

Numerische Simulation der Verbrennung in einem 10 MW-Gasbrenner mittels FLUENT

Richard SIEBER, Michael HARASEK, Gerhard LÖFFLER und Hermann HOFBAUER
Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und technische Biowissenschaften,
TU Wien, Getreidemarkt 9/166, A-1060 Wien
August 2004

1. Einleitung

Im Rahmen eines FFF-Projektes soll in Hinblick auf die steigenden Umweltprobleme ein kommerzieller Brenner hinsichtlich seiner Schadstoffemissionen (NO_x , CO, CO_2 , Ruß) optimiert werden. Die im Brenner einsetzbaren Brennstoffe reichen von gasförmigen und flüssigen Normbrennstoffen bis hin zu gasförmigen und flüssigen Abfallstoffen. Dementsprechend groß ist das Einsatzgebiet solcher Brenner. Es erstreckt sich von Industrie- und Kraftwerkskesseln, über Wirbelschichtöfen, Hausmüll- und Sondermüllverbrennungsanlagen bis hin zu Drehrohren und Brennkammern für verschiedenste weitere Aufgabenstellungen.

Gelingt es die Verbrennungsvorgänge in Brenner und Brennkammer zu optimieren, so wird durch die verringerte Schadstoffproduktion ein nennenswerter Beitrag zur Entlastung unserer Umwelt geleistet.

2. Aufgabenstellung

Die Optimierung der Verbrennungsvorgänge soll mit Hilfe von Computational Fluid Dynamics (CFD, numerische Simulation) erreicht werden. Das Projektziel besteht also aus der Erstellung eines Simulationsmodells in CFD, welches in der Lage ist, den Verbrennungsprozess am realen Brenner zu beschreiben. Als Output soll das CFD-Programm Geschwindigkeits-, Temperatur-, Druckverteilungen und Verteilungen verschiedener ausgewählter Spezies stromabwärts vom Brennermund liefern.

Derartige Simulationen ermöglichen im Vergleich zur rein experimentellen Weiterentwicklung von Brennern eine schnellere, gezieltere und kostengünstigere Bewertung der Auswirkungen von verschiedenen Maßnahmen zur Reduktion der Schadstoffemissionen.

Im Rahmen der Arbeit werden nur primäre Maßnahmen in Betracht gezogen, welche sich auf die Optimierung der Luft- und Brennstoffführung beschränken:

- Strömungsinduzierte Rauchgasrückführung durch Erzeugung von Rückstromwirbeln mit Hilfe von Luftverdrallung

Durch die Rückströmung von Rauchgasen kommt es zu einer teilweisen Inertisierung der Verbrennungsluft. Dadurch erhöht sich deren Wärmekapazität, was zu einer Absenkung der Spitzentemperaturen in der Flamme und folglich zur gewünschten Reduktion von thermischem NO führt, welches den Grossteil der aus dem Luftstickstoff entstehenden NO_x-Emissionen ausmacht (Warnatz 2001).

- Gestufte Verbrennung (RQL = rich-quick-lean approach)

Bei der klassischen gestuften Verbrennung wird das NO_x reduziert indem man die Verbrennung innerhalb der Brennkammer in unter- bzw. überstöchiometrischen Zonen ablaufen lässt. Diese Zonen werden dabei durch zusätzlich zum Brenner eingebaute Brennstoff- und Luftzuführungen, welche sich im Bereich der Brennkammer befinden, realisiert.

Da der hier untersuchte Brennertyp sehr häufig in Flammrohrkesseln eingebaut ist, an denen sich derartige brennkammeransässige Brennstoff- und Luftzuführungen nicht realisieren lassen, wird vom Einsatz dieser abgesehen. Stattdessen soll untersucht werden, inwieweit es möglich ist, alleine mit dem Brenner durch spezielle Strömungsführung von Luft und Brennstoff entsprechende Zonen von fetter bzw. magerer Verbrennung in der Brennkammer aufzubauen, um so die NO_x-Entstehung weiter zu reduzieren (Warnatz 2001).

- Untersuchung des Einflusses von Tropfengröße und Tropfengrößenverteilung auf die Schadstoffentstehung während der Verbrennung

Das Modell soll in drei Stufen erstellt werden:

1. Implementierung der Gasverbrennung in CFD
2. Implementierung der Schadstoffentstehung (NO_x, CO, Ruß, CO₂) in CFD
3. Implementierung der Flüssigkeitsverbrennung in CFD sowie die anschließende Anwendung der unter Punkt 2 erstellten Module

Im Rahmen des Projekts wird anhand von entsprechenden Messungen am realen Brenner das Simulationsmodell auf seine Richtigkeit überprüft und gegebenenfalls verbessert werden.

3. Hardware-Ausstattung

Alle hier vorgestellten Simulationsrechnungen wurden auf dem sc-Clusterrechner des ZID der TU Wien (sc.zserv.tuwien.ac.at) durchgeführt. Hierbei handelt es sich um ein leistungsfähiges Multiprozessor-Alpha-System der Firma Compaq mit einer Hauptspeichergröße von 4 GB RAM pro CPU. Da sich die Größe des Hauptspeichers linear auf die maximale Größe der eingesetzten Geometrien auswirkt und dieser beim verwendeten System entsprechend groß ist, lassen sich auch komplexere Modelle, mit entsprechend vielen Zellen in vernünftigen Zeitaufwand berechnen und auswerten. Weiters lässt sich durch Verwendung von Shared Memory (True 64 Unix) die Berechnung von Simulationen auf mehrere Prozessoren aufteilen und somit die Berechnungszeit weiter verkürzen.

4. Verwendete Software

Für die Simulationsrechnungen wurde ausschließlich das CFD-Programm FLUENT (Version 6.1.22) der amerikanischen Firma FLUENT Inc. verwendet. Dabei handelt es sich um einen Finite-Volumen-Solver, welcher die Grundgleichungen (Massen-, Impuls-, Energie und Speziesbilanz) ggf. unter Berücksichtigung der Turbulenz für jedes der einzelnen Volumina integriert und löst. (Fluent 6 UG 2001)

Die Erstellung der Geometriemodelle erfolgte mit dem CFD-Preprocessor GAMBIT, welcher ebenfalls von der Firma FLUENT Inc. vertrieben wird. (Gambit 2 UG 2001)

5. Beschreibung von Brenner und Kessel

Der betrachtete Brenner erlaubt eine Aufteilung der gesamten zur Verbrennung eingesetzten Luftmenge auf drei unterschiedliche Bereiche. Diese Luftaufteilung hat einen wesentlichen Einfluss auf den Ablauf der Verbrennung. Durch die unterschiedlich einstellbaren Strömungsverhältnisse in Brennernähe lassen sich wichtige Größen wie Flammenform und Flammenlänge einstellen. Diese charakterisieren wiederum die Strömungs-, Temperatur- sowie die Konzentrationsfelder der verbrennungsrelevanten Spezies. So wird beispielsweise die NO_x -Bildung maßgeblich von der Flammenform beeinflusst.

In Abbildung 1 sind neben den sechs Brenngaslanzen die drei unterschiedlichen Bereiche über welche die Verbrennungsluft zugeführt wird dargestellt.

