

XVII ZJAZD TERMODYNAMIKÓW

Konferencja Naukowa

POLITECHNIKA KRASKOMWSKA im. T. KOŚCIUSZKI - Kraków 1999

**Klaus GÖRNER* , Thomas KLASEN* ,
Werner AUEL** , Helmut ELKENDORF** ,
Władysław ZABŁOCKI*** , Andrzej STEFAŃSKI*****

OPTIMIERUNG DER FEUERUNG FÜR DAS KRAFTWERK INOWROCLAW (POLEN)

Der steinkohlebefeuerte Dampferzeuger in der Sodafabrik Inowrocław wurde auf eine NO_x -arme Feuerung umgebaut. Hierzu sollten NO_x -arme Brenner und eine Luftstufung im Feuerraum eingesetzt werden. Da die Randbedingungen für den Umbau z.B. durch sehr geringe Sekundärluftgeschwindigkeiten im Brenner gegeben waren, stellte sich die Frage nach dem Betriebsverhalten der Brenner. Hierzu wurde eine Einzelflammeneberechnung durchgeführt und verschiedene Betriebszustände durchgerechnet. Die nach diesen Erkenntnissen ausgelegten und eingesetzten Brenner zeigen in der umgebauten Anlage ein sehr zufriedenstellendes Verhalten.

* Prof. Dr.-Ing. Klaus Görner, Lehrstuhl für Umweltverfahrenstechnik und Anlagentechnik (LUAT), Universität-GH Essen

* Dipl.-Ing. Thomas Klasen, Lehrstuhl für Umweltverfahrenstechnik und Anlagentechnik (LUAT), Universität-GH Essen

** Dipl.-Ing. Werner Auel, Lurgi-Lentjes-Service GmbH (LLS), Düsseldorf

** Helmut Elkendorf , Lurgi-Lentjes-Service GmbH (LLS), Düsseldorf

*** Władysław Zabłocki, Inowrocławskie Zakłady Chemiczne SODA MATWY S.A.

*** Andrzej Stefanski, Inowrocławskie Zakłady Chemiczne SODA MATWY S.A.

EINLEITUNG

In einer Vielzahl von verfahrenstechnischen Prozessen sind technische Verbrennungseinrichtungen integriert oder sind deren Hauptbestandteil. Daher läuft die komplexe Gesamtumsetzung nach den drei Hauptvorgängen : Strömung, Chemische Reaktion und Wärmeübertragung ab [1, 2].

Bei Kohlenstaubfeuerungen erfolgen die Verbrennungsvorgänge der zu Staub gemahlene Stein- oder Braunkohle in der Schwebe. Der brennfertige Staub wird durch die Primärluft in den Feuerraum eingeblasen, wo er sich mit der Sekundärluft vermischt. Eine gute Vermischung zwischen Verbrennungsluft und Brennstoff ist Voraussetzung für das Erreichen der gewünschten Flammenlänge.

Prinzipiell kann man die Verbrennung von Kohle in drei wesentliche Vorgänge unterteilen [1, 2, 3, 4]. Der erste Schritt der Kohleverbrennung ist die Pyrolyse der Rohkohle. Aus ihr entweichen formal die flüchtigen Bestandteile und Koks bleibt zurück. In heterogenen Reaktionen brennt dann der Koks ab. Die Pyrolysegase reagieren in homogenen Gasphasenreaktionen zu den Verbrennungsendprodukten. Pyrolyse, Koks- und Flüchtigabbrand laufen dabei simultan und nicht konsekutiv ab.

Mathematische Modelle wurden entwickelt, um Einblicke in Temperatur-, Strömungs- und Konzentrationsfelder von technischen Verbrennungseinrichtungen zu bekommen. Eine mathematische Simulation approximiert die chemischen und physikalischen Vorgänge mit Hilfe von Gleichungen oder Gleichungssystemen.

Sowohl für Versuchseinrichtungen als auch für technische Großanlagen hat sich im letzten Jahrzehnt das Programmpaket FLUENT bewährt. Die Standardversion enthält mehrere projektunabhängige Modelle (z.B. für Turbulenz oder Wärmeübertragung) und ist problemlos durch Unterprogramme erweiterbar, so daß auch projektspezifische Modelle eingesetzt werden können.

Hiermit wurde eine Simulationsstudie für die Kohlenstaubfeuerung (Steinkohle) des Kraftwerkes der Sodafabrik Inowrocław, Polen durchgeführt. Bei der Feuerung handelt es sich um eine Gegenfeuerung (Boxerfeuerung) mit acht Brennern, die horizontal gegeneinander kämmend angeordnet sind. Den vier Brennern der Vorder- und Rückwand ist jeweils eine Mühle (Claudius Peter Kugelringmühle, Typ EM 47-568) zugeordnet.

