaumechanismen [11, 12] usw. eingesetzt werden.

Aus brennstofftechnischer Sicht ist ein Festbrennstoff im Wesentlichen durch die:

- chemischen,
- mechanischen,
- kalorischen und
- reaktionskinetischen

Eigenschaften charakterisiert (z.B. [1, 13]).

Die Methoden zur Bestimmung der chemischen, mechanischen und kalorischen Eigenschaften sind ausführlich in den zugehörigen DIN bzw. CEN, ISO-Vorschriften beschrieben. Daher sei hier besonders auf die reaktionskinetischen Eigenschaften zum Zünd- und Abbrandverhalten eingegangen.

Bei der Untersuchung - insbesondere der kinetischen Eigenschaften von Festbrennstoffen - muss der anlagen- und apparatetechnische Hintergrund berücksichtigt werden (siehe Tabelle 1). Besonders wichtig sind dabei Verweilzeit / Verweilzeitverhalten und damit verbundene Aufheizraten und Abbrandverhalten.

Brennstoffarten	staubförmig	körnig	stückig
Temperatur	mittel → hoch		
Stöchiometrie	Pyrolyse / Vergasung / Verbrennung		
Verweilzeit	ms	s → min	min → h
thermische Prozesse (Beispiele)	- Staubfeuerung - Flugstromvergasung*	- Wirbelschichtfeuerung - Wirbelschichtvergasung - Vergasung im Schachtofen	- Pyrolyse im Drehrohrofen - Verbrennung im Schachtofen - Rostverbrennung

* Brennstoffaufbereitung erforderlich.

Tabelle 1: Klassifikation der thermischen Umsetzungen verschiedener Brennstoffarten [14].

3.1 UNTERSUCHUNG DES ZÜNDVERHALTENS AM ZÜNDOFEN

Rein theoretisch beschreibt der Begriff „Zündung“ den Übergang von einem thermischen Quasi-Gleichgewichtszustand zwischen dem Brennstoff und seiner Umgebung zu einem Zustand beschleunigter exothermer Reaktionen verbunden mit einem starken Temperaturanstieg und rapidem Verbrauch des Oxidationsmittels. Die Beschleunigung der chemischen Reaktionen findet ab einer Temperatur statt, die als die Zündtemperatur bezeichnet wird.

Die Zündtemperatur eines Brennstoffes ist von vielen äußeren Bedingungen abhängig. Je nach den Bedingungen, unter denen die Zündung eines Brennstoffs stattfinden kann, werden verschiedene Zündtemperaturen definiert. Davon wurde die „charakteristische Zündtemperatur einer Staubwolke ($\vartheta_{Z150,21}$)“ von Zelkowski als die Temperatur der Luft ($\psi_{O_2,tr} = 21$ Vol.-%) bezeichnet, bei der eine Brennstoffstaubprobe ($d < 63 \mu\text{m}$; $m = 0,2 \text{ g}$), die in diese Luft eingeblasen wird, nach 150 ms eine Staubflamme entwickelt. Da bei gegebenen Umgebungsbedingungen (Brenn-

kammertemperatur, Strömungsgeschwindigkeit) der Abstand der Flamme von der Brennermündung eine bestimmte Grenze nicht überschreiten darf, wurde das Verzögerungskriterium 150 ms gewählt, damit die Flamme bei einfacher Ausströmung von 20 m/s in einem axialen Abstand von maximal 3 m zum Brenner entsteht [1]. Aktuelle Untersuchungen deuten darauf hin, dass das Verzögerungskriterium von 150 ms nicht auf alle Brennstoffarten (z.B. Biomasse) übertragbar ist.

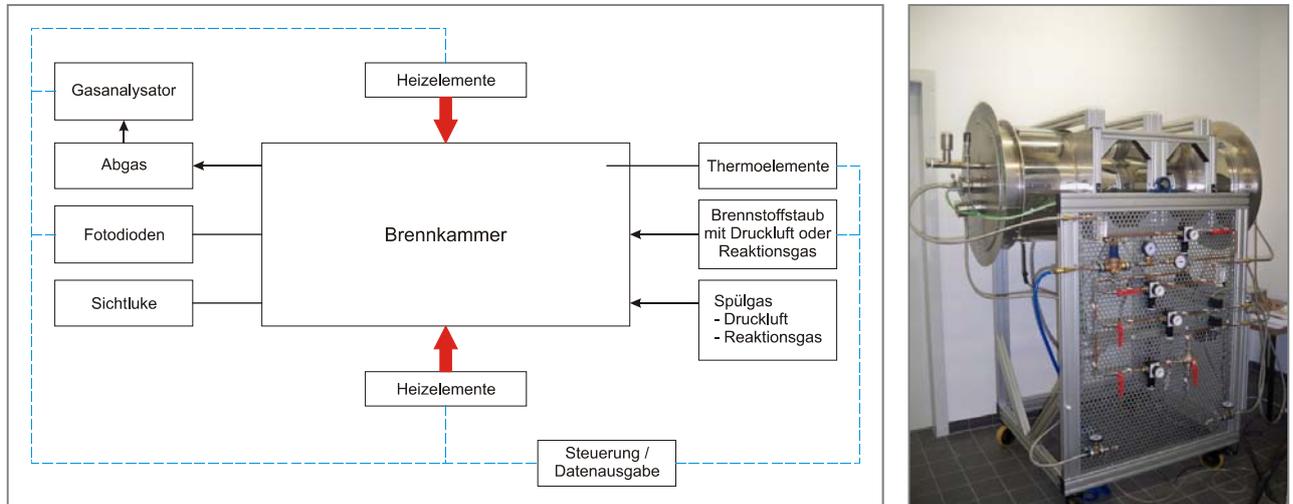


Abbildung 3: Fließbild des Zündofens.

Die Bestimmung der charakteristischen Zündtemperatur einer Staubwolke wird an der Technischen Universität Dresden an der selbst konstruierten Versuchsanlage „Zündofen“ durchgeführt. In Abbildung 3 ist das Fließbild des Zündofens dargestellt. Der Zündofen besteht aus einem Metallofen aus Nickelbasis-Legierung, welcher elektrisch beheizt wird. Die maximale Ofenwandtemperatur beträgt 1000 °C. Die Brennstoffstaubprobe wird mit dem Reaktionsgas (z.B. Druckluft,

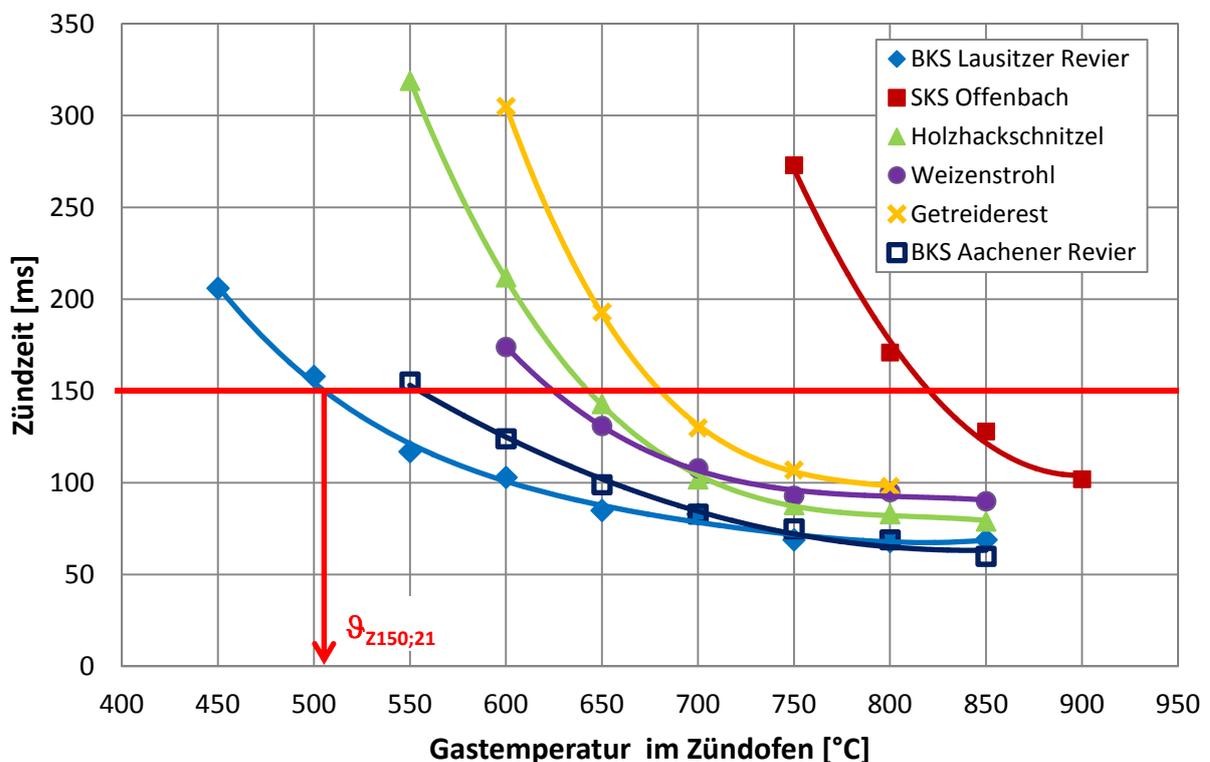


Abbildung 4: Zündhyperbeln der ausgewählten staubförmigen Brennstoffe (i.wf).

usw.) zusammen durch die Eindüslanze in die Brennkammer eingeblasen. An der gegenüberliegenden Seite des Ofens registrieren die Fotodioden die Lichtintensität im Ofen.