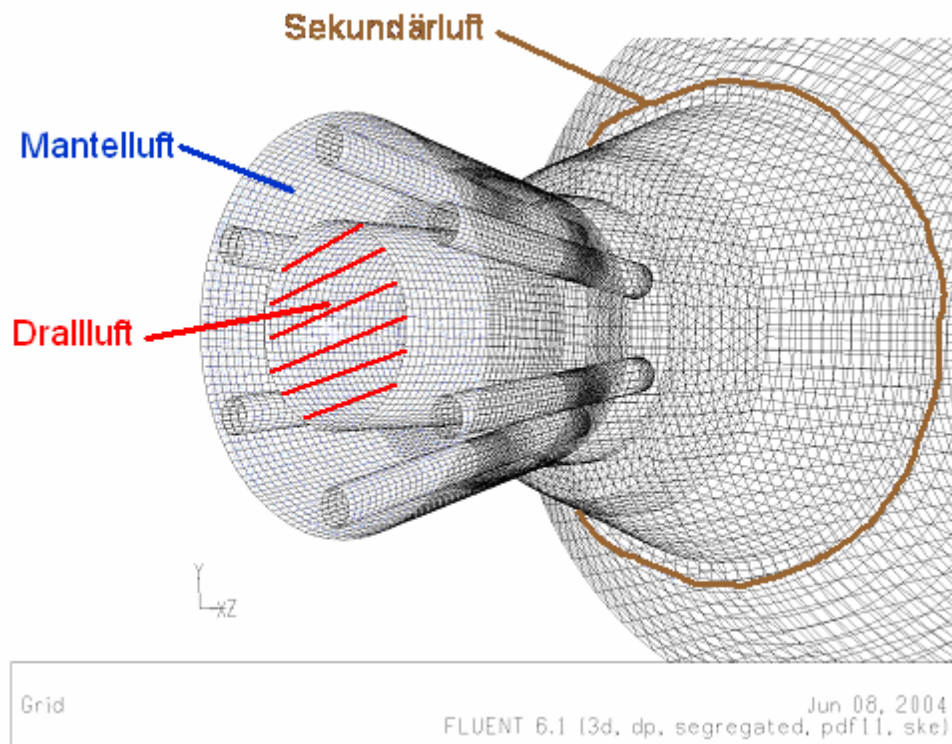


Abbildung 1: Aufteilung der Verbrennungsluft

Durch Verdrehen der Brenngaslanzen um deren eigene Achsen lassen sich die Richtungen der eingedüsten Strahlen einstellen, wodurch eine weitere Möglichkeit besteht, die Flamme in ihrer Form zu verändern.

Die Flamme ragt vom Brenner ausgehend in das zylindrische Flammrohr ($L=5,62$ m, $D=1,5/1,6$ m) (siehe Abbildung 2). Dort wird ein Teil der entstehenden Verbrennungswärme über Konvektion und Strahlung an die gewellte Flammrohroberfläche transportiert und auf die Heißwasserseite (140 °C) übertragen. Nach Passieren des Flammrohres beträgt die Rauchgastemperatur bei Nennlast noch zirka 1000 °C. In den beiden anschließenden Rauchgaszügen wird das Rauchgas in Rohrbündeln auf ca. 180 °C abgekühlt wird, bevor es die Anlage über den Kamin verlässt.

6. Simulation

6.1. Geometriemodell

In Abbildung 2 ist das gesamte 3-D-Geometriemodell dargestellt. Dieses stellt bis auf einige Vereinfachungen (Flammrohrmanteloberfläche glatt statt gewellt ausgeführt, Nachlaufzone in Wirklichkeit nicht vorhanden) das reale Abbild der Brenner-Kessel-Konfiguration dar, an welcher die Simulationen überprüft werden sollen.

Das gesamte Volumen besteht aus ca. 670.000 vorwiegend hexaedrischen Zellen (Cooper-Mesh). Lediglich im Austrittsbereich der Brenngaslanzen war die Verwendung einer aus tetraedrischen Zellen bestehenden Schicht unvermeidbar. Anzumerken ist, dass diese Zellenform im Allgemeinen im Gegensatz zu den hexaedrischen Zellen ein schlechteres Konvergenzverhalten aufweist.

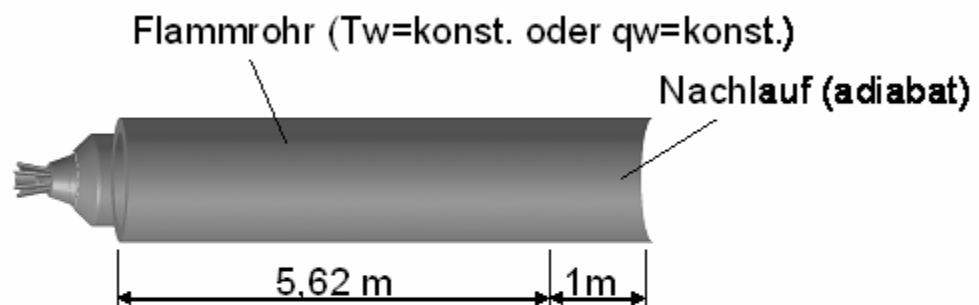


Abbildung 2: gesamtes Simulationsmodell

6.2. Verwendete Berechnungsmodelle

6.2.1. Modellierung der Turbulenz

Zur Berechnung der turbulenten Strömung wird ein Turbulenzmodell benötigt, dessen Notwendigkeit auf das Schließungsproblem bei der Turbulenz zurückzuführen ist.

Das Schließungsproblem entsteht durch die Mittelung der Erhaltungsgleichungen, bei der Terme der Form $\overline{\rho \cdot \vec{v}' \cdot q'}$ ($q' = w_i \dots$ Massenbruch von Element i , $\vec{v}' \dots$ Geschwindigkeitsvektor, $h \dots$ spezif. Enthalpie, $Z_i \dots$ Elementmassenbruch von Element i) auftreten, welche aber nicht explizit als Funktionen der Mittelwerte bekannt sind und demnach mehr Unbekannte als Bestimmungsgleichungen vorliegen.

Zur Lösung des Problems verwendet man Modelle, welche die so genannten Reynoldsspannungs-Terme $\overline{\rho \cdot \vec{v}' \cdot q'}$ in Abhängigkeit von den Mittelwerten beschreiben.

Die heute üblichen Turbulenzmodelle interpretieren den Term als turbulenten Transport und modellieren ihn deshalb in Analogie zum laminaren Fall mit Hilfe eines Gradientenansatzes.

$$\overline{\rho \cdot \vec{v}' \cdot q'} = -\overline{\rho} \cdot \nu_T \cdot \text{grad } \overline{q_i}$$

Zum Gradientenansatz ist kritisch anzumerken, dass dieser eine Quelle vieler Kontroversen ist, da es Experimente gibt, bei denen ein turbulenter Transport auch entgegen des Gradienten beobachtet worden ist.

Die Größe ν_T wird dabei als turbulenter Austauschkoefizient bezeichnet, für dessen Bestimmung zahlreiche Modelle existieren (Null-, Ein- und Zwei-Gleichungs-Modelle).

Nach Einsetzen des entsprechenden Gradientenansatzes in die jeweilige Erhaltungsgleichung erhält man nun ein numerisch lösbares Gleichungssystem.

Da bei den durchgeführten Simulationsrechnungen keine starken Drallkomponenten auftreten (Kriterium: Tangentialgeschwindigkeit kleiner als 50% der Gesamtgeschwindigkeit), darf das so genannte „Standard-k-ε-Modell“ (Zwei-Gleichungs-Modell) verwendet werden. Anderenfalls müsste das rechenintensivere *Reynolds-Spannungs-Modell* (RSM-Modell) verwendet werden.

Anzumerken ist, dass das Standard-k-ε-Modell neben den bereits erwähnten Unzulänglichkeiten des Gradientenansatzes auch an der Geometrieabhängigkeit der Konstanten leidet, welche in den Bestimmungsgleichungen (Differentialgleichungen) für k

und ϵ enthalten sind. Dennoch wird dieses Turbulenzmodell zurzeit am häufigsten eingesetzt, weil kaum bessere Modelle verfügbar sind (Warnatz 2001).

6.2.2. Modellierung der Verbrennung

Beim vorliegenden Brenner wird das Gas in einer nicht-vorgemischten turbulenten Flamme verbrannt. In der vorliegenden Arbeit wurden zwei unterschiedliche Verbrennungsmodelle verwendet.

6.2.2.1. *Unendlich schnelle Reaktion von Brennstoff und Oxidationsmittel (Gleichgewichts-Chemie)*

Bei diesem Simulationsmodell wird angenommen, dass die Verbrennung unendlich schnell das chemische Gleichgewicht erreicht, sobald sich Brennstoff und Luft gemischt haben. Bei Verwendung dieser Annahme muss also lediglich bestimmt werden, wie schnell die Mischung stattfindet.

Durch Einführung des so genannten *Mischungsbruches* ζ (*Zeta*), welcher dem Massenbruch des Brennstoffes in der Mischung entspricht (Werte zwischen 0 und 1) kann bei Annahme gleicher Diffusionskoeffizienten aller Spezies, Lewis-Zahl = 1 (entspricht dem Verhältnis der Dicken von Vorheiz- zu Massendiffusionszone) und fehlender Wärmeverluste (adiabates System) das Feld aller Skalare (Temperatur, Spezies-Massenbrüche und Dichte) als eindeutige Funktion des Mischungsbruches dargestellt werden (Warnatz 2001).