Bei der Simulation waren die folgenden Randbedingungen zu berücksichtigen :

- hohe O_2 -Konzentrationen im Flammenkern durch großen Primärluftanteil,
- kleiner Mischimpuls durch geringen Sekundärluftanteil und
- begrenzte Flammenlänge aufgrund der Feuerraumgeometrie.

Die Simulation sollte insbesondere die folgenden Fragestellungen klären :

- Optimierung des Brenners bezüglich der Sekundärluftzuführung (Impuls) und
- hinreichende Verbrennung bei gegebenen Brenner- und Randbedingungsdaten.
(NO_x -Konzentrationen $\approx 400 \text{ mg/m}^3$ i.N. / Unverbranntes $< 7\%$ in Flugasche)

2. MATHEMATISCHE MODELLIERUNG

Bei der mathematischen Modellierung werden die Verbrennungsteilvorgänge durch Transportgleichungen beschrieben. Unabhängig vom Anwendungsfall kann die Verteilung einer allg. Zustandsgröße φ , die eine passive oder eine transportierende, skalare oder vektorielle Größe darstellen kann, in der Euler-Form (makroskopische Betrachtung oder Kontinuumsapproximation) durch folgende differentielle Beziehung (zeitgemittelt) beschrieben werden [2] :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{\varphi}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \bar{\varphi}) = \frac{\partial}{\partial x_j} (D_j \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial x_j}) + S_j \quad (1)$$

Diese Transportgleichung berücksichtigt die zeitliche Änderung, den konvektiven und diffusiven Transport sowie lokale Quellen und Senken. D_φ steht für einen allg. Austauschkoefizient, S_φ beinhaltet alle Quellen bzw. Senken.

2.1 Turbulenz-, Strahlungs- und Reaktionsmodelle

Wird φ in Gleichung (1) durch Geschwindigkeitskomponenten ersetzt, entstehen die sogenannten Reynolds-Gleichungen. Das Aufspalten der allgemeinen Größe φ in einen mittleren Wert $\bar{\varphi}$ und einen fluktuierenden Anteil φ' ist für alle entwickelten Turbulenzmodelle [5] der grundlegende Ansatz. Das Problem der Schließung wird durch zusätzliche Ausdrücke gelöst. Hierbei ist vor allem das k- ϵ -Modell (Turbulenzenergie und Dissipationsrate) zu nennen.

Die energetische Bilanzierung, in der φ durch die Enthalpie h substituiert ist, stellt die Basis der Wärmeübertragungsmodelle dar. In der Bilanzgleichung kann der Strahlungsaustausch als Quellterm interpretiert werden. Ein häufig verwendetes Strahlungsmodell ist das „P-1-Modell“. Hierbei werden Strahlen in drei diskrete Ortsrichtungen ausgesendet und soweit verfolgt werden, bis ihre gesamte Energie dissipiert ist. Wand- und Gaselemente können Strahlungsenergie emittieren, absorbieren und streuen. Die Beschreibung der optischen Eigenschaften, insbesondere der zusätzlichen Strahlungseigenschaften der Feuerraumsuspension, die sowohl aus Bandenstrahlern (H_2O , CO_2) als auch aus Festkörperstrahlern (Kohle, Koks, Asche, Ruß) besteht, ist allerdings ein relativ komplexes Themengebiet.

Reaktionsmodelle wurden für die Bilanzierung einer Spezieskonzentration ($c_\alpha = \varphi$) entwickelt. Da neben der Konzentration auch der chemische Umsatz von der Turbulenz beeinflusst wird, sind diverse Reaktionsmodelle entwickelt worden, bei denen mit Hilfe der stöch. Koeffizienten der Reaktionen ($CH_4 + O_2 \rightarrow CO + 2 H_2O$ und $2 CO + O_2 \rightarrow 2 CO_2$) und einem modifizierten Eddy-Break-Up-Modell von MAGNUSSEN und HJERTAGER [6], die Quellterme modelliert werden können.