Außer Luft kann man andere sauerstoffhaltige Gase als Reaktionsgas einsetzen. Die Gasgemische werden von einer Gasmischstation bereitgestellt. Nach der Aufrüstung kann in der Zukunft auch eine Oxyfuel-Gasatmosphäre im Zündofen hergestellt werden.

In Abbildung 4 sind die Zündzeitverläufe in Abhängigkeit von der Gastemperatur im Zündofen, sogenannte Zündhyperbeln, einiger staubförmiger Brennstoffe dargestellt. Da die Brennstoffe in Kraftwerken vor dem Einsatz getrocknet werden, werden die Brennstoffproben ebenfalls im trockenen Zustand am Zündofen untersucht.

Anhand der Zündhyperbel kann die Gastemperatur entweder grafisch oder rechnerisch bestimmt werden, bei der sich der Brennstoffstaub 150 ms nach dem Ofeneintritt zündet. Diese Gastemperatur wird definitionsgemäß als charakteristische Zündtemperatur einer Brennstoffstaubwolke $\mathcal{G}_{Z150;21}$ bezeichnet. Damit können verschiedene Brennstoffe hinsichtlich der Zündfähigkeit mit einander verglichen werden.

Die am Zündofen gewonnenen Daten wie z.B. die Zündzeit und -temperatur können die Auslegung von Brennern bzw. Brennkammern für den unbekanntem Brennstoff beitragen.

3.2 UNTERSUCHUNG DES ABBRANDVERHALTENS AM FIELD-ROHR

Verbrennungsprozesse bei Staubfeuerung laufen mit hohen Aufheizgeschwindigkeiten und kurzen Verweilzeiten ab. Die reaktionskinetischen Parameter müssen daher ebenfalls bei hohen Aufheizgeschwindigkeiten und kurzen Verweilzeiten bestimmt werden, wie sie in sogenannten Reaktionsrohren (FIELD-Rohr, Drop Tube Reactor usw.) [15] erreicht werden. TGA-Untersuchungen sind für staubförmige Brennstoffe in der Regel ungeeignet (zu geringe Aufheizrate).

Die thermische Umsetzung von Brennstoffpartikeln kann in zwei Teilvorgänge aufgeteilt werden:

- 1. Phase: Pyrolyse (schnelle Freisetzung der flüchtigen Bestandteile) und
- 2. Phase: Restkoksverbrennung (heterogene Oxidation).

Das Reaktionsrohr nach FIELD (siehe Abbildung 5) besteht aus einem elektrisch beheizten Metallrohr, durch das heißes Reaktionsgas mit der gleichen Temperatur wie die der Rohrwand strömt. Dem Reaktionsrohr wird der untersuchte Brennstoff kontinuierlich zugeführt, in ihm gezündet und umgesetzt. Die Rückstände und das Reaktionsgas werden an unterschiedlichen Höhen des Reaktionsrohres mit einer Entnahmesonde abgesaugt, in der die Temperatur von Probenpartikeln sehr schnell auf unter 300 °C gekühlt wird. Die tatsächliche Probeentnahme findet in dem nachgeschalteten Nassabscheider statt, in dem die Rückstände vom Reaktionsgas getrennt werden. Die Probe wird zunächst im Labor getrocknet und anschließend analysiert. Die Verweilzeit lässt sich über den Zusammenhang zwischen Reaktionsweg und Partikelgeschwindigkeit, d.h. über die Impulsbilanz der Partikel, bestimmen.

Am FIELD-Rohr ist es möglich, hohe Temperaturen wie in realen Brennkammern großer Dampferzeuger zu fahren. Die Gas- und Rohrtemperatur sowie die Verweilzeit sind am FIELD-Rohr regelbar. Dank der konstanten Gas- und Wandtemperatur und der laminaren Gasströmung im Reaktionsrohr lassen sich die Wärme- und Stoffübertragungsvorgänge an Brennstoffpartikeln vereinfachend modellieren.

Unter dampferzeugerähnlichen Bedingungen, d.h. Einzelkornverbrennung bei hohem Aufheizgrad, werden bei den Untersuchungen am FIELD-Rohr die Haupteinflussgrößen auf den Abbrandvorgang, wie Sauerstoffgehalt im Reaktionsgas und Reaktionsgastemperatur unabhängig voneinander variiert.

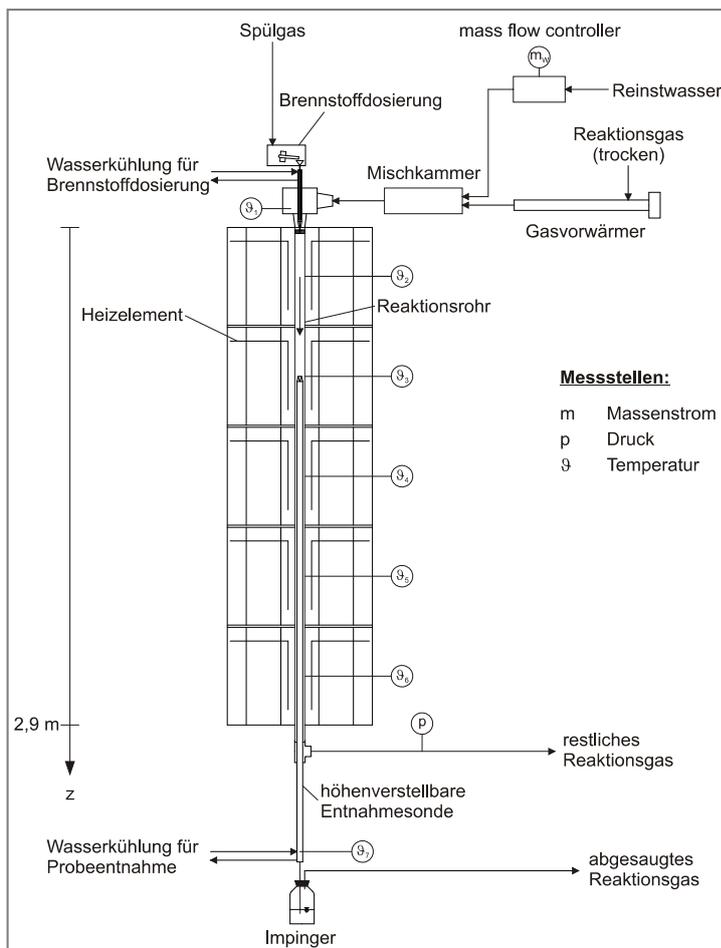


Abbildung 5: Fließbild des Reaktionsrohres nach FIELD [14].

Das Prinzip der reaktionskinetischen Untersuchungen besteht darin, das reaktionswegabhängige bzw. zeitliche Abbrandverhalten von Brennstoffen mit einer bestimmten Korngrößenverteilung unter definierten physikalisch-chemischen Bedingungen quantitativ zu bestimmen. Die Variation des Reaktionsweges z erfolgt über die Einschubtiefe der Entnahmesonde. Ein Vergleich der am FIELD-Rohr gewonnenen Messdaten kann bereits Aussage zur Reaktivität von unterschiedlichen Brennstoffen liefern.

Während des Abbrandprozesses im Reaktionsrohr ändern sich die Masse, der Korndurchmesser und die Reindichte des Brennstoffpartikels. Zur Bestimmung der kinetischen Parameter muss man deshalb ein Verbrennungsmodell in Betracht ziehen. Ein Verbrennungsmodell ist eine komplexe, mathematische Beschreibung der Entwicklung von Brennstoffpartikeln in der Reaktionszone. Dem hier als Beispiel vorgestellten Verbrennungsmodell liegt das Zellenmodell zugrunde. Mehr Informationen über verschiedene Verbrennungsmodelle findet man in Literaturen [16, 17, 18, 19, 20]. Anhand der Kurzanalyse des zu untersuchenden Brennstoffes kann seine Zusammensetzung wie folgt dargestellt werden

$$\xi_{H,B} + \xi_{V,B} + \xi_{C,B} + \xi_{A,B} = 1 \quad (1).$$

Das Unverbrannte $u(z)$ entlang des Reaktionsweges wird mittels des im Labor bestimmten trockenen Aschegehaltes $\xi_{A,B,d}$ des Brennstoffes, der Masse der Rückstände m_R und der Aschemenge in Rückständen $m_{A,R}$ ermittelt. Dieses Verfahren wird als ash-as-tracer-Methode bezeichnet.

$$u(z) = \xi_{A,B,d} \cdot \frac{1}{1 - \xi_{A,B,d}} \cdot \frac{\xi_{A,R}(z) - 1}{\xi_{A,R}(z)} \quad (2).$$

Die Massenänderung der flüchtigen Bestandteile bei der Pyrolyse kann beispielweise mit der ersten Ordnung der Arrhenius-Gleichung beschrieben werden

$$\frac{dm_V}{dt} = -k_V \cdot m_V \quad (3),$$

$$k_V = A_V \cdot \exp\left(\frac{-E_V}{\mathfrak{R} \cdot T_{P,m}}\right) \quad (4).$$

Der Stoffumsatz bei der Restkoksverbrennung kann ebenfalls mit der Arrhenius-Gleichung formuliert werden. Die scheinbare Reaktionsgeschwindigkeitskonstante bezieht sich in diesem Fall auf die Oberfläche der sämtlichen Partikel

$$\frac{dm_C}{dt} = -n_p \cdot F_{P,S} \cdot k_C \quad (5).$$

Da die Kohlenstoffumsetzung von der Sauerstoffkonzentration abhängt, wird diese bei der Bestimmung der scheinbaren Reaktionsgeschwindigkeitskonstante mit einbezogen

$$k_C = A_C \cdot p_{O_2,S}^n \cdot \exp\left(\frac{-E_C}{\mathfrak{R} \cdot T_{P,m}}\right) \quad (6).$$

In Gleichung 5 steht n_p für die Anzahl der Partikel mit dem Durchmesser $d_{P,0}$ vor der Verbrennung

$$n_p = \frac{m_B}{m_P} = \frac{m_B}{\rho_{P,0} \cdot \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d_{P,0}^3} \quad (7).$$

Mit dem Exponenten n des Sauerstoffpartialdrucks an der Partikeloberfläche wird die scheinbare Reaktionsordnung der Restkoksverbrennung dargestellt. Bei der Restkoksverbrennung wird nach dem „single film model“ das Kohlenmonoxid als einziges Reaktionsprodukt im oberflächennahen Bereich angenommen. Die weitere Oxidation des Kohlenmonoxids findet im Reaktionsgas statt. Der Verlauf des Unverbrannten entlang des Reaktionsweges wird mit folgender Gleichung berechnet

$$u(z) = \frac{m_{V,B}(z) + m_{C,B}(z)}{m_{V,B,0} + m_{C,B,0}} \quad (8).$$

In dem Verbrennungsmodell ist vorausgesetzt, dass die Restkoksverbrennung mit der Entgasung der flüchtigen Bestandteile simultan abläuft.