Das Problem der Verbrennung hat sich somit auf die Beschreibung des turbulenten Mischungsprozesses für den *Mischungsbruch* ζ (*Zeta*) reduziert, d.h. es muss nur noch die Erhaltungsgleichung für Zeta gelöst werden. Dabei wird der Turbulenz durch die Einführung einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Mischungsbruches Rechnung getragen. In der dazu verwendeten PDF-Methode wird die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Mischungsbruches durch dessen Mittelwert und Varianz über eine Beta-Funktion charakterisiert. Damit erhält man ein Gleichungssystem bestehend aus den Erhaltungsgleichungen für Dichte- und Geschwindigkeitsfeld, sowie den Bilanzgleichungen für den Mittelwert von Zeta und der Varianz des Mischungsbruches z'^2 .

Im technisch interessanten Falle von Wärmeverlusten (Konvektion an Wand, Strahlung, etc.), also bei nicht-adiabaten Systemen, hängen die besagten Skalare noch zusätzlich vom Enthalpieniveau im entsprechenden Zellvolumen ab.

Das PDF-Modell zur Berechnung der Skalare T , w_i und Dichte koppelt mit dem Turbulenzmodell („Standard-k- ϵ -Modell“) über die Dichte. Das heißt, das PDF-Modell liefert ein Dichtefeld das in das Turbulenzmodell eingeht. Daraus wird ein neues Strömungsfeld berechnet und die Informationen an das PDF-Modell zurückgegeben. Dieser Prozess wird so lange wiederholt bis man eine konvergente Lösung erhält.

Es lassen sich somit Flammenlängen, Temperaturfelder und Konzentrationsfelder von Hauptkomponenten (Brennstoff, Sauerstoff, Wasser, Kohlendioxid) berechnen. Das Modell erlaubt jedoch keine Simulation der Flammenlöschung, Ruß- und Stickoxidbildung.

6.2.2.2. *Endlich schnelle Reaktion von Brennstoff und Oxidationsmittel (Flamelet-Modell)*

Die Verbrennung besteht aus vielen einzelnen chemischen Reaktionen. Mit zunehmender Mischungsgeschwindigkeit wird als erster ein chemischer Prozess aus dem Gleichgewicht gebracht. Mit weiterer Steigerung weichen noch weitere Reaktionen vom Gleichgewicht ab, bis die Reaktionen, die den Hauptteil der Energiebilanz ausmachen bei Zeitskalen angelangt sind, die jener der Mischungsprozesse entsprechen und als Folge die Temperatur unter den Gleichgewichtswert absinkt. Als Folge davon wird beispielsweise weniger NO_x gebildet. Überschreitet man eine bestimmte Relativgeschwindigkeit zwischen Brennstoff und Oxidationsmittel, so kommt es zur globalen Flammenlöschung.

Dieses Abweichen vom Gleichgewichtszustand wird als Flammenstreckung bezeichnet.

Als passender Parameter, der die Abweichung vom Gleichgewichtszustand beschreiben kann, dient die *skalare Dissipationsgeschwindigkeit* κ (Kappa).

Beim Flamelet-Modell wird die turbulente Flamme als ein Ensemble vieler kleiner laminarer Flämmchen (Flamelets) angenähert. Dabei unterscheidet man zwei unterschiedliche Modelle. Im einen haben alle Flämmchen die gleiche skalare Dissipationsgeschwindigkeit κ (Kappa) (Single Laminar Flamelets) und im anderen bewegen sich die Werte für Kappa je nach den lokalen Strömungsverhältnissen in einem vordefinierten Wertebereich (Multiple Strained Laminar Flamelets).

Gelöst wird das gekoppelte Strömungs- und Verbrennungsproblem in gleicher Weise wie beim bereits beschriebenen Modell mit Gleichgewichtschemie.

In der vorliegenden Arbeit wurde ausschließlich das Single Laminar Flamelet Modell verwendet.

6.2.3. Modellierung der Strahlung

Zur Berechnung des Wärmetransportes aufgrund von Strahlung in einem gasförmigen Medium muss die Strahlungstransportgleichung gelöst werden, welche eine Differential-Integralgleichung ist. Im vorliegenden Fall geschieht dies mit dem P1-Modell. Bei diesem wird die Differential-Integralgleichung zu einer Differentialgleichung reduziert, indem die Transportgleichungen durch einen endlichen Satz von Momentengleichungen angenähert werden. Der Absorptionskoeffizient der Gasphase wurde mit dem „*Weighted-Sum-of-Gray-Gases*“-Modell berechnet.

6.2.4. Modellierung der NO_x-Bildung

In FLUENT werden die NO_x-Emissionen in einem Post-Processing-Schritt nach der Berechnung der Konzentrations-, Temperatur- und Geschwindigkeitsfelder ermittelt. Es gibt also keine Rückwirkung der NO_x-Emissionen auf das zuvor berechnete Strömungsproblem, was mit der geringen zu erwartenden Konzentration der Schadstoffe zu rechtfertigen ist.

In FLUENT existiert neben den beiden Modellen zur Berechnung der thermischen und prompten NO_x-Bildung ein weiteres Modell zur Berechnung der NO_x-Bildung aus brennstoffgebundenem Stickstoff. Darüber hinaus kann die Reduktion von NO_x über den so genannten „Reburn-Mechanismus“ berücksichtigt werden, falls die Spezies CH, CH₂ und CH₃ im PDF-File berücksichtigt wurden.

Für die thermische NO_x-Bildung ist die Kenntnis der Konzentration von O und OH notwendig. Beim Modell für die prompte NO_x-Bildung benötigt man die Konzentrationen von CH₄ und O₂.

Eine durchgeführte Evaluierung der FLUENT-Modelle zur NO_x-Bildung aus dem Luftstickstoff hat die folgenden Erkenntnisse gebracht (Löffler 2004).

Bei Standardverbrennungsbedingungen dominiert über 1600 °C die thermische NO Bildung. Die Evaluierung hat gezeigt, dass FLUENT für den Temperaturbereich über 1500 °C in der Lage ist, die NO_x-Bildung richtig abzubilden.

Bei Temperaturen unter 1500 °C hat die Evaluierung gezeigt, dass vor allem der N₂O/NO Mechanismus und die Route über die Bildung von NNH zur Entstehung von NO beitragen. Der prompte Mechanismus in diesem Temperaturbereich ist von untergeordneter Bedeutung außer unter unterstöchiometrischen Bedingungen.

Weiters hat sich gezeigt, dass das Flamelet-Modell (speziell der glarborg.152-Mechanismus) am besten zur Simulation der NO_x-Entstehung geeignet ist. Mit ihm sind die oben erwähnten

notwendigen Konzentrationen von O, OH, CH₄ und O₂ im Gegensatz zum Gleichgewichts-Chemie-Modell direkt zugänglich. Aufbauend auf diese Flamelet-Berechnungen liefern die FLUENT-Modelle für die thermische und prompte NO_x-Bildung akzeptable Ergebnisse.

Kritisch anzumerken ist, dass die Untersuchung die prompte NO_x-Bildung als untergeordnet zeigt und die dominierenden Routen über N₂O und NNH in den vorhandenen Modellen nicht berücksichtigt sind. Es sollte daher überprüft werden, ob diese Routen durch User-Defined-Functions (UDF's) in FLUENT implementiert werden können.

In den bisher durchgeführten Simulationsrechnungen wurde nur das Modell zur Beschreibung der thermischen NO_x-Bildung aktiviert. Dieses liefert eine gute erste Abschätzung der zu erwartenden NO_x-Bildung, da der Großteil des NO_x bei Standard-Verbrennungsanlagen über diesen Mechanismus gebildet wird. Dazu kommt, dass das prompte NO_x außer unter unterstöchiometrischen Bedingungen von untergeordneter Bedeutung ist.

