

Jahresbericht 2003, 10. Dezember 2003

Projekt Nr. 47495

Entwicklung und Validierung verbesserter Teil-Modelle für transiente Sprays mit Verbrennung

Autor und Koautoren	Ourania N. Margari, Lale Demiraydin and Yuri M. Wright
beauftragte Institution	ETHZ-Labor für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme (LAV)
Adresse	Claussisusstrasse 33, CLT F4, ETH Zentrum CH-8092, Zürich
Telefon, E-mail, Internetadresse	+41 1 6327785, margari@lav.mavt.ethz.ch , www.lav.ethz.ch +41 1 632 66 32, +41 1 632 1255, demiraydin@lav.mavt.ethz.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	47495/87575
Dauer des Projekts (von – bis)	1. September 2002 bis August 2005

ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Teilprojekt soll das Gebiet der 2-phasen, turbulenten, reaktiven Strömungen durch enge Verknüpfung von Experiment und numerischer Simulation untersucht werden. Die Sprayverbrennung findet ihre Anwendung in Gasturbinenbrennkammern, in Industriefeuern und bei der motorischen Verbrennung. Diese Arbeit untersucht die eng miteinander verknüpften Prozesse von Einspritzung, Aufbruch des Brennstoffstrahls und der entstehenden Tropfen, Verdampfung und Mischung von Luft und Brennstoff, Zündung und die nachfolgende Verbrennung. Konzentriert wird dabei insbesondere das Verhalten von Diesel-Einspritzstrahlen im Hinblick auf die Zündorte, die Zündverzögerung und die Russentstehung während der Verbrennung.

Der experimentelle Teil dieses Projekts untersucht die bei der –Dieselmotorischen- Verbrennung herrschenden Verhältnisse (Drücke und Temperaturen) mit Hilfe der Konstantvolumen, Hochtemperatur und Hochdruckzelle (HTDZ) des LAV. Die Untersuchung von Dieseleinspritzstrahlen mit der Schlieren-Messtechnik macht die Ausbreitung des verdampften Brennstoffs sichtbar. Die Messungen unter verdampfenden Bedingungen (800K, 40bar) zeigen, dass der Brennstoff um so schneller verdampft, je höher der Einspritzdruck ist. Vorhergehende Messungen mit der PDA Messtechnik haben ergeben, dass bei einer Erhöhung des Einspritzdrucks von 500bar auf 1300bar der mittlere Tropfendurchmesser um 25% sinkt [2].

Zur numerischen Simulation dieser Flammen werden Modelle entwickelt, die die relevanten Prozesse berücksichtigen. In der vorliegenden Arbeit wurde die Gutflammung und Verbrennung in die HTDZ mittels des Conditional Moment Closure (CMC) Verbrennungsmodells, in Verbindung mit dem CFD - Simulationsprogramm StarCD [1,3] untersucht. Das Conditional Moment Closure Verbrennungsmodell (CMC) ist ein am LAV zusammenarbeit mit der Cambridge University in STAR-CD implementierter Ansatz für den Transport der reagierenden Skalare für turbulente Verbrennungsprozesse. Die Studien werden basierend auf Hochdruck 2-phasige Gemische und Flammen durchgeführt. Der Mischungsbruch, die Temperatur, der Massenbruch der Komponenten, typische Temperaturverläufe während der Zündung werden gezeigt und mit dem Experiment verglichen. Dabei kommt zu einer guten Übereinstimmung der Zündverzugszeiten zwischen Rechnung und Messung für die Fälle mit und ohne Grundturbulenz. In Zukunft wird ein Verdampfungsquellterm eingefügt, sodass die dem CMC-Code übergebene Temperatur genauer berechnet wird.

TEIL 1: EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG

Autorin: dipl.-Ing. O. N. Margari

Aim of the Project

One of the main goals of this project is to acquire a large data set for a detailed study of the emission levels that are produced by the direct injection Diesel engines. A good analysis of the combustion processes will lead to the comprehension of these phenomena and the reduction of the emission levels, without impairing the engine performance and efficiency. In order to achieve this goal an experimental work is performed in LAV/ETH in a High temperature-high pressure cell. The constant volume cell (*Figure 1*) provides a flexible facility to study Diesel engines.