In der Praxis werden die Brennstoffe mit einer bestimmten Korngrößenverteilung in die Feuerung eingesetzt. Wenn man die genauen kinetischen Daten von eingesetzten Brennstoffen erfahren will, sollte die Korngrößenverteilung bei der Untersuchung am FIELD-Rohr mit einbezogen werden. Die Korngrößenverteilung kann mit mehreren Fraktionen i und den dazugehörigen Massenanteilen ξ_i in dem Verbrennungsmodell interpretiert werden. Das Unverbrannte der jeweiligen Fraktionen in einer betrachteten Volumenzelle wird in dem Verbrennungsmodell simultan berechnet und miteinander summiert

$$m_V(z) = \sum \xi_i \cdot m_{V,i}(z) \quad (9),$$

$$m_C(z) = \sum \xi_i \cdot m_{C,i}(z) \quad (10).$$

Daraus ergibt sich das gesamte Unverbrannte

$$u(z) = \frac{m_V(z) + m_C(z)}{m_{V,0} + m_{C,0}} = \frac{\sum \xi_i \cdot [m_{V,i}(z) + m_{C,i}(z)]}{m_{V,0} + m_{C,0}} = \sum \xi_i \cdot u_i(z) \quad (11).$$

Mit dem Verbrennungsmodell wird der Reaktionsablauf der Brennstoffpartikel in dem FIELD-Rohr näherungsweise nachgebildet. Die eigentlich gesuchten reaktionskinetischen Daten wie die prä-exponentiellen Faktoren (A_V und A_C) und die Aktivierungsenergien (E_V und E_C) sind als bekannte Größen in das Modell vorzugeben. Die kinetischen Parameter der Pyrolyse werden zuerst gewonnen, indem man die Brennstoffe mit einer inerten Gasatmosphäre (z.B. Stickstoff) in dem FIELD-Rohr untersucht und mit dem gleichen Modell ohne Berücksichtigung der Restkoksverbrennung bestimmt. Man schätzt eine Bandbreite von den beiden Parametern ein und lässt das Modell mit diesen Parameterpaaren berechnen. Die mit einer Parameterkombination ausgerechnete Ausbrandkurve wird punktuell mit den Messwerten verglichen. Wenn mit einer Brennstoffprobe mehrere Ausbrandkurven bei unterschiedlichen Randbedingungen aufgenommen wurden, ist die Abweichung auf einer Ausbrandkurve an einem beliebigen Messpunkt wie folgt anzugeben

$$f_{j,k,l} = u_{k,l,\text{gemessen}}(z) - u_{j,k,l,\text{berechnet}}(z) \quad (12),$$

wobei die unteren Indizes j , k und l jeweils für die Nummerierung der Parameterkombinations-, Ausbrandkurve- und Messpunkte stehen. Für jedes Parameterpaar wird eine gemittelte Standardabweichung gebildet, nachdem die errechneten Kurven mit allen Messpunkten auf den gemessenen Kurven verglichen werden

$$f_j = \sqrt{\frac{1}{k_{\max} \cdot l_{\max}} \sum_k \sum_l f_{j,k,l}^2} \quad (13).$$

Die Parameterkombination, die die kleinste Standardabweichung liefert, wird als Ergebnis ausgewählt. Analog werden die reaktionskinetischen Parameter für die Restkoksverbrennung mit den bekannten Entgasungsparametern berechnet.

In Abbildung 6 sind die mit dem hier vorgestellten Verbrennungsmodell berechneten Ausbrandkurven und die Messwerte am FIELD-Rohr einer Braunkohleprobe dargestellt. Die dabei ermittel-

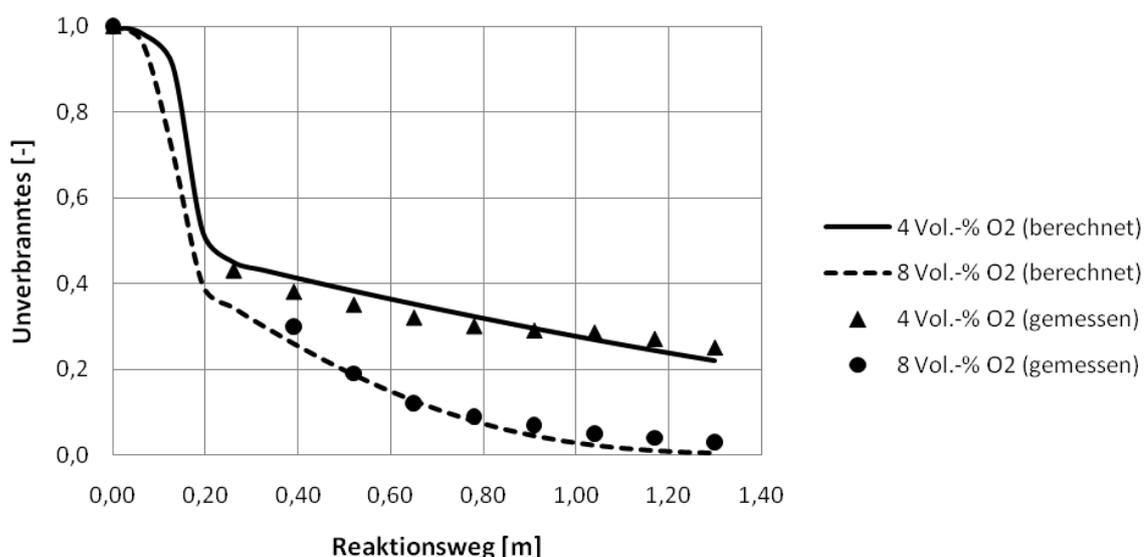


Abbildung 6: Vergleich der ermittelten Ausbrandkurven mit den Messwerten (Braunkohle, 125-160 µm bei 900 °C) [14].

ten kinetischen Parameterpaare können später in die CFD-Simulation eingesetzt werden, um eine höhere Genauigkeit der Vorausberechnungen bei der Auslegung bzw. Umstrukturierung von thermischen Prozessen zu erreichen. Damit die gewonnenen kinetischen Parameter später in Verbrennungssimulationen nutzbar sind, muss unbedingt das gleiche Reaktionsmodell wie das im Simulationsprogramm zur Ermittlung der kinetischen Daten verwendet werden.

4 UNTERSUCHUNGEN AN TECHNIKUMSANLAGEN

Wie bereits erwähnt sind für die Auslegung eines Brennkammersystems für einen neuen, unbekanntem Brennstoff oder für die Entwicklung / Optimierung einer neuen Prozessführung über die Laboruntersuchungen hinaus Versuche im Technikums- und Pilotmaßstab erforderlich (siehe z.B. [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]).

Beispielhaft sei im Folgenden auf zwei Technikumsanlagen und zugehörige Versuchsergebnisse eingegangen:

- Staubfeuerungsversuchsanlage mit einer thermischen Leistung von 50 kW und
- Adiabate Brennkammer mit einer Feuerungsleistung von 300 kW bis 1 MW.

4.1 STAUBFEUERUNGSVERSUCHSANLAGE 50 kW

Diese Versuchsanlage hat eine thermische Leistung von 50 kW und bietet neben der konventionellen Betriebsweise mit Luft auch die Möglichkeit, die Verbrennung von staubförmigen Brennstoffen mit rezirkuliertem Abgas und reinem Sauerstoff (Oxyfuel-Verbrennung) zu untersuchen. Abbildung 7 zeigt das Fließbild der Versuchsanlage. Der ungestufte Drallbrenner für staubförmige Brennstoffe und die modulare zylindrische Brennkammer bilden die Kernelemente dieser Anlage. Zum Anfahren wird ein Erdgasstützbrenner eingesetzt. Die Abgase werden nach Austritt aus der Brennkammer im Kühler auf ca. 200 °C abgekühlt und in nachgeschalteten Schlauchfiltern entstaubt. Ein Teil des Abgases kann mit einem Ventilator rezirkuliert werden, während der Rest mit dem Saugzug in die Umgebung abgeführt wird. Das rezirkulierte Abgas kann in variablen Verhältnissen der Primär- und Sekundärluft zugeführt werden. Mit der Primärluft wird der Brennstoffstaub zum Brenner gefordert. Weitere Details und Bilanzierung dieser Versuchsanlage sind [8] zu entnehmen.