7. Ergebnisse

7.1. Rückströmungsgebiete

In Abbildung 3 sind die Rückströmungsgebiete, welche durch die Saugwirkung von Freistrahlen erzeugt werden dargestellt. Wie bereits in Kapitel 2 erwähnt spricht man hier von interner Rauchgasrezirkulation, welche eine Absenkung der Spitzentemperatur bewirkt und folgedessen zu weniger NO_x -Bildung im System führt. Aus diesem Grund ist es ein wichtiges Ziel, mit Hilfe der Simulationen herauszufinden, für welche Strömungsführung von Luft und Brennstoff es zur stärksten Ansaugung von Rauchgas kommt.

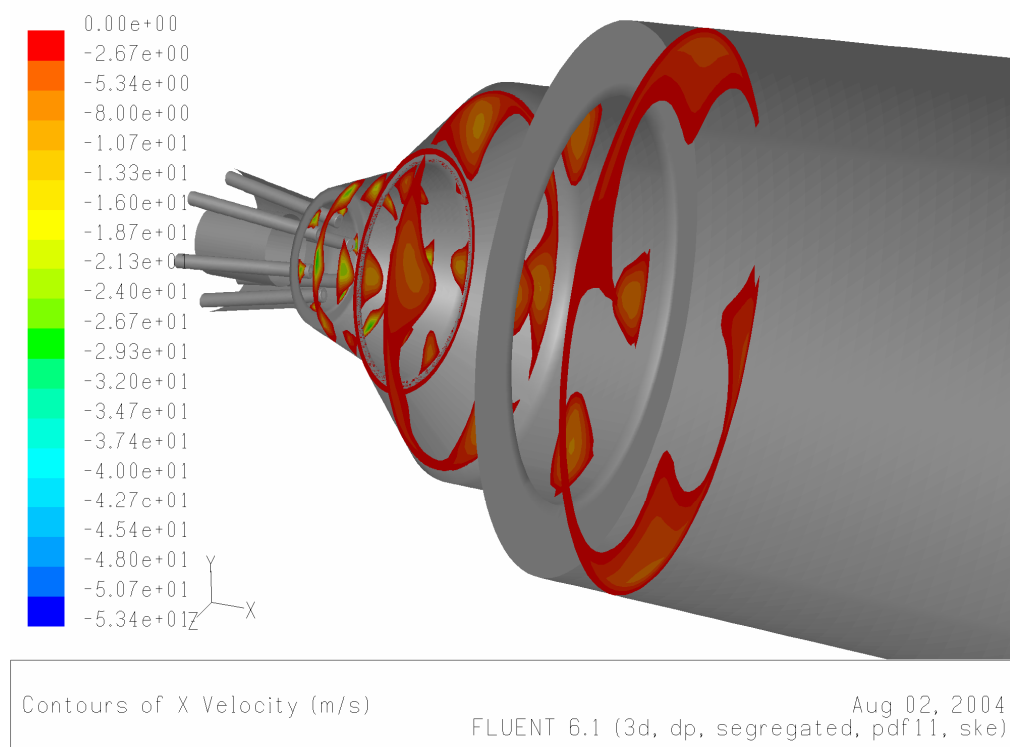


Abbildung 3: Rückströmungsgebiete aufgrund von Saugwirkung von Freistrahlen (Fall: 100% Drallluft)

7.2. Einfluss der Luftführung auf die Flammenlänge

In den folgenden beiden Abbildungen sind zwei Extremfälle in Bezug auf die Luftführung gegenübergestellt. In Abbildung 4 ist ein Fall dargestellt, bei dem ausschließlich unverdrallte Mantelluft (keine Drallluft) aufgegeben wurde. Im Gegensatz dazu wurde in Abbildung 5 ausschließlich Drallluft aufgegeben. In beiden Fällen wird Brennstoff (Methan) entsprechend einer Leistung von 10 MW eingebracht und die Verbrennung mit Hilfe der Gleichgewichts-Chemie-PDF berechnet.

In Flammen treten Flammenfronten an Stellen auf, wo stöchiometrische Mischung von Brennstoff und Luft vorliegt. Dementsprechend wurden die dargestellten Flammenkonturen über die Fläche des konstanten stöchiometrischen Mischungsbruches (mean-mixture-fraction = 0,0547) festgelegt.

Beim Vergleich der beiden Fälle ist die flammenverkürzende Wirkung aufgrund des Einsatzes von verdrahteter Luft gut zu erkennen. Nicht um sonst gilt die Verwendung von Drallluft in der Brennertechnologie als eines der am häufigsten verwendeten Mittel zur Einstellung der Flammenlänge. Die Verkürzung der Flamme ist auf die schnellere turbulente Mischung von Brennstoff und Luft durch den Einsatz von Drallluft zurückzuführen.

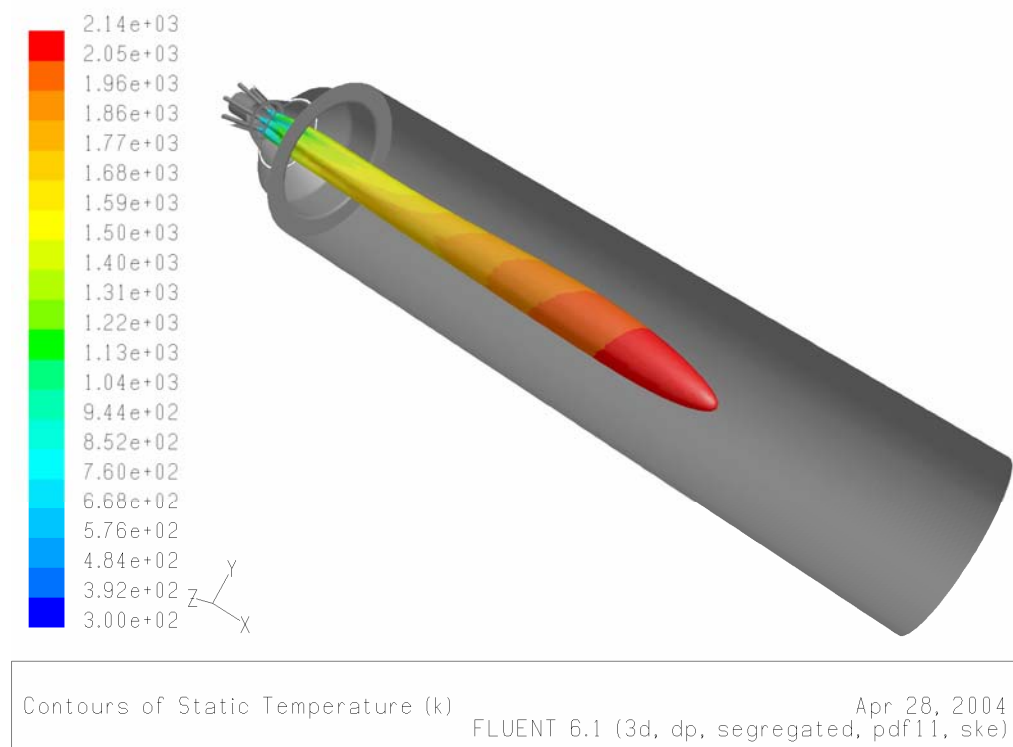


Abbildung 4: Flammenkontur bei 100% unverdrallter Mantelluft (keine Drallluft)

Will man die NO_x -Entstehung möglichst gering halten, so sind großräumige Flammenformen zu wählen, weil in ihnen die gleiche Menge an Brennstoff innerhalb eines größeren Volumens verbrennen kann. Als Folge werden die Temperaturspitzen auf deutlich niedrigerem Niveau liegen als bei den weit kürzeren Drallflammen.

Beschränkt ist die Flammenlänge aufgrund der Forderung, dass der Brennstoff innerhalb des Flammrohres vollständig ausbrennt, da es ansonsten zu einer Überschreitung des CO-Grenzwertes kommen kann.