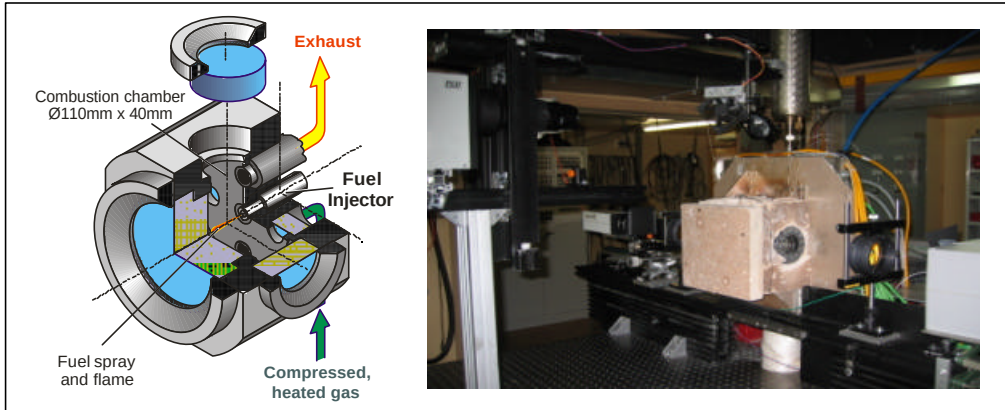


Figure 1: High temperature-high pressure cell

The advantage of a combustion cell is its ability to simulate a wide range of conditions, including those found in the real Diesel engines. Some of the cell parameters before and after the combustion are shown in the following table:

Parameter	Before combustion	After combustion
p_{cell}	<80bar	<250bar
T_{cell}	<800K	-

Achieved work and Results

The first step of this project was the study of the liquid and vapor phase. At eight different times after the beginning of injection mean images were computed from six shots per time step. The spray angle, its penetration and the diameter were determined (Figure 2). In the mean picture calculation some information about evaporated areas is lost. The location of the vapor phase, which appearance is stochastic, disappears in the picture. In the *figure 3* the diesel spray penetration, its angle and its diameter are presented for two different measurement techniques: Schlieren and Shadowgraph [3]. The experimental parameters of the cell and the injector were the following:

T_{cell}	P_{cell}	P_{inj}	T_{inj}
400K	40bar	500bar	1.2ms

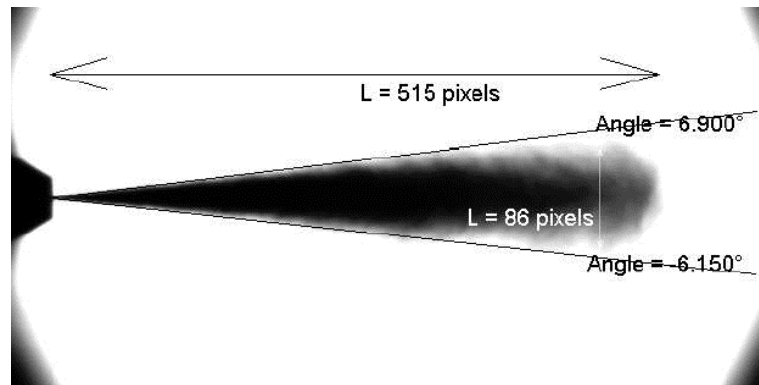


Figure 2: Measured parameters

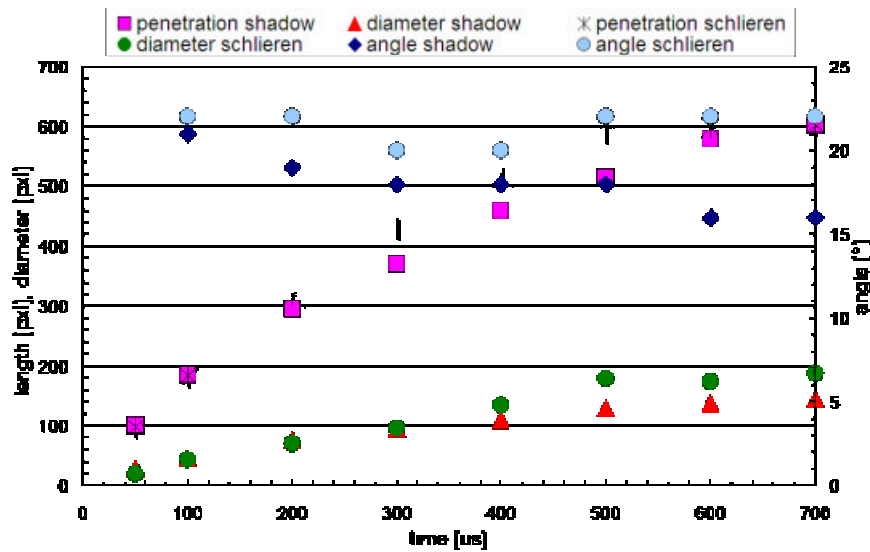


Figure 3: Comparison between Schlieren and Shadowgraph technique

The spray angle of the schlieren images is always larger, because they also contain more information for the vapor phase around the spray. Until 200μs the penetration detected by both techniques, is similar. After that point the penetration of the spray measured with the Schlieren technique is longer.