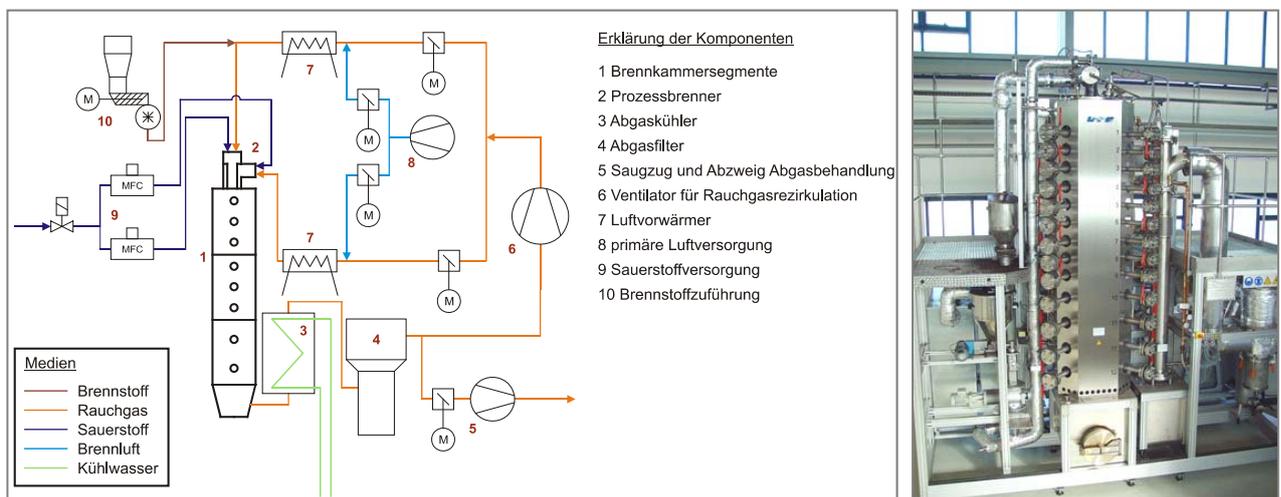


Abbildung 7: Fließbild der Staubfeuerungsversuchsanlage 50 kW [21].

An dieser Versuchsanlage können die Flammen hinsichtlich der Temperaturverteilung und Zusammensetzung untersucht werden. Dazu wird ein Raster über den Brennkammerdurchmesser gelegt (siehe Abbildung 8). Im oberen Bereich der Brennkammer werden mehr Messpunkte angeordnet, da hier die meisten Reaktionen und Umsätze zu erwarten sind. Eine Schleusentechnik ermöglicht den Sondeneinsatz über die Brennkammerlänge ohne Falschlufteinbruch [21].

Zur Messung der Temperaturen wird ein nach der Norm VDI/VE 3511 gebautes Absaugpyrometer mit einem Typ S Thermoelement verwendet. Die Flammentemperaturen entlang des Brennkammerdurchmessers lassen sich somit sehr gut bestimmen.

Zur Messung der Abgaszusammensetzung wurde eine spezielle Sonde entwickelt. Die Sonde wird nur am Kopf, wo die Gasprobeentnahme stattfindet, gekühlt, um die Reaktionen anzuhalten. Im weiteren Verlauf wird das Gas über ein beheiztes Sonde und einen beheizten Schlauch bei einer Temperatur von 180 °C dem Gasanalysator zugeführt. Dadurch wird eine Unterschreitung des Taupunktes von Säuren im Abgas verhindern und die Zerfallsreaktionen von beispielweise Stickstoffmonoxid in Stickstoffdioxid gebremst. Das Messprinzip des Gasanalysators beruht auf dem Prinzip eines Infrarot-Einstrahl-Fotometers mit Bildfrequenz- und Gasfilterkorrelationsverfahren [21].

In Abbildung 9 sind die Versuchsergebnisse für eine Trockenbraunkohlefeuerung mit Luft dargestellt. Mit den Messwerten können Verteilungen für Temperaturen und Konzentrationen jeweiliger Gaskomponenten erstellt werden.

Mit den Flammenuntersuchungen an der Staubfeuerungsversuchsanlage kann z.B. die Flammenform und -länge anhand der gemessenen Temperaturverteilung abgebildet werden. Anhand der Konzentrationsverteilungen der Gaskomponenten kann die Schadstoffbildung bzw. -reduktion ent-

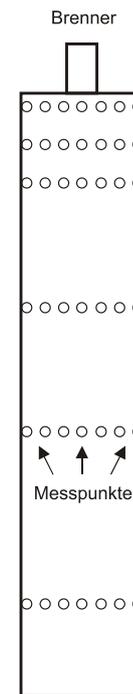


Abbildung 8: Messpunkttraster in der Brennkammer [21].

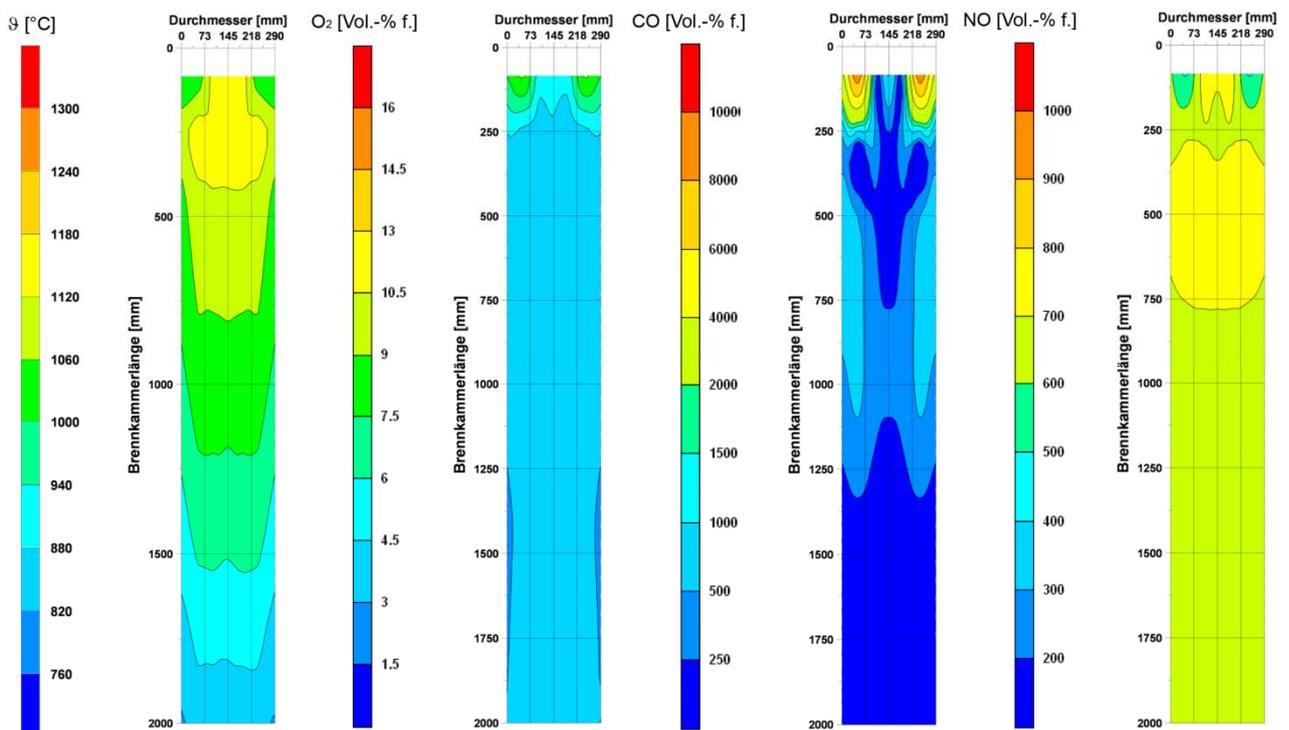


Abbildung 9: Temperaturverteilung und Verteilungen ausgewählter Gaskomponenten bei der Luftverbrennung eines Trockenbraunkohlestaus [21].

lang des Reaktionsweges wie z.B. Stickstoffmonoxid besser betrachtet werden. Weitere Untersuchungsergebnisse zur Bildung und Reduktion von Stickoxiden an dieser Versuchsanlage finden sich in [21] und [22].

Nicht nur das Verbrennungsverhalten sondern auch das Belagsbildungs- und Korrosionspotential eines staubförmigen Brennstoffs kann mit dieser Versuchsbrennkammer untersucht werden. Dabei werden die betriebsbegleitenden Messverfahren verwendet:

- Belagssonde und
- Belagsmonitor.

Die Messungen können an drei verschiedenen Stellen der Anlage durchgeführt werden. Sie befinden sich am Brennkammerende, vor dem Abgasfilter und nach dem Rezi.-Gas-Vorwärmer.

Mit Hilfe der Belagssonde werden die am Belagsaufbau teilnehmenden Substanzen ermittelt. Durch eine in den Abgasstrom eingebrachte, temperierte Sonde wird ein Teil des Abgases isokinetisch für eine sehr kurze Zeit abgesaugt. Die sich im Abgasstrom befindlichen Partikel (fest bis flüssig) setzen sich dabei auf einer auf der Sonde angebrachten feinen Drahtgitter ab. Das Gitter wird anschließend mit Hilfe eines Rasterelektronenmikroskops (REM) untersucht, wobei Aussagen zu den Gefügestrukturen der unterschiedlichen Partikel getroffen werden können. Mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) kann quantitativ und qualitativ die Zusammensetzung der Partikel bestimmt werden. Ein Vergleich dieser Messungen unter verschiedenen Prozessbedingungen ermöglicht es An- oder Abreicherungen der korrosionsrelevanten Substanzen ortsspezifisch zu ermitteln [23]. Weitere Details und Anwendungsbeispiele dieser Messmethode sind [23], [24] und [25] zu entnehmen.