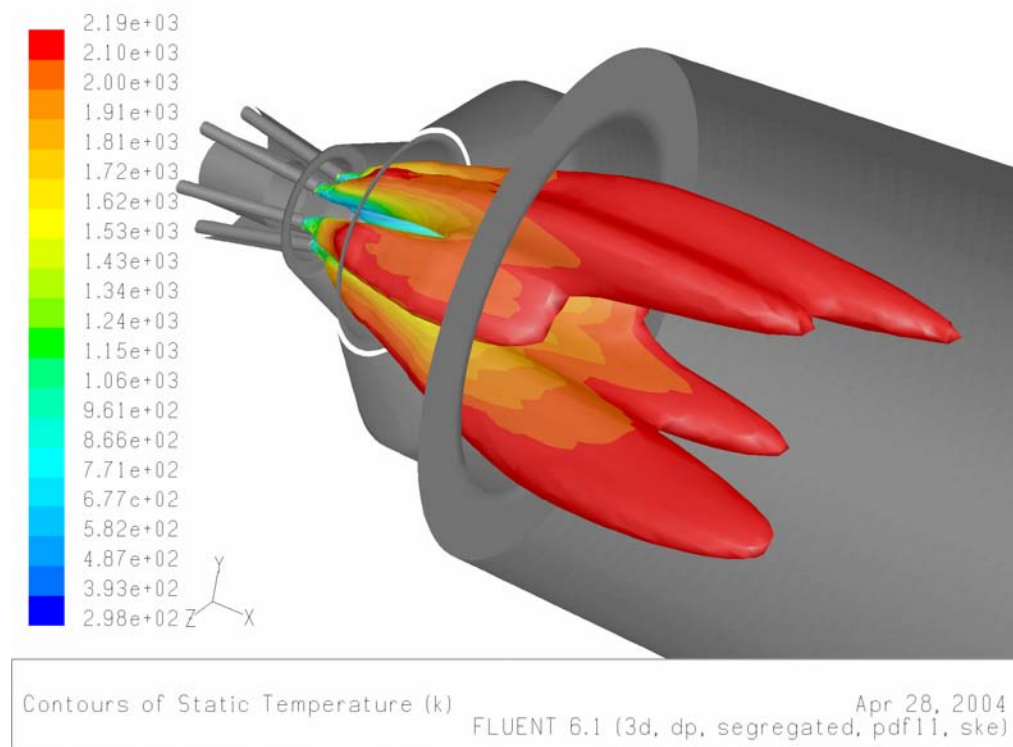


Abbildung 5: Flammenkontur bei 100 % Drallluft (keine unverdrallte Mantelluft)

Ob vollständiger Ausbrand innerhalb des Flammrohres gewährleistet ist, lässt sich anhand der CO-Konzentration beurteilen, weil die Oxidation von CO relativ zu den anderen Zwischenprodukten der Verbrennung am langsamsten abläuft.

Der Einfluss der Drallluft auf die Ausbrandgeschwindigkeit kommt anhand der CO-Konzentrationsfelder in den beiden folgenden Abbildungen sehr deutlich zum Ausdruck. Mit zunehmender Verdrallungsstärke kommt es zu einem schnelleren Ausbrennen des Brennstoffes.

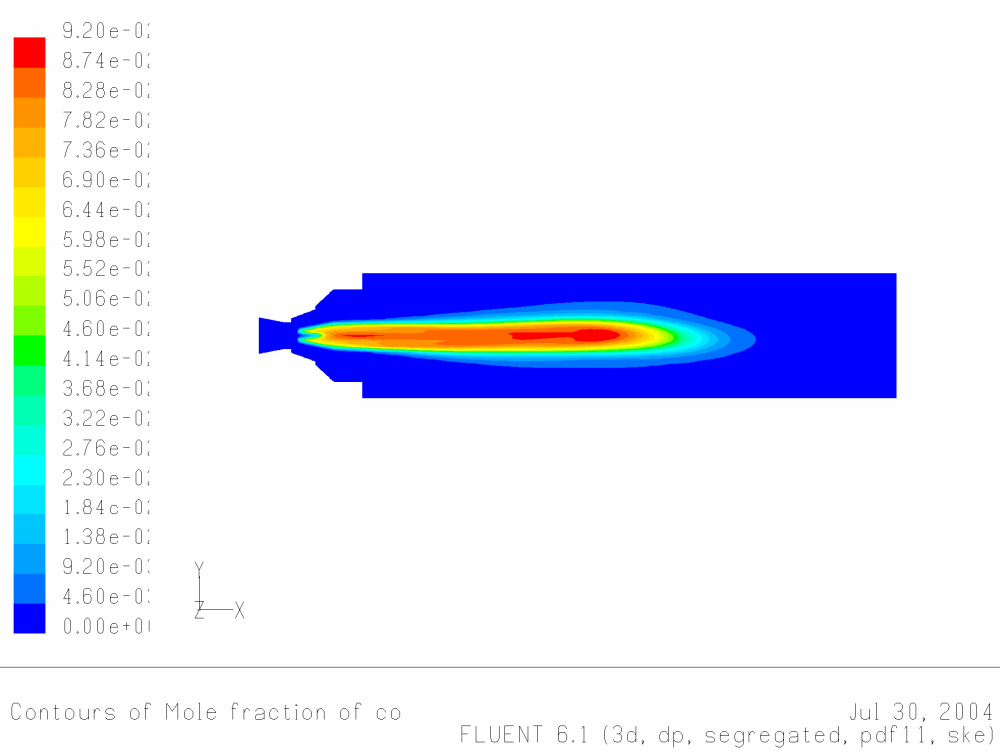


Abbildung 6: Konzentrationsfeld von CO bei 100 % unverdrallter Mantelluft (keine Drallluft)

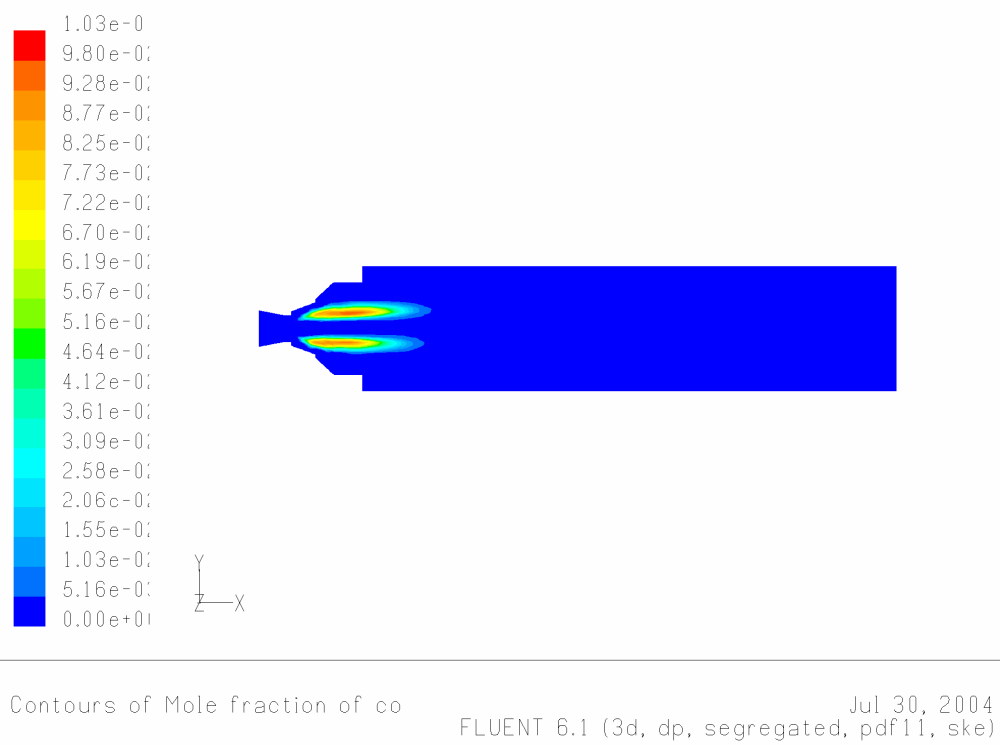


Abbildung 7: Konzentrationsfeld von CO bei 100 % Drallluft (keine unverdrallte Mantelluft)

7.3. Vergleich des Gleichgewichtschemie-Modelles mit dem Flamelet-Modell

Die beiden folgenden Abbildungen sollen den Einfluss des verwendeten Verbrennungsmodelles auf das Simulationsergebnis deutlich machen. Die Ergebnisse sind auf gleiche Temperatur skaliert dargestellt.