Several sequences for different conditions have been taken. In the following figure (figure 4) an injection process with combustion is shown. The initial parameters for this process are the following:

T_{cell}	P_{cell}	P_{inj}	T_{inj}
750K	40bar	500bar	2.0ms

The spray penetrates into the surroundings. Paying attention on the spray's boundaries and especially on its tip, the fuel begins to evaporate. Due to the shear flow (turbulence) vertical vapor fluctuations appear. The spray reaches the wall after 600μs and a strong evaporating process starts.

Shortly after, the mixture ignites (2.5-2.6μs). The ignition starts close to the cell walls, as the wall temperature is higher than the gas-temperature in the cell, but the precise timing and the location of the ignition is not clearly identified. The combustion process can be observed, because the refracting index changes due to the released heat. This yields to the black image area.



Figure 4: Injection sequence for $T_{\text{cell}}=750\text{K}$, $p_{\text{cell}}=40\text{bar}$, $p_{\text{ini}}=500\text{bar}$, $t_{\text{ini}}=2.0\text{ms}$

In order to detect the exact ignition timing, the Chemiluminescence technique is used in parallel with schlieren.

By using this technique it is possible to detect OH and CH radicals with interference filters. Chemiluminescence is a photon-emission phenomenon that appears throughout the diesel combustion process. It rises from certain energetic chemical reactions that lead directly to the formation of atoms or molecules in an electrically excited state. Such radicals then may decay back to equilibrium energy levels by emission of photons. In hydrocarbon spray combustion systems the species contributing more prominently to the observed visible and ultraviolet chemiluminescence are CH and OH radicals. The CH and OH bands are centered at a wavelength 432nm and 510nm respectively. Using this technique, the ignition delay and its spatial location can be evaluated. Some preliminary tests without using any interference filter are carried out. The two pictures Schlieren and Chemiluminescence are taken on different axis to avoid the adoption of the beam splitter (Figure 5).

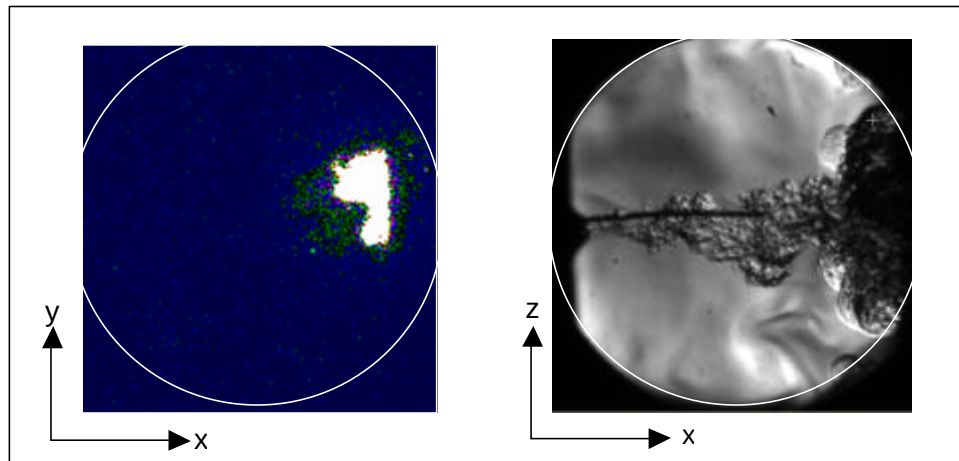


Figure 5: Chemiluminescence-Schlieren technique

Several sequences have been taken for Schlieren and Chemiluminescence. In all cases the images represent a map shot of the spray. In figure 6 an example of the measurements previously obtained is presented. The initial conditions of the combustion process are:

T_{cell}	P_{cell}	P_{inj}	T_{inj}
750K	40bar	500bar	1.9ms

According to the chemiluminescence images the combustion process seems to start between 3.0 and 3.1 ms. It evolves for 700 to 800 μ s and then the intensity of the light starts to reduce. Evaluating the combustion process, it can be found that it lasts for 1.3 ms. It is important to mention that for these measurements none filter was used. This means that the emitted light also contains the soot spectrum. For this reason, to identify the ignition location it is necessary to capture the OH-radicals emissions only. A way to achieve this is the use of OH-filters and the emitted light as external trigger for the camera.