Unter Zufuhr von Energie durch Strahlung und Konvektion läuft der Prozeß der Pyrolyse am Kohlekorn ab. Formal läßt sich dieser physikalische Prozeß als Pseudoreaktion (chemische Reaktion) beschreiben. Häufig wird auch ein Modell mit zwei bei unterschiedlichen Temperaturen ablaufenden parallelen Reaktion gewählt (Kobayashi-Modell). Beim Abbrand des Kokeses müssen neben der chemischen Kinetik auch Transportvorgänge berücksichtigt werden. Die Diffusion des Sauerstoffs durch die Grenzschicht der Kohleteilchen sowie durch das Porensystem wird üblicherweise durch eine Pseudoreaktion 1. Ordnung beschrieben. Der Flüchtig-abbrand kann als homogene Reaktion von C_xH_y bzw. CO_2 aufgefaßt werden. In technischen Feuerungen setzt sich die NO_x -Emission aus NO (95 %) und NO_2 (5 %) zusammen. Die NO -Bildung läuft nach den beiden Pfaden :

- thermische NO -Bildung und
- Brennstoff- NO -Bildung ab.

Die thermische NO -Bildung wird häufig durch den sogenannten Zeldovich-Mechanismus beschrieben ($O+N_2 \leftrightarrow NO+N$ / $N+O_2 \leftrightarrow NO+O$ / $N+OH \leftrightarrow NO+H$).

Die Brennstoff- NO -Bildung basiert auf dem Stickstoffgehalt der Kohle. Es entstehen zunächst NH -Radikale, die je nach Sauerstoffkonzentration entweder zu NO_x aufoxidiert oder zu N_2 reduziert werden [2].

2.2 Numerische Methoden

Mit analytischen Verfahren ist Gleichung (1) nicht lösbar. Für die numerische Simulation von Verbrennungsprozessen wird häufig die Finite-Differenzen-Methode eingesetzt. Bei ihr wird an diskreten Stellen des Lösungsraumes die Lösung approximiert und daraus stückweise die Lösungsfunktion zusammengesetzt. Aus Stabilitätsgründen wird eine versetzte Gitterdefinition gewählt, bei der die vektoriellen Geschwindigkeitskomponenten im Gegensatz zu den skalaren Eigenschaftswerten bis zur Gitterlinie verschoben sind. Durch Interpolation können dann die skalaren Eigenschaftswerte in den Zellwänden gewonnen werden.

3. BESCHREIBUNG DES KOHLENSTAUBBRENNERS

3.1 Geometrie des Brenners und Betriebsdaten des Referenzfalles

Der prinzipielle Aufbau des Brenners ist in Bild 3.1 dargestellt. Die Verbrennungsluft wird gestuft zugeführt und zwar als Kernluft (KL), Primärluft (PL), Sekundärluft 1 (SL1) und Sekundärluft 2 (SL2). Ein Wirbelstromschieber soll bewirken, daß die Sekundärluft 2 mit einem Drall von $S=0,78$ beaufschlagt wird. Das Verhältnis zwischen SL1 und SL2 ist über Klappen frei variierbar. Bei der Auslegung (Referenzfall) wurde ein Verhältnis von 2,94 gewählt.