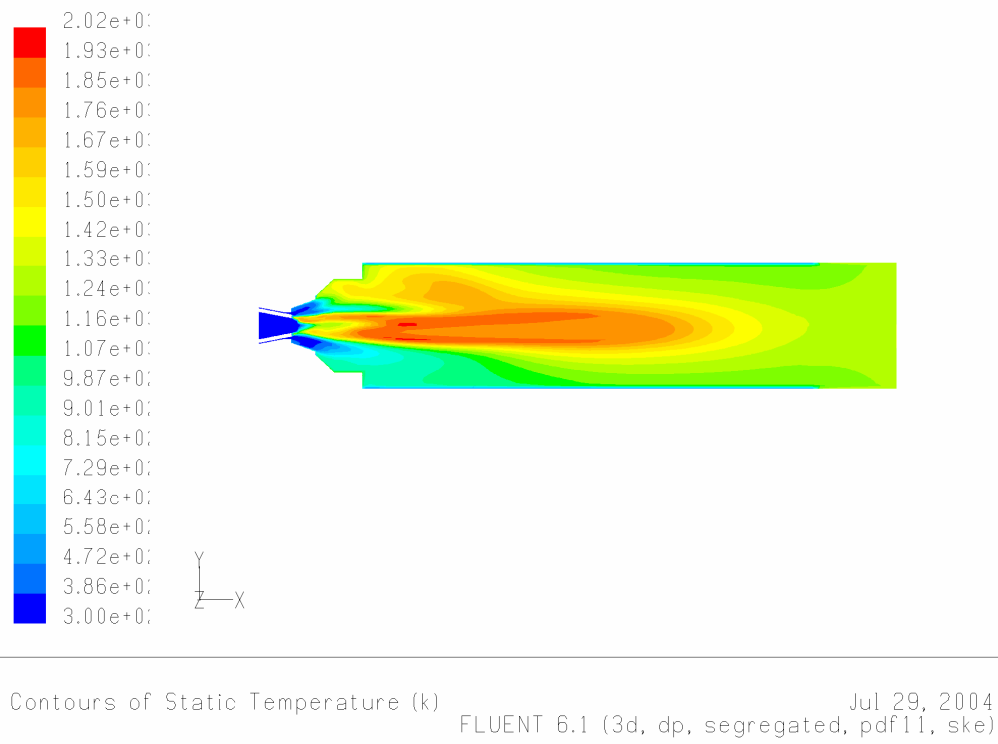


Abbildung 8: Temperaturprofil berechnet mit Gleichgewichts-Chemie-Modell

Beim Flamelet-Modell erstrecken sich einerseits die Bereiche höherer Temperaturen auf einen kleineren Raum und andererseits sind die Spitzentemperaturen niedriger als beim Gleichgewichts-Chemie-Modell. Dies ist auf das Nichterreichen des Gleichgewichtszustandes aufgrund von starken Geschwindigkeitsgradienten zurückzuführen. Dieses Ergebnis steht also mit den in Kapitel 6.2.2.2 beschriebenen Eigenschaften der beiden Verbrennungsmodelle im Einklang.

Folglich berechnet FLUENT das thermische NO_x bei Einsatz des Flamelet-Modells niedriger als bei Verwendung des Gleichgewichts-Chemie-Modells. (105 bzw. 120 ppmv NO_x).

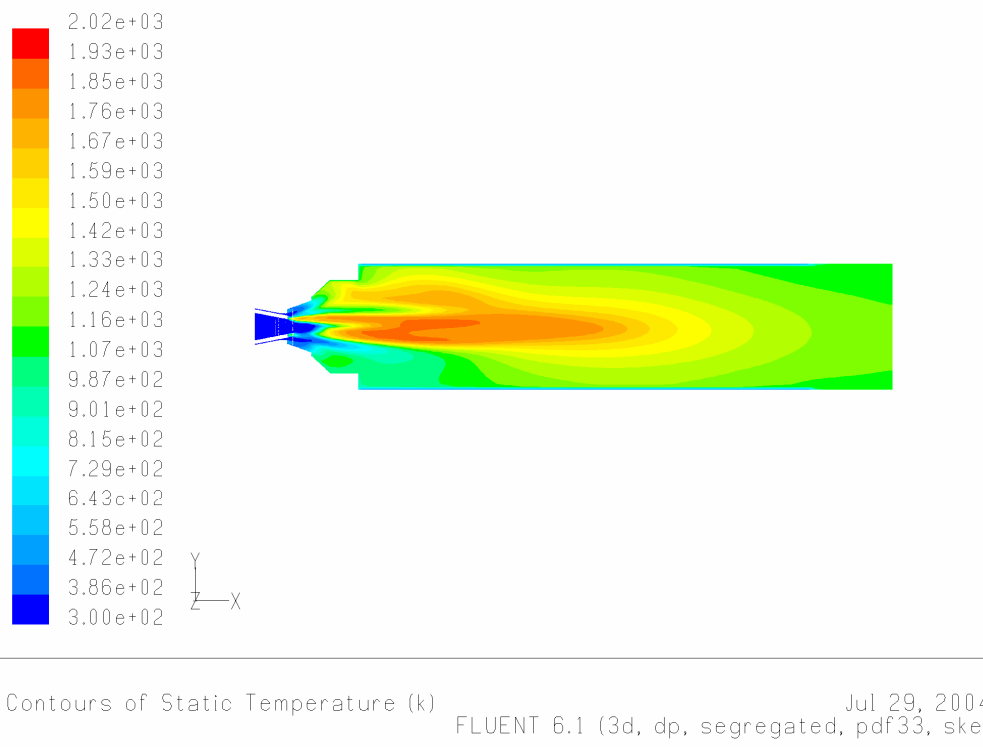
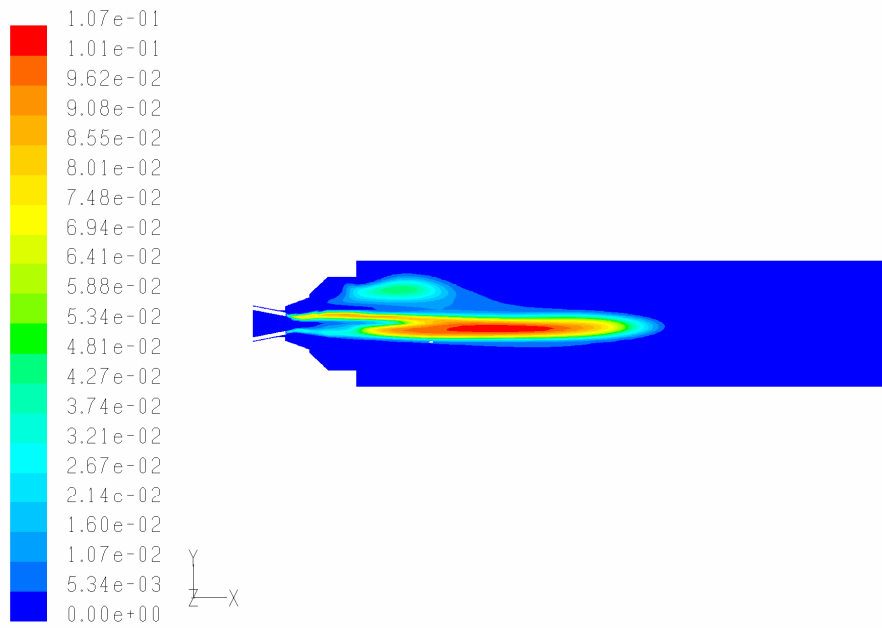


Abbildung 9: Temperaturprofil berechnet mit Flamelet-Modell

Bei den Konzentrationen von CO ist die Gleichgewichtsabweichung noch deutlicher zu erkennen als bei der Temperatur. Dabei fällt auf, dass die Oxidation von CO beim Flamelet-Modell innerhalb der Brennkammer nicht abgeschlossen wird, wodurch auch die Rest-O₂-Konzentration höher ist als beim Gleichgewichts-Chemie-Modell. Diese Simulationsergebnisse müssen allerdings aufgrund der Messergebnisse am realen Brenner als unrealistisch angesehen werden. Dabei ist anzunehmen, dass die Verwendung des Single-Laminar-Flamelet-Modells hierfür verantwortlich ist. Die bei diesem Modell für das gesamte Rechengebiet einheitliche skalare Dissipationsgeschwindigkeit Kappa (Default-Wert = 1 s⁻¹) (siehe Kapitel 6.2.2.2) dürfte für die brennerfernen Bereiche zu hoch sein.