Bei der Belagsuntersuchung mit dem sogenannten Belagsmonitor werden die Messsonden für ein frei wählbares Betriebsintervall (Stunden bis Tage) von außen temporär in den Feuerraum eingeführt. Im Unterschied zur Belagssonde liegt die maximale Anwendungstemperatur der Messsonden für den Belagsmonitor bei 700 °C. D.h. diese Messmethode eignet sich für die Messung in flammennahen Bereichen, wie z.B. im Strahlungsteil eines großen Kessels. Der Belagsmonitor bildet näherungsweise die belagsbildenden Prozesse in einem definierten Zeitfenster. Damit können der Belagsaufbau, Belagsreifung und Beginn der Korrosion erfasst werden.

Für die Bewertung der Belagsentwicklung über langen Zeitraum ist der Belagsmonitor insbesondere geeignet, wenn die ungestörte Entnahme des gesamten Belags auch bei dickeren Belägen während des Betriebs möglich ist. In diesem Fall werden die aktiv gekühlten Sonden eingesetzt [26]. Mit den Informationen der auf den Sonden zu unterschiedlichen Untersuchungsdauern gebildeten Belege kann man die Entwicklung des ortsspezifischen Belegs zu den zugehörigen chemisch-mineralischen Milieuparametern, wie z.B. Temperatur, Gaszusammensetzung, Wärmestromdichte usw. in Beziehung setzen.

4.2 1 MW ADIABATE BRENNKAMMER

Der nächstgrößere Leistungsbereich wird von der adiabaten 1 MW-Brennkammer (siehe Abbildung 10) abgedeckt. Diese Anlage schließt somit die Größenordnungslücke zwischen der Leistung der kleineren Versuchsstaubfeuerung und der großtechnischer Feuerungsanlagen. Eingesetzt wird

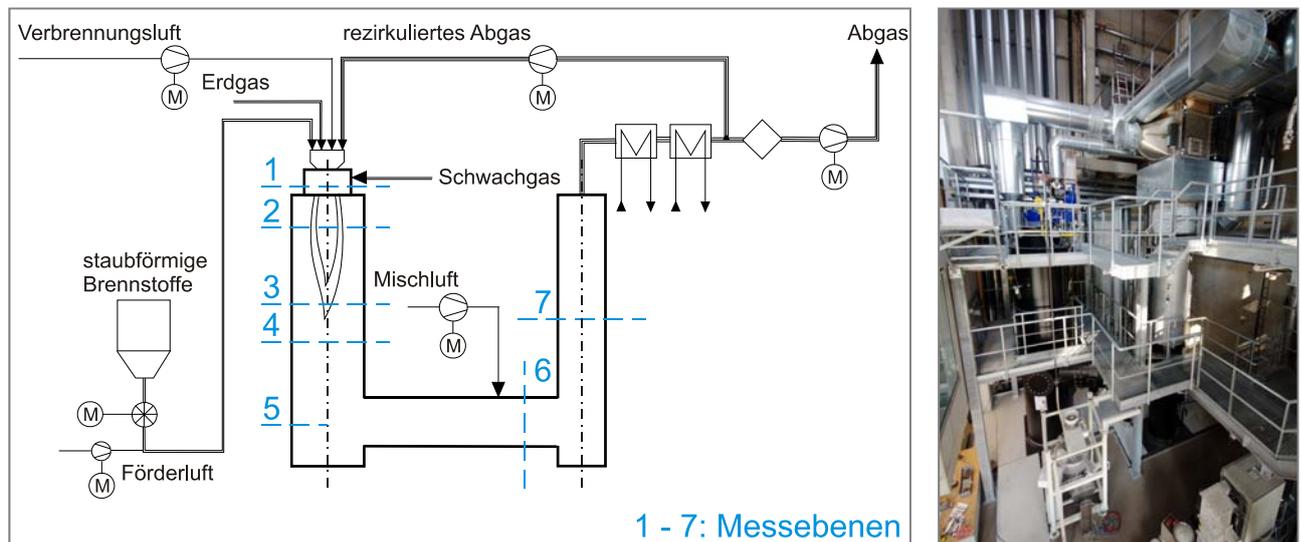


Abbildung 10: 1 MW-SAACKE-Brennkammer an der TU Dresden

ein auf 1 MW Maximalleistung skaliertes Drallbrenner vom Typ SSB-D der Fa. SAACKE, der alternativ sowohl mit Erdgas wie auch mit staubförmigen Brennstoffen betrieben werden kann. Brennstoff und Luft werden dabei nicht vorgemischt. Über den Leistungsbereich zwischen 200 kW und der oberen Leistungsgrenze ist der Brenner stufenlos regelbar. Das Abgas kann rezirkuliert werden, zusätzlich kann die Brennkammer zur Verbrennung von Produktgasen des benachbarten Wirbelschichtvergasers genutzt werden. Über fest installierte Messtechnik an Brennkammer und dem nachfolgenden Abgasstrang lassen sich alle Stoff- und Energieströme vollständig bilanzieren. Die Brennkammer ist als zweizügige Anlage ausgeführt, wobei der Brenner als Sturzbrenner oben am ersten Zug angeordnet ist. Der sich anschließende Feuerraum mit einer Höhe von 4,5 m und einem Durchmesser von 750 mm besitzt in mehreren Ebenen Zugänge für Gasabsauglanzen, Belagssonden oder zur Temperaturmessung mittels Absaugpyrometer. Des Weiteren wird die Brennkammer für den Einsatz optischer Strömungsmesstechniken, beispielsweise Laser-Doppler-

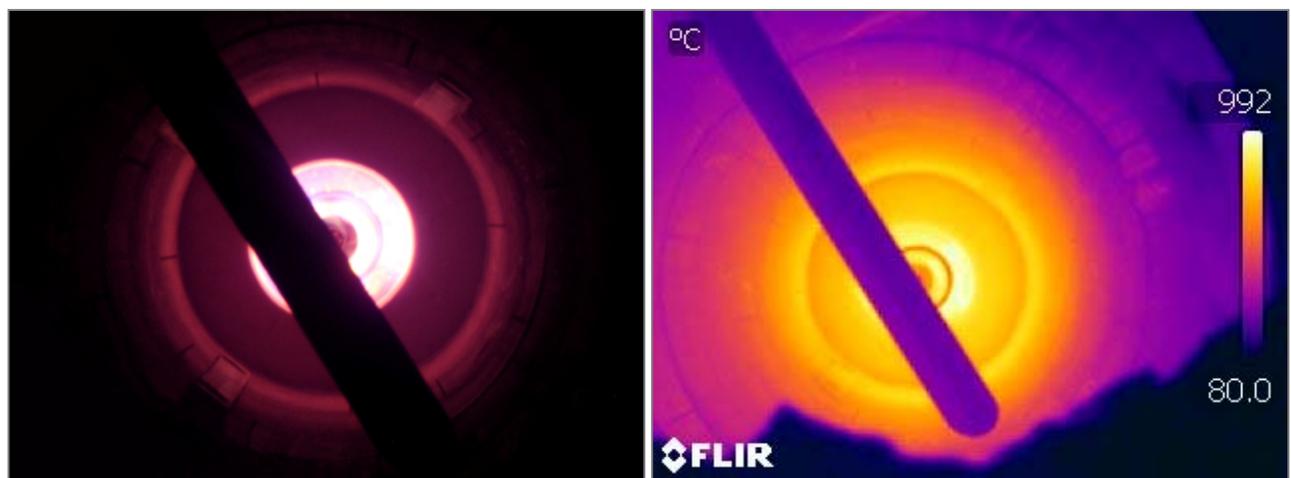


Abbildung 11: Flammenbilder an der 1 MW-SAACKE-Brennkammer (rechts: Thermografie).

Anemometrie (LDA) ertüchtigt. Damit können die Wechselwirkungen der zuvor ermittelten brennstoffkinetischen Eigenschaften und dem für den Brenner charakteristischen Strömungsfeld untersucht werden. Relevante Größen sind beispielsweise Flammenlänge und -form, Drallgrad sowie die Bildungsrate unerwünschter Emissionen.

5 MATHEMATISCHE MODELLIERUNG

Wie eingangs erwähnt können sowohl vereinfachte mathematische Modelle als auch detaillierte Modelle zur Anwendung kommen.

Zum Beginn einer Auslegung eines Brennkammersystems oder der Durchführung von Untersuchungen an Pilotanlagen sind in der Regel die Bilanzierung mit Hilfe von statischen Bilanzmodellen (Epsilon, Verbrennungsrechnung, VWS-Excel usw.) erforderlich.

Das dynamische Verhalten kann ebenfalls mit vereinfachten Bilanzmodellen mit Einbeziehen der Transportvorgänge einschließlich chemischen Reaktionen beschrieben werden. Ausgangspunkt dafür ist zunächst die Entwicklung einer Modellvorstellung im Sinne der phänomenologischen Beschreibung der Vorgänge. Hier sei zum Beispiel auf die Modellvorstellungen zur Beschreibung von Zünd- und Abbrandvorgängen an einzelnen Partikeln verwiesen. Diese Modellvorstellungen weisen wiederum unterschiedliche Detaillierungsgrade auf. So finden sich in Schrifttum sehr stark vereinfachte Modellvorstellungen, die beispielweise nur die äußere Oberfläche des Partikels für die Reaktion einbeziehen [27, 28], aber auch wesentlich detaillierte Modellvorstellungen, die Diffusionsvorgänge in Poren (Adsorption, Desorption) mit einbeziehen [29, 30].