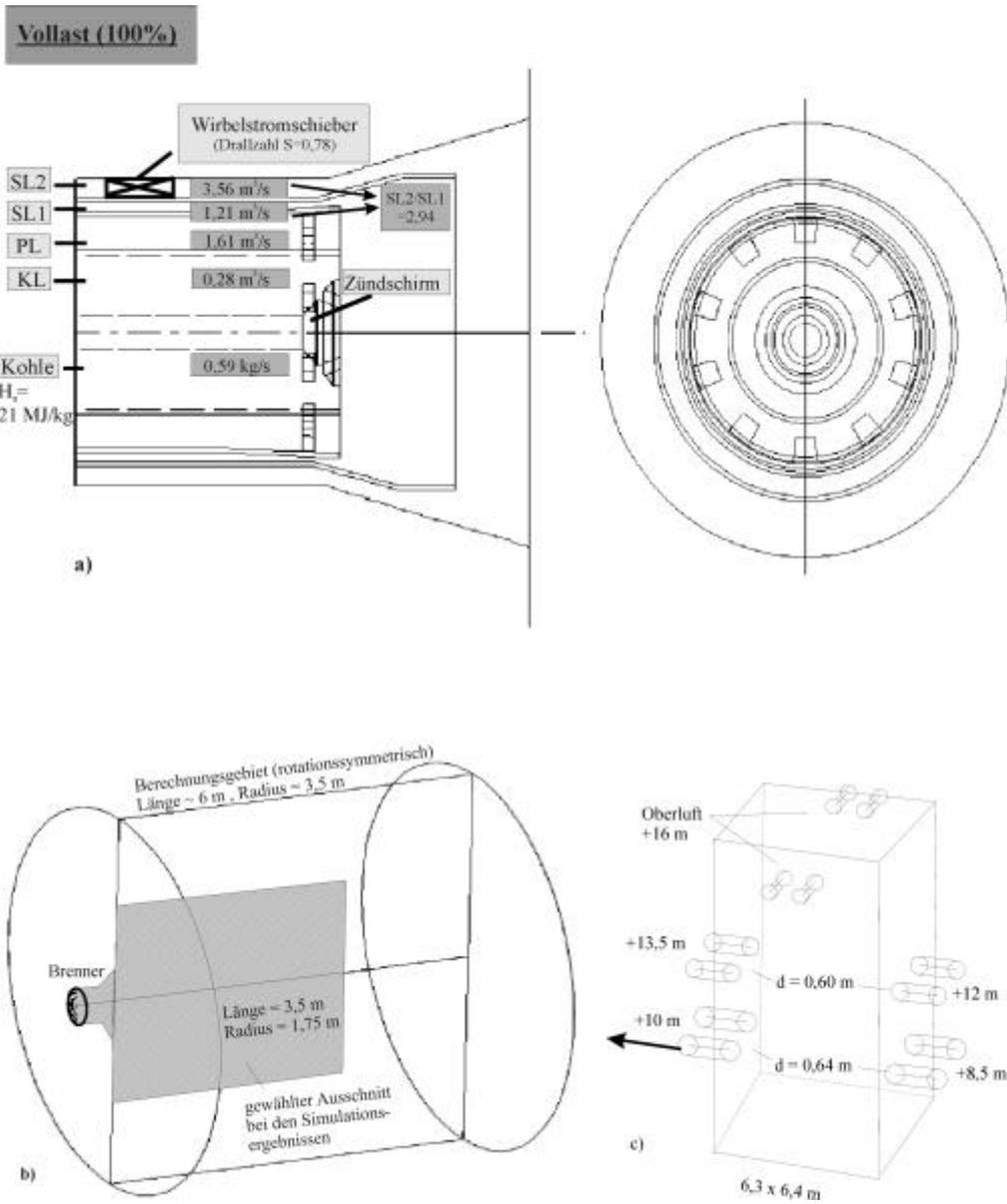


Bild 3.1 a - Brennergeometrie und Betriebsdaten des Referenzfalles, b - Schnittdarstellung und Berechnungsgebiet, c - Feuerraum Inowroclaw

3.2 Betriebsdaten der Simulationsfälle A, B und C

Exemplarisch werden im Folgenden drei repräsentative Betriebsfälle dargestellt. Die Geometrie des Wirbelstromschiebers läßt eine maximale Drallzahl von $S=0,78$ resultieren. In der Realität wird aufgrund von Wandreibungseffekten die tatsächliche Drallzahl etwas niedriger sein. Daher wurde für den Vollastfall eine weitere Rechnung mit einem Drall von 0,6 durchgeführt (Fall A).

Bei konstantem Sekundärluftverhältnis und einer Drallzahl von 0,6 wurde außerdem ein Teillastfall (50%, Halblast) simuliert (Fall B).

Für den Halblastfall wurde zusätzlich das Sekundärluftverhältnis variiert. Zum Vergleich wurde ein Verhältnis SL_2/SL_1 von 2,2 gewählt (Fall C)

4. SIMULATIONSERGEBNISSE

4.1 Referenzfall

Die Kohlenarten „Szombierki“ und „Halex“ werden in Inowrocław verfeuert. Die Eigenschaften dieser Kohlen sind in Tabelle 1 aufgeführt. Bei der Simulation wurde die „Szombierki-Kohle“ eingesetzt.

Kohle	H_u [kJ/kg]	Wassergehalt [%]	Aschegehalt [%]	Flüchtigengehalt [% waf]
Halex	25000	8	9 - 11	27,8
Szombierki	21000	9 - 11	20 - 25	36 - 37

