

TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN

Institut für Strömungsmechanik und technische Akustik (ISTA)
Fachgebiet Experimentelle Strömungsmechanik
Prof. Dr.-Ing. C. O. Paschereit

Diplomarbeit zum Thema

Numerische Untersuchung der reagierenden Strömung in einem Drallbrenner und Einfluss verschiedener Eindüsungsvarianten

Oliver Krüger

Berlin, den 11.05.2009

Email: orhbk@gmx.de
Matrikelnummer: 219276
Studiengang: Physikalische Ingenieurwissenschaft
Betreuer: Prof. Dr.-Ing. C. O. Paschereit (Technische Universität Berlin)
Dr. Andreas Spille-Kohoff (CFX Berlin Software GmbH)
Dipl.-Ing. A. Lacarelle (Technische Universität Berlin)
Dipl.-Ing. C. Schrödinger (Technische Universität Berlin)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	7
2.1	Aufbau und Prinzip eines Drallbrenners	7
2.2	Übersicht zu Verbrennung und Flammentypen	10
2.3	Grundgleichungen der Strömungssimulation	17
3	Messdaten	33
3.1	PIV-Messung	33
3.2	Druckverlustmessung	35
3.3	Drallzahl	36
3.4	OH-Chemolumineszenzmessung	37
4	Voruntersuchungen am axialsymmetrischen 2D-Modell	39
4.1	Geometrie und Gitter	40
4.2	Randbedingungen	40
4.3	Simulation der nichtreagierenden Strömung	42
4.4	Simulation der reagierenden Strömung	50
5	Untersuchung des Halbmodells ohne Verbrennung	65
5.1	Geometrie und Gitter	65
5.2	Randbedingungen	72
5.3	Konvergenz	74
5.4	Simulationen mit Wasser	75
5.5	Simulationen mit Luft	83
5.6	Instationäre Simulation	87
5.7	Zusammenfassung zur nichtreagierenden Strömung	91
6	Untersuchung des Halbmodells mit Verbrennung	92
6.1	Simulation mit dem Burning Velocity Model	94
6.2	Simulation mit dem Eddy Dissipation Model	98
6.3	Simulation mit dem kombinierten EDM/FRCM	99
6.4	Simulation von Eindüsungsvarianten	101
7	Zusammenfassung und Ausblick	106
	Literaturverzeichnis	108
	Anhang	110

KAPITEL 7

Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde die nichtreagierende- und die reagierende Strömung eines vorgemischten Drallbrenners mit einem ausgeprägtem Rezirkulationsgebiet numerisch untersucht. Die Ergebnisse wurden mit entsprechenden Messdaten validiert. Zusätzlich dazu wurde der Einfluss der Eindüsung auf die Verbrennung ermittelt.

Zunächst wurde anfangs eine Voruntersuchung mit einem axialsymmetrischen zweidimensionalen Modell des Drallbrenners durchgeführt. Durch Variation der Einlassrandbedingungen wurde das Modell an die Drallzahl eines dreidimensionalen Modells angepasst. Das so angepasste Modell wurde anschließend mit den PIV¹-Geschwindigkeitsmessungen aus dem Wasserkanal verglichen. Es zeigte sich, dass sich mit diesem Modell eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messungen erzielen ließ.

Das so angepasste Modell diente als Basis für die Verbrennungsuntersuchungen. Hierbei wurden alle unter *CFX V.11 SP1* zur Verfügung stehenden Verbrennungsmodelle untersucht. Bei der Simulation der reagierenden Strömung stellte sich heraus, dass das *Burning Velocity Model* nicht in der Lage war, eine klare Flammenstruktur darzustellen. Durch Bestimmung der gemittelten Damköhlerzahl ergab sich, dass das *Burning Velocity Model* einen *idealen Rührreaktor* simulierte. Eine Parameterstudie der kritischen Geschwindigkeitsgradienten erzielte dabei auch keine zufriedenstellenden Resultate. Besser sahen die Ergebnisse des *Eddy Dissipation Models*, des *Finite Rate Chemistry Models* und dem daraus kombinierten Modell aus. Diese waren in der Lage eine eindeutige Flammen zu simulieren, deren Struktur und Position bereits gut mit den Messdaten übereinstimmte. Das kombinierte EDM²/FRCM³ kristallisierte sich als das geeignetste Modell heraus.