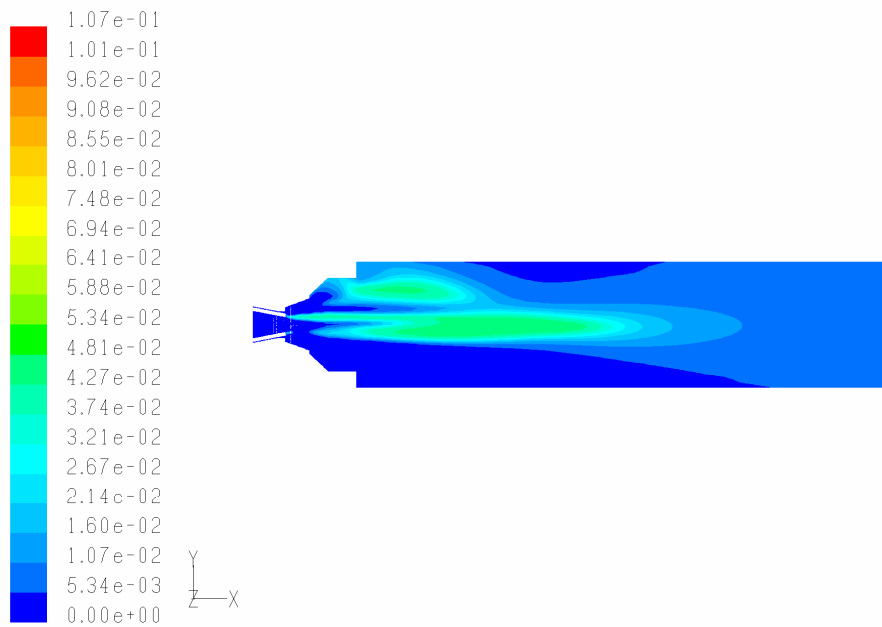
In weiteren Simulationen ist abzuklären, inwiefern die Verwendung des Multiple-Strained-Laminar-Flamelet-Modells das Ergebnis in Bezug auf vollständigen Ausbrand beeinflusst.



Contours of Mole fraction of co

FLUENT 6.1 (3d, dp, segregated, pdf11, ske) Jul 29, 2004

Abbildung 10: Konzentrationsfeld von CO berechnet mit Gleichgewichts-Chemie-Modell



Contours of Mole fraction of co

FLUENT 6.1 (3d, dp, segregated, pdf33, ske) Jul 29, 2004

Abbildung 11: Konzentrationsfeld von CO berechnet mit Flamlet-Modell

7.4. Einfluss der Strahlung

In den beiden Vergleichsfällen beträgt die Brennstoffleistung jeweils ca. 8 MW und die Wandtemperatur des Flammrohres wurde auf 200 °C gesetzt. Wie zu erwarten war, führt die Berücksichtigung der Strahlung zu einer Absenkung der Spitzentemperatur und folglich zum Temperatenausgleich im Flammrohr.

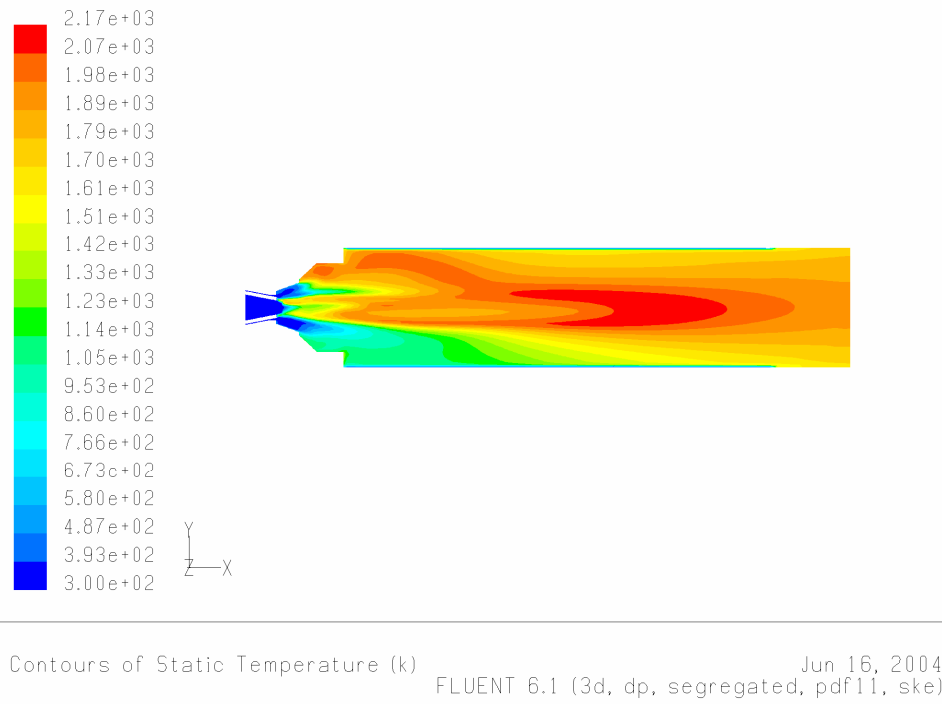


Abbildung 12: Temperaturprofil ohne Berücksichtigung der Strahlung

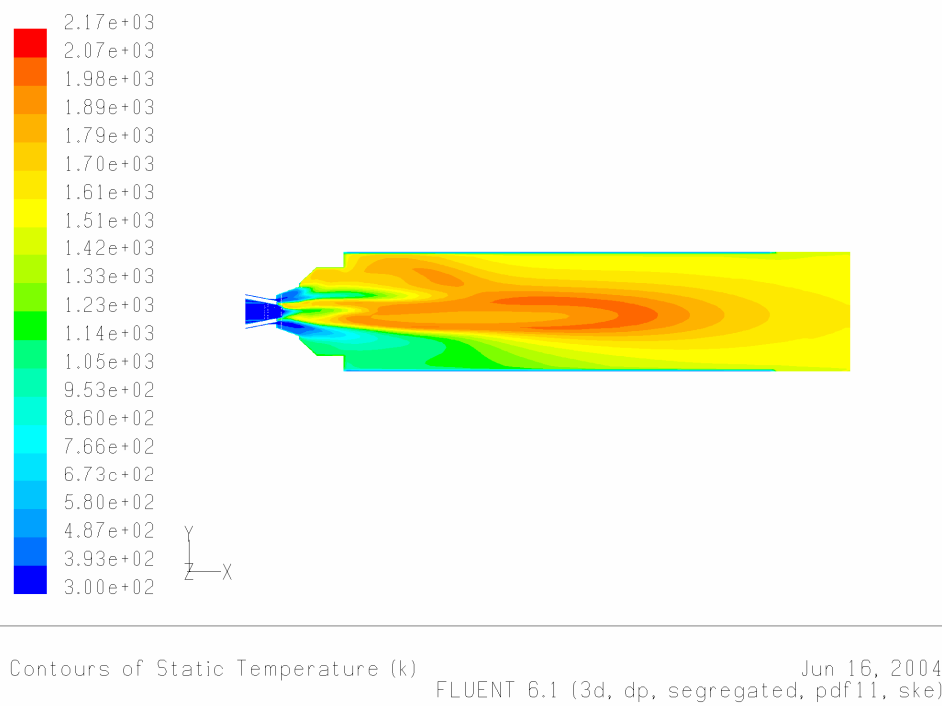


Abbildung 13: Temperaturprofil unter Berücksichtigung der Strahlung

Außerdem erhöht sich aufgrund der Strahlung der Wärmestrom über das Flammrohr und das Rauchgas verlässt dieses mit einer niedrigeren mittleren Temperatur als im Fall des rein konvektiven Wärmeüberganges. Aus diesem Grund ist die Berücksichtigung des Strahlungseinflusses für die Simulation der NO_x -Bildung unerlässlich. Im Fall ohne Strahlung ist die berechnete NO_x -Konzentration unrealistisch hoch und ist ca. um den Faktor 4 höher als bei Berücksichtigung des Strahlungseinflusses.