Tabelle 1 : Brennstoffeigenschaften

In den Darstellungen 4.1 a - h sind die berechneten Geschwindigkeits-, Temperatur- und Speziesverteilungen sowie die Koksabbrandrate abgebildet. Bilder 4.1 a und c zeigen ein für Verbrennungssysteme typischen Geschwindigkeitsverlauf mit äußerer und innerer Rezirkulationszone. Die Pyrolyse beginnt direkt am Brennermund, wo die höchste Pyrolysegas- bzw. C_xH_y -Konzentration (Bild 4.1 b) mit 20 Ma-% zu erkennen ist. Der Abbrand der Flüchtigen und des Koks erfolgt unmittelbar nach der Pyrolyse, wie an den Maximalwerten von CO (Bild 4.1 d) und der Koksabbrandrate (Bild 4.1 f) festzustellen ist. Bei der Oxidation von C_xH_y sowie CO zu CO_2 wird Wärme freigesetzt. Folglich sind die höchsten Temperaturwerte (Bild 4.1 g) an den Stellen zu finden, wo auch die CO_2 -Konzentration (Bild 4.1 h) sehr groß ist. Der O_2 -Verlauf in Bild 4.1 e sieht prinzipiell entgegengesetzt aus. Die Spitzentemperatur im gewählten Ausschnitt liegt mit $1500^\circ C$ sehr nah am Brennermund. Da auch der Ausbrand von C_xH_y und CO frühzeitig erfolgt, darf zumindest für den Auslegungs- bzw. Referenzfall eine stabile Flamme erwartet werden.

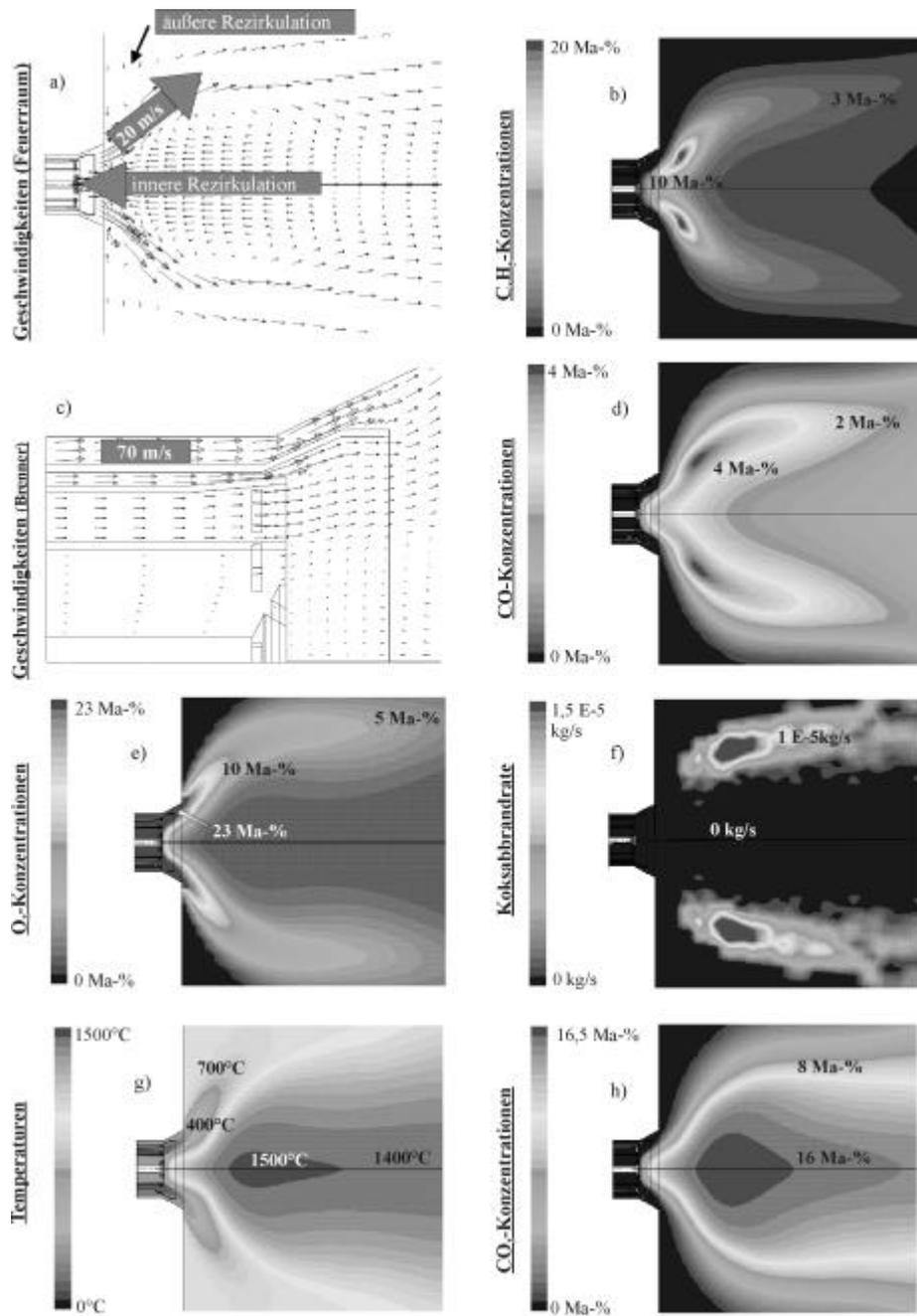


Bild 4.1 Simulationsergebnisse des Referenzfalles :
a, c - Geschwindigkeitsverteilungen, g - Temperaturverteilung
b, d, e, h - Speziesverteilungen, f - Koksabbrandrate