Für die Verbrennungsuntersuchung standen OH-Chemolumineszenzmessungen zum Vergleich zur Verfügung. Um diesen Vergleich ziehen zu können, wurde eine zur ABELschen Inversion alternative Projektionsmethode entwickelt. Bei dem Messverfahren wird die Intensitätsverteilung gemessen, die beim Zurückspringen der angeregten OH-Moleküle aus einem angeregten Zustand in einen energetisch tiefer liegenden Zustand emittiert wird. Detektiert wird diese mit einer CCD⁴-Kamera und einem vorgeschalteten Filter. Die Projektionsmethode bildet dieses Messverfahren nach, indem es von einer virtuellen Kamera ausgehend, den Strahlengang zurückverfolgt

1 Particle Image Velocimetry

2 Eddy-Dissipation-Modell

3 Finite Rate Chemistry Modell

4 Charge Coupled Device

und die OH-Konzentration über die Sehstrahlen aufintegriert.

Mit den Erkenntnissen der Voruntersuchung wurde dann die Hauptuntersuchung mit einem dreidimensionalen Halbmodell durchgeführt. In den vorangegangenen Diplomarbeiten von Pfister (2007) und Ziefle (2008) konnte die kalte Strömung nicht zufriedenstellend wiedergegeben werden. Die Abweichungen der Druckverluste zwischen Experiment und Simulation lagen dabei bei über 50%. Als mögliche Ursache für diese Abweichung konnte die zu grobe Vernetzung der Geometrien ausgemacht werden. So zeigte sich, dass sich bei hinreichender Gitterqualität eine Abweichung des Druckverlustes zu den Messdaten von 6–8% erreichen ließ. Die Drallzahl konnte sogar mit einer Abweichung von ca. 5% erzielt werden, was im Rahmen der Messgenauigkeit des Experiments liegen dürfte. Trotz der unzureichenden Konvergenz war es durchaus möglich, das Strömungsfeld mit geringen Abweichungen wiederzugeben, auch wenn sich zeigte, dass alle verwendeten Turbulenzmodelle einen zu bauchigen Verlauf des Rezirkulationsgebietes aufwiesen, was Spielraum für zukünftige Untersuchungen lässt.

Bei der Untersuchung der reagierende Strömung der Hauptuntersuchung wurden - wie in der Voruntersuchung - alle verfügbaren Verbrennungsmodelle benutzt. So stellte sich bei den Simulationen mit dem *Burning Velocity Model* ein anderes Ergebnis als bei der Voruntersuchung heraus. Es bildete sich eine klare Flammenstruktur, die aber noch Abweichungen von den Messungen aufwies. Der Grund für die Unterschiede zwischen dem zweidimensionalen und dem dreidimensionalen Modell konnten nicht geklärt werden und sollten in Folgeuntersuchungen betrachtet werden. Wie auch schon in der Voruntersuchung ließ sich eine Simulation mit dem kombinierten EDM/FRCM erstellen, die eine sehr gute Übereinstimmung mit der Flammenkontur, -position und Intensitätsverteilung der Messdaten aufwies. Für den Vergleich der OH-Chemolumineszenzmessung kam ebenfalls das selbstentwickelte Projektionsverfahren zum Einsatz.

Der Einfluss der Eindüsung auf die Verbrennung wurde durch das Schließen der Hälfte der Düsen stromaufwärts bzw. der Hälfte der Düsen stromabwärts an der Brennerflanke untersucht. Als Verbrennungsmodell wurde auch hier das kombinierte EDM/FRCM verwendet. So stellte sich heraus, dass sich mit dem Schließen der Düsen stromabwärts der Strömung der Wirbelkern anfetten lässt. Ein Schließen der Düsen stromaufwärts erzielte hingegen keine nennenswerten Unterschiede. Aufgrund mangelnder Messdaten konnte dieser Einfluss nicht validiert werden und sollte in nachfolgenden Untersuchungen erfolgen

Ausblickend wird empfohlen eine Gitterstudie durchzuführen, um den Einfluss des Gitters auf die Simulationen zu untersuchen. Zusätzlich dazu sollte auch ein für Drallströmungen spezialisiertes Turbulenzmodell (z.B. Omega-RSM) verwendet werden, um die Ursache für das bauchige Verhalten des Rezirkulationsgebietes zu bestimmen. Um die Auswirkung instationärer Effekte zu ermitteln, wird an dieser Stelle vorgeschlagen, eine instationäre Untersuchung mit einem Grobstrukturmodell (LES¹) durchzuführen, dass eine zeitliche Auflösung in der Größenordnung der kohärenten Strukturen aufweisen sollte. Letztendlich wäre auch eine Simulation die Wärmeverluste und Strahlungseinflüsse auf den Brenner und die Wände des Systems berücksichtigt durchzuführen, um Auswirkungen auf die Strömung und die Flammenstruktur zu untersuchen.

1 Large-Eddy-Simulation