Für die Beschreibung des Brennstoffumsatzes unter Einbeziehung von Schadstoffbildungs- und -abbaureaktionen können zunächst auch vereinfachte Modelle auf der Basis von Grundelementen wie Kolbenstrom- und Rührkesselreaktor zum Einsatz kommen [8, 9, 31].

Der Vorteil der Verwendung dieser vereinfachten Grundmodelle ist insbesondere in der Abschätzung von Fehlern zu sehen. Das Verweilzeitverhalten realer Brennkammersysteme liegt in der Regel zwischen Grenzfällen von Kolbenströmer und Rührkessel, jedoch näher an der Kolbenströmercharakteristik. Aus der Abbildung 12 kann für den Fall der Wärmeübertragung durch Konvektion abgelesen werden, dass der in einem Kolbenströmer übertragene Wärmestrom maximal 30 % höher sein kann, als der in einem Rührkessel übertragene Wärmestrom. Berechnet man reale Öfen z.B. aus einem Mittelwert, der aus beiden theoretischen Modellen gebildet wird, so kann der Fehler nicht höher als 15 % liegen. Auf diese Weise können Modellierungen erheblich vereinfacht werden [32].

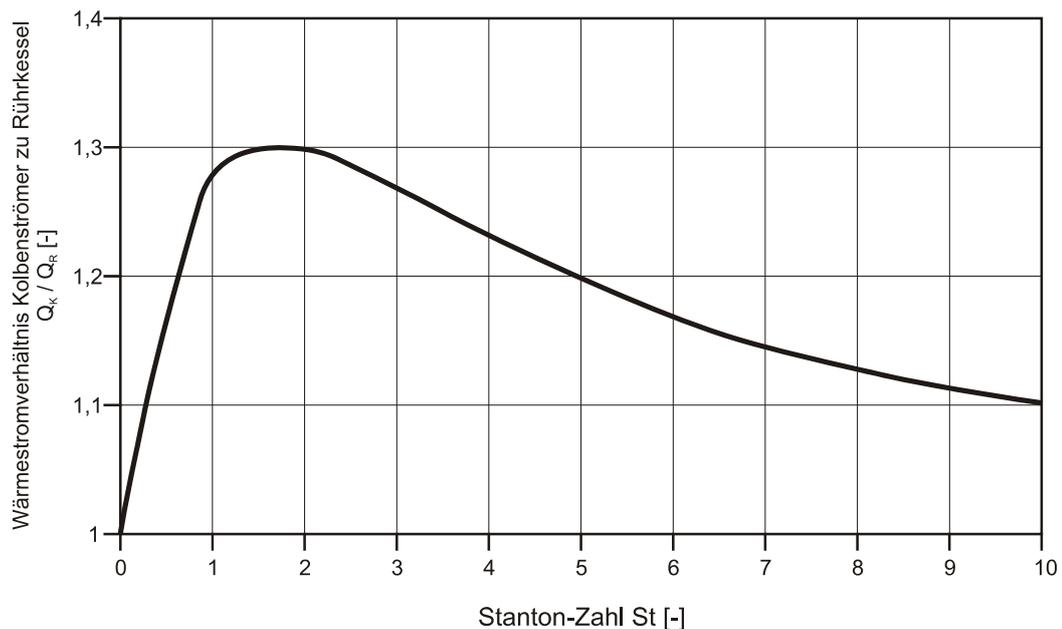


Abbildung 12: Vergleich der übertragenen Wärmeströme für Kolbenstrom- und Rührkessелеlement bei Konvektion [33].

Die Entwicklung auf dem Gebiet der detaillierten Modelle hat in den letzten Jahren unter anderen auch aufgrund des Fortschrittes der Rechentechnik enorm zugenommen. Die detaillierte Modellierung basiert auf der sogenannten CFD-Simulation, bei der unter der Anwendung der Finite-Volumen-Methode (FVM) die Differenzialgleichungssysteme der Erhaltungssätze, die das Strömungsfeld beschreiben, numerisch gelöst werden. Die Verbrennungsvorgänge lassen sich mit entsprechenden chemischen Reaktionsmodellen und Mehrphasenmodellen simultan abbilden. Als Simulationsergebnisse sind z.B. Flugbahnen von Partikeln, Temperatur- und Geschwindigkeitsfelder der Strömungen sowie die Konzentrationsverteilungen jeweiliger Gaskomponenten. Diese liefern hilfreiche Informationen für die Auswahl bzw. Festlegung der konstruktiven Parameter und Prozessführung.

Detaillierte Modelle bedeuten häufig einerseits einen unverhältnismäßig hohen Aufwand und können andererseits Fehlerrisiken im Zusammenhang mit der Bereitstellung von Stoffwerten usw. hervorrufen, die im Gegensatz zu dem vorgenannten Fall häufig nicht abschätzbar sind [32].

Zusammenfassend sei mit Blick auf die mathematische Modellierung nochmal auf die Aspekte der Verfügbarkeit sowie Genauigkeit von Stoffwerten und Modellparametern und auf die Validierung der Modellergebnisse hingewiesen. Die sorgfältige Bestimmung von Brennstoffdaten sei die übliche grundlegende Brennstoffcharakterisierung (Kurzanalyse, Heizwert, Aschbestimmung usw.) oder die Bestimmung der kinetischen Parameter (siehe oben) stellt eine wesentliche Basis für die Qualität der Modellergebnisse dar. Die Validierung wiederum sollte im ersten Schritt mit Hilfe der sogenannten statischen Bilanzmodelle und in einem zweiten Schritt mit Hilfe von experimentellen Ergebnissen aus Technikumsversuchen und der industriellen Praxis erfolgen.

6 VALIDIERUNG IN DER PRAXIS: BEISPIEL EINER TROCKENBRAUNKOHLEFEUERUNG

Die Firma SAACKE erhielt den Auftrag für die Errichtung einer Trockenbraunkohlefeuerung für eine KWK-Anlage mit 19 MW Feuerungsleistung. Aufgrund der ausreichenden Erfahrung mit dem vorgegebenen Brennstoff wurden nicht alle in den vorangestellten Kapiteln skizzierten Schritte durchgeführt. Der CFD-Simulation kam aufgrund dessen eine größere Gewichtung bei der Verfahrensentwicklung zu. Grundlage für diese Simulationsrechnungen bildeten an der TU Dresden bereits vorhandene Parametersätze für den staubförmigen Brennstoff. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen konnte die CFD-Simulation zügig für das favorisierte neue Anlagenkonzept mit folgender Zielstellung angewendet werden:

- Berechnung des erforderlichen Drallgrades für eine einwandfreie Flammenstabilität,
- Optimierung des Luftüberschusses in der primären Verbrennungszone zur Vermeidung von NO_x -Emissionen, sowie Unterbindung von Verschlackung / Bildung von Anbackungen in der Muffel und
- Berechnung der Geschwindigkeits- und Temperaturfelder → Vermeidung von Rücksaugeffekten im Bereich hoher Temperaturen.

Wie in Abbildung 13 beispielhaft dargestellt, gaben die Ergebnisse der CFD-Berechnungen (Verläufe und Felder für Temperatur, Geschwindigkeit, O_2 , CO , Partikelflugbahnen) wertvollen Aufschluss über erforderliche Prozessoptimierungen.

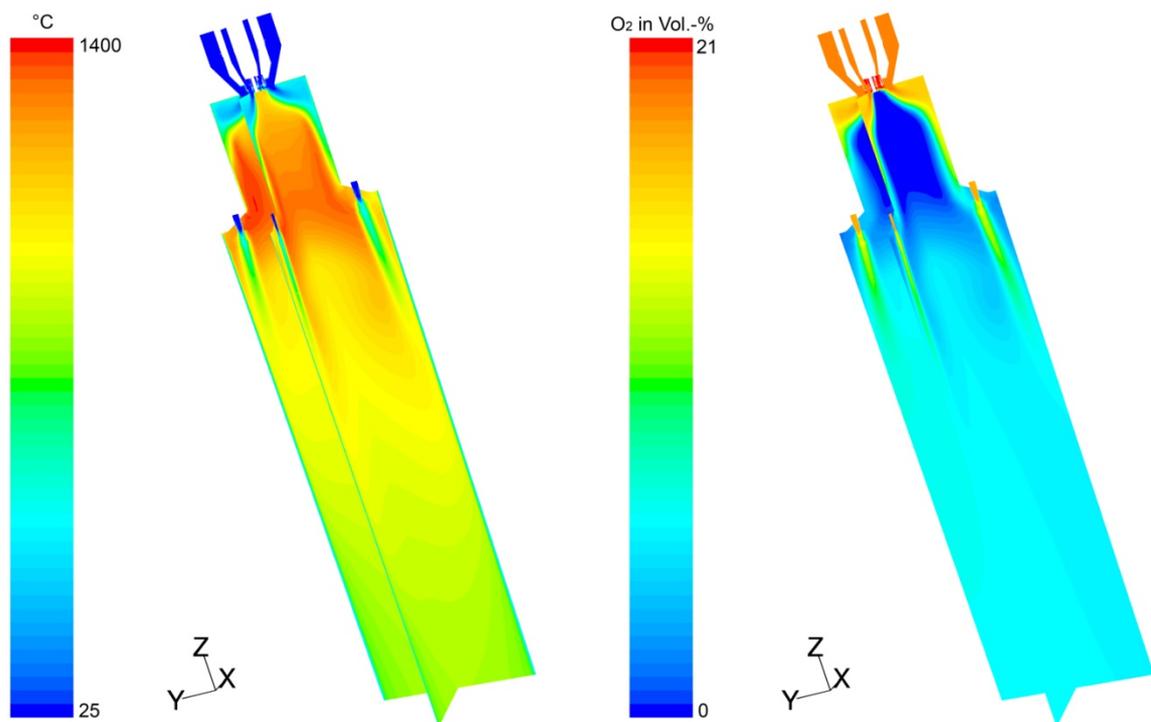


Abbildung 13: Simulation der 19 MW Trockenbraunkohlenstaubfeuerung an einem Wasserrohrkessel.