4.2 Drallzahl

Die tatsächliche Drallzahl wird vermutlich kleiner sein als die theoretische (rechnerische) mit $S=0,78$. Die Auswirkungen einer geringeren Drallzahl ($S=0,6$) auf die Flammenstabilität sind in den Bildern 4.2 a-d dargestellt.

Im Vergleich zum Referenzfall (Bild 4.2 a) liegt die maximale Temperatur bei Fall A (Bild 4.2 b) um etwa 200°C niedriger. Die heißeste Zone ist zudem stromabwärts gewandert. Der Spitzenwert des CO-Massenanteils ist bei $S=0,6$ (Bild 4.2 d) gegenüber dem Referenzfall (Bild 4.2 c) um etwa 45% auf $0,05\text{ kg/kg}$ angestiegen.

Das Mischverhalten zwischen Brennstoff und Verbrennungsluft hat sich mit fallender Drallzahl also verschlechtert, was sich nachteilig auf die Flammenstabilität und den Ausbrand auswirkt. Eine Drallzahl von $S=0,6$ sollte daher nicht wesentlich unterschritten werden.

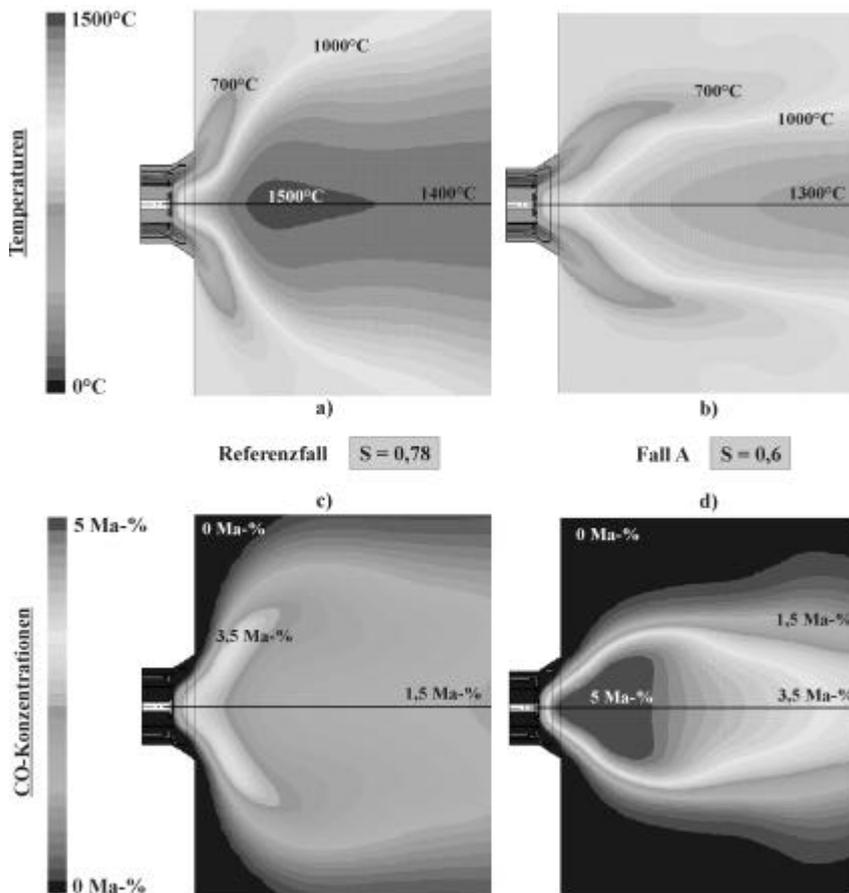


Bild 4.2 Variation der Drallzahl : a-b Temperaturen, c-d CO-Konzentrationen

4.3 Sekundärluftverhältnis

In den Bildern 4.3 a - b sind Temperaturfelder aufgeführt, die Aussagen darüber machen können, ob die Flammenstabilität bei einem Halblastfall (Fall C, Bild 4.3 a) und zusätzlich bei Erhöhung des SL1-Anteiles (Fall D, Bild 4.3 b) abnimmt.