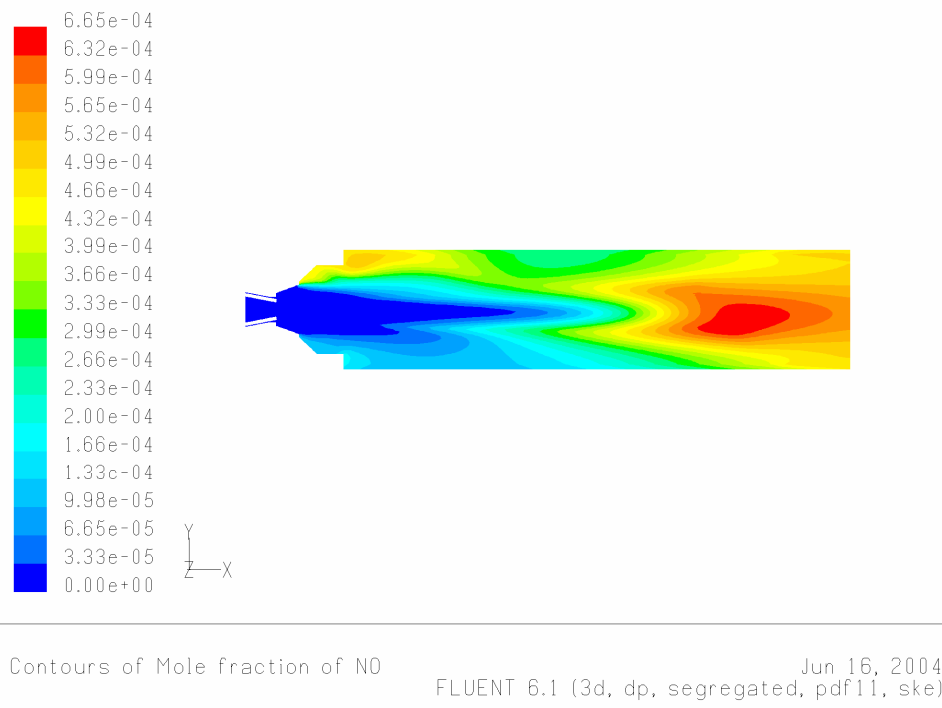


Abbildung 14: NO_x -Konzentrationsfeld ohne Berücksichtigung der Strahlung

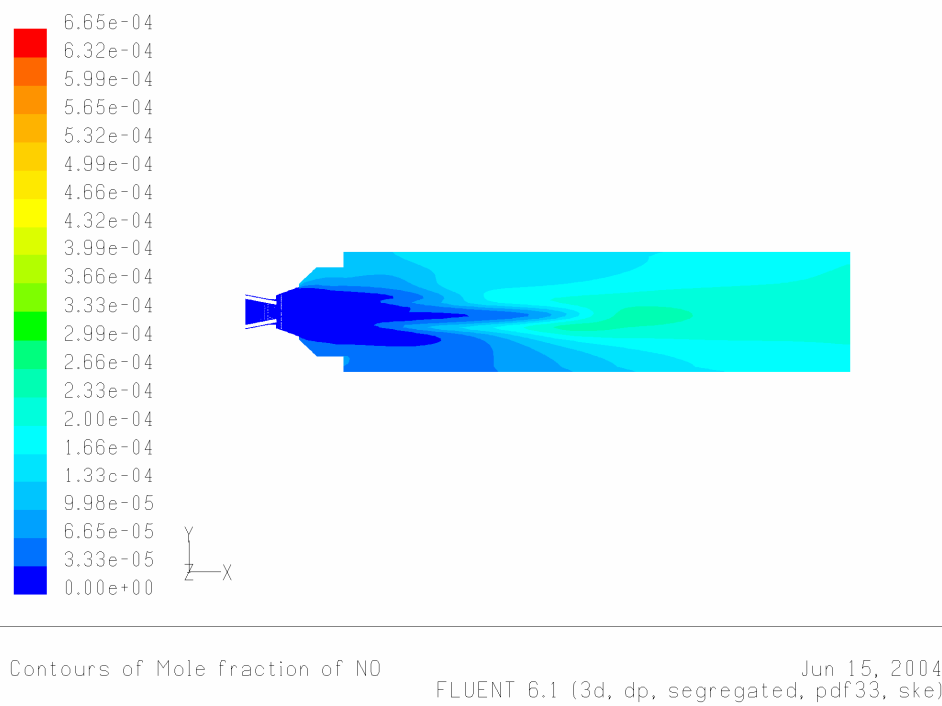


Abbildung 15: NO_x -Konzentrationsfeld unter Berücksichtigung der Strahlung

8. Konvergenzverhalten und Rechenzeitbedarf

Bei den Simulationsrechnungen mit und ohne Strahlungseinfluss konnten die voreingestellten Konvergenzkriterien nicht erreicht werden. Im Besonderen gilt dies für die Massenbilanz (continuity), bei welcher der Wert von ca. $4e-02$ nicht unterschritten wurde.

Deshalb wurden Monitore von aussagekräftigen physikalischen Größen (z.B. max. Gastemperatur und mittlere Gasaustrittstemperatur) zur Beurteilung der Konvergenz herangezogen.

Bei den Fällen ohne Strahlung stellten sich, unabhängig vom verwendeten Verbrennungsmodell, bei ca. 400 Iterationen konstant verlaufende Residuen ein. Bei aktivierter Strahlung zeigte sich verlangsames Konvergenzverhalten bei der Energiebilanz. So wurden hier ca. 1500 Iterationen bis zum Erreichen konstanter Energieresiduen benötigt.

Generell zeigte sich, dass bei verringertem Drallluftanteil niedrigere Residuen erreicht werden.

Die notwendige Einzelprozessor-Rechenzeit pro Iteration erhöht sich bei Einsatz des Gleichgewichts-Chemie-Modells durch Zuschaltung des P1-Strahlungsmodells von 120 auf 130 Sekunden. Die Verwendung des Flamelet-Modells (glarborg.152) anstatt des Gleichgewichts-Chemie-Modells erhöht die Rechenzeit um ca. 20 Sekunden pro Iteration.

Folglich beläuft sich die benötigte Rechenzeit für einen Fall mit aktivierter Strahlung (ca. 1500 Iterationen) auf ca. 60 Stunden.

9. Ausblick

In zukünftigen Simulationsrechnungen soll das Multiple-Strained-Laminar-Flamelet-Modell angewendet und die erzielten Ergebnisse denen aus Single-Laminar-Flamelet-Modell und Gleichgewichts-Chemie-Modell gegenübergestellt werden.

Aufbauend darauf soll untersucht werden, inwieweit der Einsatz von selbst programmierten Modellen zur NO_x-Vorhersage mittels UDF's möglich ist. Die so erzielten Ergebnisse sollen mit jenen aus den FLUENT-Standard-NO_x-Modellen verglichen und gemäß der Daten aus Löffler 2004 evaluiert werden.

Ist die optimale FLUENT-Modellkonfiguration mit allen ihren Einstellungen gefunden, so sollen mit dieser die Luft- und Brenngasführung (siehe Kapitel 2) gefunden werden, welche bezüglich NO_x-Minimierung optimal ist.

Im letzten Schritt soll mit dem bei der Modellierung der Gasverbrennung gewonnenen Wissen ein Simulationsmodell für die Verbrennung von zerstäubten Flüssigkeiten aufgebaut und ebenfalls hinsichtlich einer NO_x-Reduzierung optimiert werden.

Literatur

Fluent 6 User's Guide, Fluent Inc. 2001; Bände 1-5

Gambit User's Guide, Fluent Inc. 2001

Günther R., 1984. Verbrennung und Feuerungen. Unveränderter Nachdruck; Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer

Löffler, G., 2004. Evaluierung der Fluent-Modelle zur NO_x-Bildung aus dem Luftstickstoff. Interner Bericht

Warnatz, J., 2001. Verbrennung: physikalisch-chemische Grundlagen, Modellierung und Simulation, Experimente, Schadstoffentstehung. 3.; aktualisierte und erw. Auflage; Berlin, Heidelberg, New York: Springer.