Validierung der CFD-Simulation

Der Validierung der Simulationsergebnisse in der Praxis kommt eine besondere Bedeutung zu. Trotz höchster wissenschaftlicher Genauigkeit bei der Durchführung der Laboranalysen und weiterführenden Untersuchungen zur Ermittlung des zu erwartenden Abbrandverhaltens staubförmiger Brennstoffe muss mit Abweichungen zwischen Theorie und Praxis gerechnet werden. Eine wesentliche Rolle spielt dabei auch die Tatsache, dass es bei Kohlestäuben und anderen Stäuben

biogener Herkunft sehr häufig zu Schwankungen in der Produktqualität kommt. Kohlestäube sind ein Naturprodukt, bei denen kleine Differenzen in der Zusammensetzung aus der Ausbildung der jeweiligen Lagerstätte gegeben sind. Weitere Ungenauigkeiten können zum Beispiel bei der Siebkennlinie auftreten. In der Simulation ist eine exakte Korngrößenverteilung anzugeben, während in der Praxis eher von einem Körnungsband mit entsprechenden Schwankungen auszugehen ist. Diese und weitere Faktoren und Parameter, für welche in der Simulation von der Realität leicht abweichende Annahmen zu treffen sind, führen zwangsläufig zu Unterschieden zwischen den Berechnungsergebnissen und den an der realen Anlage zu messenden bzw. zu beobachtenden Effekte. Die Aufgabe bei der Validierung besteht darin, durch Erfahrung und Fachwissen die Differenzen zu erkennen, zu bewerten und das Modell gegebenenfalls entsprechend anzupassen. Die Abbildung 14 zeigt die Ergebnisse der oben angeführten Feuerungsanlage. Die gestufte Verbrennung des Braunkohlenstaubes der Fa. Rheinbraun ergab sich vor allem aus den Anforderungen an NO_x -Emission. Die Umsetzung des im Brennstaub vorhandenen Stickstoffanteils zu NO_x kann am wirksamsten durch Stufung des Verbrennungsprozesses vermieden werden.

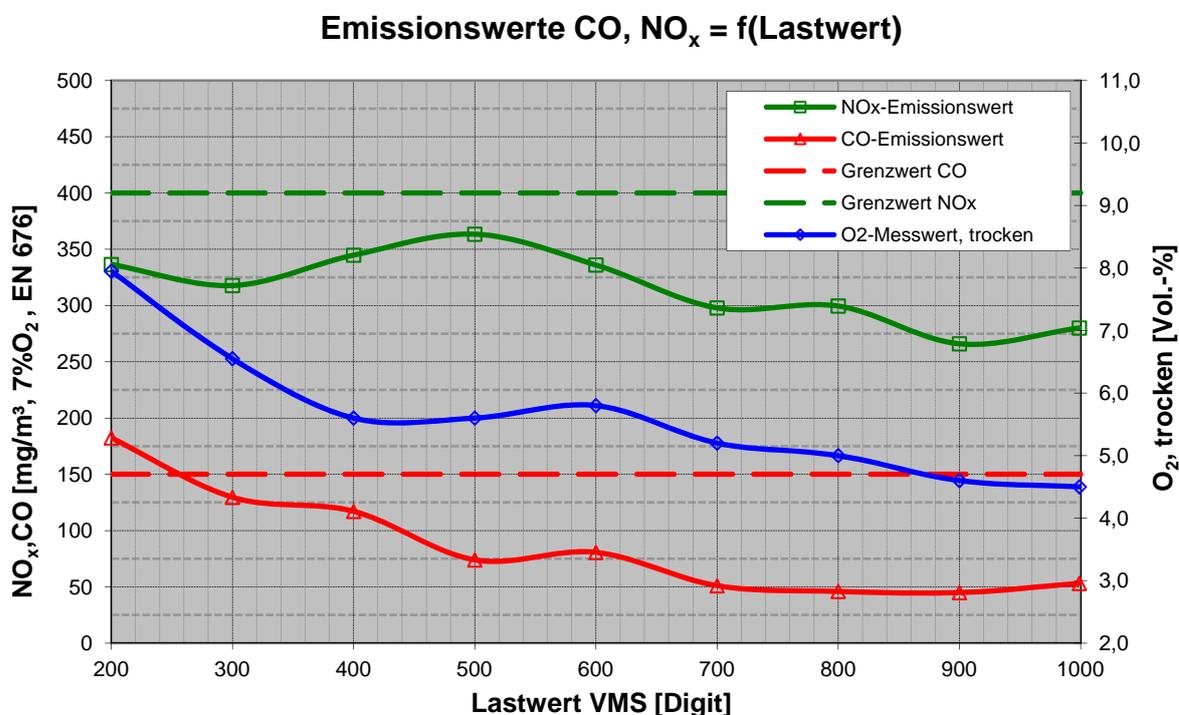


Abbildung 14: Emissionsergebnisse der 19 MW Braunkohlenstaubfeuerung.

Die Ergebnisse der Simulation korrelierten sehr gut mit den Betriebsdaten in der Praxis. So wurden bereits während der Simulation einige unerwünschte Prozessparameter erkannt und durch Variation optimiert. Dies führte u.a. zur erheblichen Verkürzung der Entwicklungszeit. Aber auch die erzielten Emissionswerte liegen im Bereich der Erwartungen und zum Teil sogar deutlich darunter. Durch die optimierte Prozessführung mit hohem Drallgrad in der primären Verbrennungszone, starker interner Rezirkulation und optimierter Einmischung der Ausbrandluft konnten unerwünschte Temperaturspitzen vermieden werden. In der Folge sind die Messwerte für NO_x und SO_x deutlich niedriger als an ähnlichen Feuerungen. Der in der Asche enthaltene CaO-Anteil wird optimal ausgenutzt, da ein „Totbrennen“ - der Verschluss der inneren Porosität der Aschepartikel - wirksam vermieden wird. Die Verweilzeit in der unterstöchiometrischen Verbrennungszone stellt sehr gute NO_x -Werte über dem gesamten Lastbereich sicher. Der Umwandlungsgrad des im Brennstoff enthaltenen Stickstoffanteils wurde aus den gemessenen Emissionen zu ca. 13 % errechnet.

7 ZUSAMMENFASSUNG

Die Untersuchung unbekannter Brennstoffe, die Entwicklung neuer Brennkammersysteme, Prozesse usw. erfordert das Zusammenwirken von Untersuchungen im Labor-, Pilot- und industriellen Maßstab in Verbindung mit der mathematischen Modellierung.

Laboruntersuchungen stehen häufig am Anfang von Entwicklungen und stellen sowohl für die konventionelle Auslegung als auch für die modellunterstützte Auslegung eine wichtige Grundlage dar. Mit den Erfahrungen aus Pilotanlagen und industriellen Anlagen lassen sich die Modellparameter, sowohl für vereinfachte wie auch komplexe CFD-Simulationen, ermitteln und anpassen, wodurch die Qualität der Simulationsergebnisse entsprechend verbessert wird.

Mit den modernen Werkzeugen der CFD-Simulation lassen sich die Entwicklung effizienter und emissionsarmer Feuerungssysteme vereinfachen und Entwicklungszeit und Kosten sowie das technische Risiko senken, wie in dem vorliegenden Beitrag am Beispiel einer 19 MW Trockenbraunkohlestaubfeuerung dargestellt worden ist.

8 SYMBOLVERZEICHNIS

Symbole

\mathfrak{R}	universelle Gaskonstante, 8,314 J/(mol·K)
ϑ	Temperatur, °C
ξ	Massenanteil, kg/kg
ψ	Volumenanteil, m ³ /m ³
A_c	Frequenzfaktor der Restkoksverbrennung, kg/(m ² ·s·Pa ⁿ)
A_v	Frequenzfaktor der Pyrolyse / Entgasung, 1/s
<i>BKS</i>	Braunkohlestaub
d	Partikeldurchmesser, m
E	Aktivierungsenergie, J/mol
F	Fläche, m ²
f	Abweichung
k_c	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante der Restkoksverbrennung, kg/(m ² ·s)
k_v	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante der Pyrolyse / Entgasung, 1/s
m	Masse, kg
n	Reaktionsordnung oder Partikelanzahl
p	Druck, Pa
T	absolute Temperatur, K
t	Verweilzeit, s
u	Unverbranntes, kg/kg
z	Reaktionsweg, m
<i>SKS</i>	Steinkohlestaub
<i>wf</i>	wasserfrei

Indizes

0	Startwert bei $t = 0$
<i>A</i>	Asche
<i>B</i>	Brennstoff
<i>C</i>	Restkoks (fixed Carbon)
<i>d</i>	trockene
<i>H</i>	Feuchte
<i>m</i>	mittlere
<i>max</i>	maximale
<i>O2</i>	Sauerstoff
<i>P</i>	Partikel
<i>R</i>	Rückstand
<i>S</i>	Oberfläche
<i>V</i>	flüchtige Bestandteile