Eine Fahrweise bei Halblast wirkt sich nicht besonders negativ auf das Temperaturfeld aus. Obwohl das mittlere Temperaturniveau bei Teillast natürlich niedriger ist, wird die maximale Temperatur wieder am Ausschnittsende mit 1300°C erreicht. Die Stabilität der Flamme ist gegenüber dem Vollastfall (Fall A, 4.2) also nahezu gleich geblieben. Wesentlich niedriger ist das Temperaturniveau bei Fall D aus. Bei einem SL2/SL1-Verhältnis von 2,2 ist der SL1-Anteil so groß geworden, daß eine Kühlwirkung in der Flammenwurzel eintritt. Das Temperaturprofil in der Flamme verschiebt sich nach hinten und die maximale Temperatur im gewählten Schnitt liegt um etwa 300°C niedriger als bei Fall C.

Mit abnehmender Drallzahl und im Teillastbetrieb wird die Verbrennung erwartungsgemäß „weicher“.

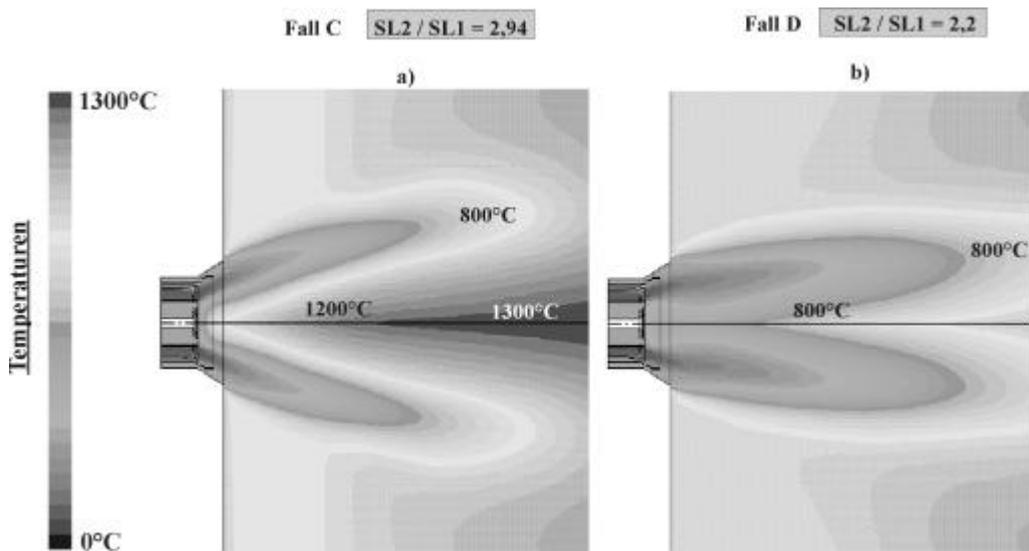


Bild 4.3 Veränderung des Sekundärluftverhältnisses : a - b Temperaturverteilungen

5. BETRIEBSVERHALTEN UND -ERFAHRUNG

Die aus diesen Simulationsrechnungen gewonnenen Erkenntnisse sind in die Konzeption und Auslegung der Kohlenstaubbrenner eingeflossen. Hierfür war insbesondere die Frage von Interesse, ob die durch die Randbedingungen gegebene, sehr geringe Sekundärluftgeschwindigkeit im Brenner ein ausreichendes Mischverhalten zwischen Brennstoff und Sekundärluft erwarten läßt. Bei unzureichender Mischung wäre das Unverbrannte in der Flugasche unzulässig angestiegen. Vertraglich festgelegt ist ein UV-Anteil von 7 %. Eine schlechte Vermischung hätte ebenfalls negative Auswirkungen auf die Flammenstabilität, wobei diese natürlich noch von einer Reihe anderer Einflußfaktoren abhängt. Mit den vorliegenden Möglichkeiten der Simulation konnte eine ausreichende Flammenstabilität vorhergesagt werden, die ebenfalls im Betrieb bestätigt wurde. Auf die NO_x -Emission kann grundsätzlich durch eine verzögerte Vermischung positiv eingewirkt werden, wobei jedoch die obigen limitierenden Faktoren wie Unverbranntes, Stabilität und CO-Bildung zu berücksichtigen sind.

Beim Erprobungsbetrieb konnten die folgenden Ergebnisse erzielt werden :

50 bis 110 t/h Dampf (gesamter Kesselarbeitsbereich) werden problemlos bei einer Fahrweise im 2-Mühlenbetrieb erreicht. Die garantierten Emissionswerte werden bei Dampfleistungen zwischen 65 und 110 t/h Dampf gesichert eingehalten. Mit Rücksicht auf die Frischdampf Temperatur von 465°C wird die Feuerung bei einer Dampfleistung von unter 70 t/h mit einem erhöhten Luftüberschuß betrieben. Entsprechend liegen die auf 6% O_2 bezogenen NO_x -Werte oberhalb 450 mg/ m^3 i.N..

Da die Oberluft mit einem Druck zwischen 15 und 25 mbar (lastabhängig) eingedüst wird, kommt es aufgrund des hohen Impulses zu einer optimalen Mischung mit den Rauchgasen. In allen Lastpunkten sowie bei dynamischen Betriebsverhältnissen (Laständerungen) kann somit bei geringem Luftüberschuß ein guter Ausbrand sowie eine homogene Feuerführung (geringe Druckschwankungen im Feuerraum) realisiert werden. Weil die Oberluft direkt über der obersten Brennerebene eingedüst wird, ist eine gesicherte Verbrennung auch bei einem Betrieb mit einer Mühle gegeben.

Weil eine Überwachung der einzelnen Brenner von den Seitenwänden erfolgen muß, ist eine gesicherte Überwachung der Feuerung mit Flammenwächtern problematisch. Die herkömmliche Überwachung aus dem Kernluftrohr ist wegen der dunkleren Flamme im Kern nicht möglich.

Die Kohlefeuerung wird ohne Oberluft gestartet. Ist das Kohlefeuer in Betrieb, wird die Oberluft vom Bediener auf einen Wert entsprechend der Vorgabe des Reglers geöffnet. Entsprechend wird die Sekundärluft reduziert. Diese Änderung der Luftführung darf nicht zu früh oder muß mit Stützfeuer erfolgen. Die Ausbildung einer stabilen Kohlenstaublamme erfolgt über einen wesentlich längeren Zeitraum im Vergleich zur Feuerung ohne Oberluft.

Da die Kohlemühlen mit neuen Kugeln bestückt wurden, mußten diese sich den Mahlschüsseln anpassen. Die Auswirkung war, daß in der Anfangszeit mit einem relativ hohen Grobkornanteil im Kohlenstaub gefahren wurde. Dies führte zu Koksanfall im Naßentascher. Bei einer Feuerführung ohne Oberluft wurde dies nicht beobachtet.

Nach der Auslegung soll die untere Brennerlage mit einer Luftzahl von ca. 1,1 bis 1,2 und die obere Brennerlage mit einer Luftzahl von etwa 0,7 bis 0,8 gefahren werden. Für einen gesicherten Betrieb mit NO_x -Werten unter 450 mg/m^3 i.N. werden diese Vorgaben aufgrund eines erhöhten Oberluftanteiles unterschritten.

Der einzuhaltende Grenzwert liegt bei 459 mg/m^3 i.N.. Im Regel-Vollastbetrieb konnte ein Wert unter 400 mg/m^3 i.N. eingehalten werden.

Damit kann aufgezeigt werden, daß die mathematische Modellbildung und Simulation für die praktische Brennerkonzeptionierung und -Auslegung geeignet ist. Hiermit hat der Ingenieur ein leistungsstarkes und kostengünstiges Werkzeug für eine fundierte Feuerungsauslegung in der Hand.

LITERATUR

- [1] Günther, R. : *Verbrennung und Feuerungen*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York und Tokyo, 1984
- [2] Görner, K. : *Technische Verbrennungssysteme*, Springer Verlag, New York, Berlin und Heidelberg, 1991
- [3] Visser, B.M. : *Mathematical Modelling of Swirling Pulverised Coal Flames*, Dissertation Technische Universität Delft, 1991
- [4] Zinser, W. : *Untersuchung technischer Kohlenstaubflammen durch mathematische Modellbildung*, VDI-Berichte (Verbrennung und Feuerungen), Nr. 574, Karlsruhe, 1985, S. 595 - 615
- [5] Griebel, M, Dornseifer, T., Neunhöffer, T. : *Numerische Simulation in der Strömungsmechanik*, Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, Braunschweig / Wiesbaden, 1995
- [6] Peters, F.A., Visser, B.M., Breithaupt, P.P, Weber, R.: *Mathematical Modelling of Swirling Flames of Pulverised Coal*, Journal of Fluids Engineering, 1995, Nr. 117, S. 89 - 297