9 LITERATUR

- [1] Zelkowski, J.: Kohlecharakterisierung und Kohleverbrennung - Kohle als Brennstoff, Physik und Theorie der Kohleverbrennung, Technik. 2. Auflage. Herausgeber: VGB PowerTech e.V. Essen, Verlag: VGB PowerTech Service GmbH, Essen, 2004.
- [2] Spörl, R.; Stein-Brzozowska, G.; Maier, J.; Scheffknecht, G.: Schwefeloxidkonzentrationen bei Kohlenstaubfeuerung im Oxy-Fuel-Betrieb Tagungsband: Kraftwerkstechnik - Sichere und nachhaltige Energieversorgung - Band 3. Hrsg.: Beckmann, M.; Hurtado, A., Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2011. ISBN: 978-3-935317-72-6.
- [3] Mieske, K.; Kather, A.: Experimentelle Untersuchungen der Schadstoffentstehung bei der Verbrennung im Oxyfuel-Prozess, Künftiges Brennstoff- und Technologieportfolio in der Kraftwerkstechnik. In: 40. Kraftwerkstechnisches Kolloquium, Tagungsband 1, Dresden, 2008.
- [4] Bohn, J.; Dias, P.; Goanta, A.; Blume, M.; Spliethoff, H.: Untersuchung des Verbrennungsverhaltens eines nichtstöchiometrischen Oxycoal-Brenners. In: Kraftwerkstechnik - Sichere und nachhaltige Energieversorgung - Band 2. Hrsg.: Beckmann, M.; Hurtado, A., Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2010. ISBN: 978-3-935317-57-3.
- [5] Gehrman, H.; Nolte, M.; Kolb, T.; Seifert, H.; Waibel, P.; Matthes, J.; Keller, H.: Co-Verbrennung von Ersatzbrennstoffen in Kraftwerksfeuerungen. In: Kraftwerkstechnik - Sichere und nachhaltige Energieversorgung - Band 2. Hrsg.: Beckmann, M.; Antonio Hurtado, Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2010. ISBN: 978-3-935317-57-3.
- [6] Burchardt, U.; Griebe, S.; Kass, H.; Giering, R.; Preusche, R.: Erfahrungen aus dem Testbetrieb der Oxyfuel-Forschungsanlage von Vattenfall. In: Kraftwerkstechnik - Sichere und nachhaltige Energieversorgung - Band 3. Hrsg.: Beckmann, M.; Hurtado, A., Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2011. ISBN: 978-3-935317-72-6.
- [7] Kluger, F.; Mönckert, P.; Wild, T.; Lévasséur, A. A.; Kenney, J.; Turek, D. G.: Untersuchung von Lausitzer Braunkohle an einer 15 MW_{th} Oxy-Pilotanlage mit Tangentialfeuerung. In: Kraftwerkstechnik - Sichere und nachhaltige Energieversorgung - Band 3. Hrsg.: Beckmann, M.; Hurtado, A., Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2011. ISBN: 978-3-935317-72-6.
- [8] Weigl, S.: Modellierung und experimentelle Untersuchungen zum Oxyfuel-Prozess an einer 50 kW Staubfeuerungs-Versuchsanlage. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2009.
- [9] Wilhelm, R.: Bildung und Reduktion von Stickoxiden bei Braunkohlefeuerungen im Luft- und Oxyfuel-Betrieb. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2010.
- [10] Chyrkin, A.; Huczowski, P.; Shemet, V.; Singheiser, L.; Quadackers, W.J.: Sub-Scale Depletion and Enrichment Processes During High Temperature Oxidation of the Nickel Base Alloy 625 in the Temperature Range 900-1000 °C Oxidation of Metals, 75 (2011) 3/4, S. 143-166, 2011.
- [11] Warnatz, J.; Maas, U.; Dibble, R.W.: Verbrennung: Physikalisch-Chemische Grundlagen, Modellierung und Simulation, Experimente, Schadstoffentstehung. Berlin Heidelberg: Springer, 1997. ISBN: 3-540-61556-6.
- [12] Wolfrum, J.: Bildung von Stickoxiden bei der Verbrennung. Chemie-Ingenieur-Technik, 44 (1972), S. 656-659, 1972.

- [13] Beckmann, M.; Pohl, M.; Gebauer, K.; Ncube, S.; Spiegel, W.; Müller, W.: Characterisation of Refuse Derived Fuels in View of the Corrosion Potential. In: Proceedings of the International Conference on Incineration and Thermal Treatment Technologies - IT3, 18.05.-22.05.2009, Cincinnati (USA).
- [14] Unz, S.; Wen, T.; Beckmann, M.: Characterization of Biomass Used in Thermal Processes with Regard to the Kinetic Properties. In: Proceedings of the 35th International Technical Conference on Clean Coal & Fuel Systems, 06.06.-10.06.2010, Clearwater (USA), ISBN: 978-0-932066-35-6.
- [15] Field, M. A.: Rate of combustion of size-graded fractions of char from a low-rank coal between 1200 K and 2000 K. British Coal Utilization Research Association, 1969.
- [16] Field, M. A.; Gill, D. W.; Morgan, B. B.; Hawksley, P. G. W.: Combustion of Pulverized Coal. BCURA, Leatherhead, 1967.
- [17] Baum, M. M.; Street, P. J.: Predicting the Combustion Behavior of Coal Particles. Combustion Science and Technology, Vol. 3, pp. 231-243, 1971.
- [18] Ballester, J.; Jimenez, S.: Kinetic parameters for the oxidation of pulverized coal as measured from drop tube tests. Combustion and Flame, Vol. 142, pp. 210-222, 2005.
- [19] Biagini, E.; Cioni, M.; Tognotti, L.: Development and characterization of a lab-scale entrained flow reactor for testing biomass fuels. Fuel, Vol. 84, pp. 1524-1534, 2005.
- [20] Saastamoinen, J.; Aho, M.; Moilanen, A.; Sorensen, L. H.; Clausen, S.; Berg, M.: Burnout of pulverized biomass particles in large scale boiler - Singel particle model approach. Biomass and Bioenergy, 1 - 9, 2010.
- [21] Wilhelm, R.; Beckmann, M.: Stickoxidbildung bzw. -reduktion in Oxyfuel-Feuerungen auf Basis von TBK-Verbrennung. In: Kraftwerkstechnik - sichere und nachhaltige Energieversorgung. Hrsg.: Beckmann, M.; Hurtado, A., Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2009, S. 357-367, ISBN: 978-3-935317-42-9.
- [22] Urlass, C.: Reaktionsgleichgewichte bei der Brennstoff-NO-Bildung und -reduktion in Gas- und Kohlefeuerungen. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, 2011.
- [23] Pohl, M.; Bernhardt, D.; Ncube, S.; Beckmann, M.; Spiegel, W.; Müller, W.: Diagnostic Methods into the Corrosion Potential of Alternative Fuels i.e. Biomass and Refuse Derived Fuels. In: Proceedings of the Conference on Impacts of Fuel Quality on Power Production and Environment, 29.08.-03.09.2010, Saariselkä (FIN).
- [24] Spiegel, W.: Analyse des Rohgases und der Kesselablagerung zur Beurteilung der Ersatzbrennstoffqualität. In: Energie aus Abfall - Band 1. Hrsg.: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M., Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2006, S. 441-458, ISBN: 978-3-935317-24-5.
- [25] Thiel, C.; Bernhardt, D.; Pohl, M.; Beckmann, M.: Kreislaufelemente bei einer 50 kW_{th}-Braunkohlestaubfeuerung unter Oxyfuelbedingungen. In: Kraftwerkstechnik - Sichere und nachhaltige Energieversorgung - Band 3. Hrsg.: Beckmann, M.; Hurtado, A., Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2011, S.117-130. ISBN: 978-3-935317-72-6.
- [26] Spiegel, W.; Herzog, T.; Jordan, R.; Magel, G.; Müller, W.; Schmidl, W.: Korrosions-Früherkennung bei Abfall-, Biomasse- und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken. In: Energie aus Abfall - Band 3. Hrsg.: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M., Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2007, S. 235-258. ISBN: 978-3-935317-30-6.

- [27] Levenspiel, O.: Chemical Reaction Engineering. Third Edition, John Wiley & Sons, 1999, ISBN: 0-471-25424-X.
- [28] Specht, E.: Kopplung von Konvektion mit chemischer Kinetik beim Abbrand von Kohlepartikel. Dissertation, TU Clausthal, 1984.
- [29] Raupenstrauch, H.: Ein Beitrag zur Computersimulation reagierender Schüttschichten. Dissertation, Technische Universität Graz, 1991.
- [30] Peters, B.: Measurements and application of a discrete particle model (DPM) to simulate combustion of a packed bed of individual fuel particles. Combustion and Flame, Vol. 131 (2002), pp. 132-146, 2002.
- [31] Malek, C.: Zur Bildung von Stickstoffoxid bei einer Staubfeuerung unter gleichzeitiger Berücksichtigung des Ausbrandes, CUTEC-Schriftenreihe Nr. 6, Dissertation, Technische Universität Clausthal, 1993.
- [32] Beckmann, M.; Horeni, M.: Mathematische Modelle zur energetischen Bewertung und Optimierung von Verfahren der thermischen Abfallbehandlung. In: Thermische Verfahren der Abfallbehandlung - Entwicklungen, Optimierung, Bewertung. 13. DVV-Kolloquium, Fachtagung 23./24.09.2002, Weimar. ISBN: 3-86068-176-1.
- [33] Jeschar, R.: Temperaturverteilung und Wärmeübertragung in Ofenräumen. Methoden zur Energieeinsparung bei Industrieöfen. Tagungsband, Clausthal-Zellerfeld, 17./18. Mai 1990.