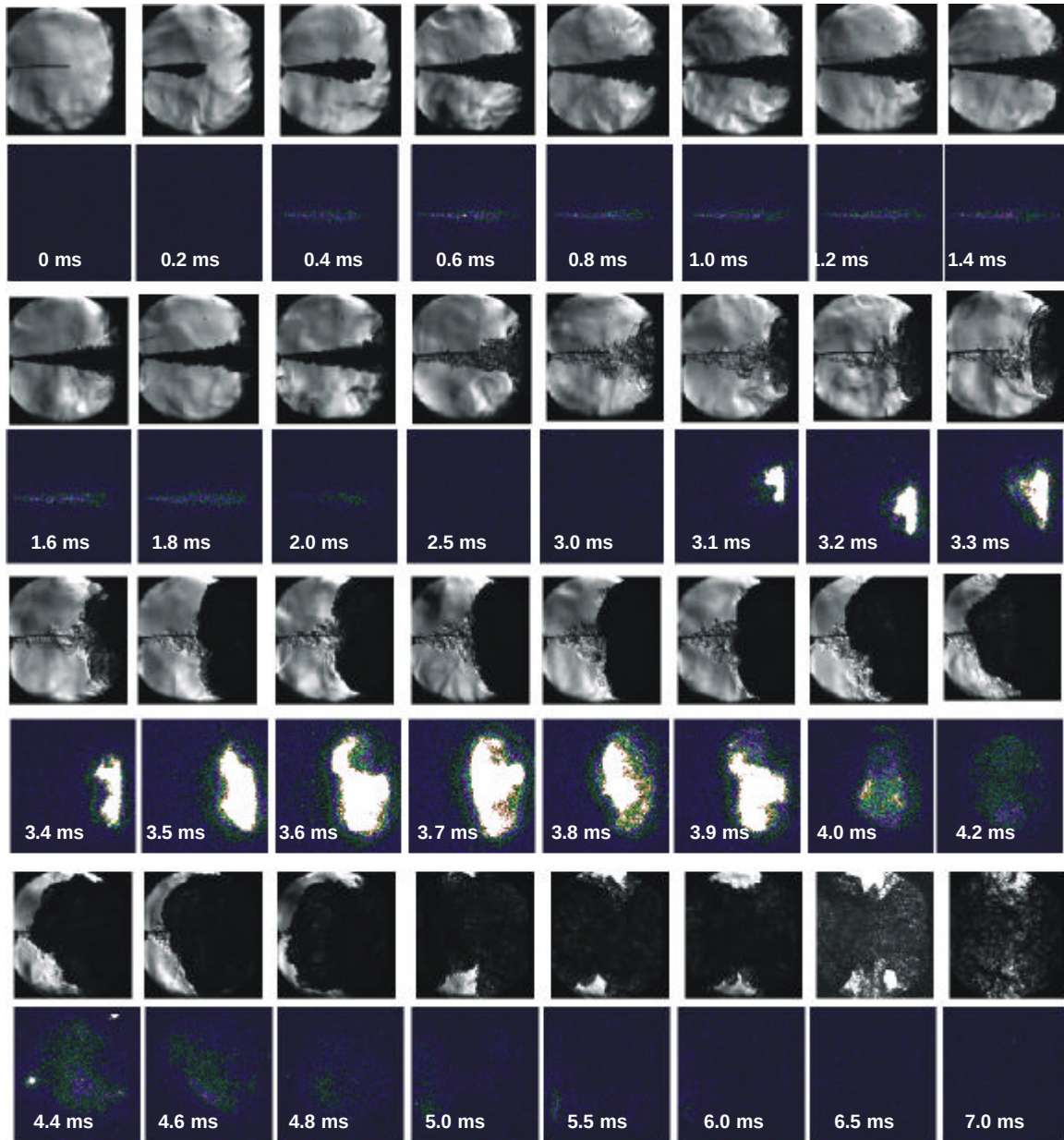


Figure 6: Injection sequence with Chemiluminescence and Schlieren technique for $T_{\text{cell}}=750\text{K}$,

$$p_{\text{cell}}=40\text{bar}, p_{\text{inj}}=500\text{bar}, t_{\text{inj}}=1.9\text{ms}$$

National Collaboration

We have an intense and fruitful collaboration with the Reaction Analysis Group of the Paul Scherrer Institute (PSI) on spray combustion research using both identical facilities (HTDZ) of the two institutions.

International Collaboration

Collaboration on "Spray data base" proposed by ETH and PSI in the frame of the IEA implementing agreement "Energy conservation and emissions reduction in combustion" on the occasion of the 2003 Task Leaders meeting.

Evaluation 2003 and Outlook 2004

The Schlieren method (its principle is based on the changes of the refraction index due to the density variation) achieves satisfying pictures, providing more information than the shadowgraph technique. Using the Schlieren technique it is identifiable that the fuel starts to evaporate at the tip of the spray and then along its periphery. The cause of this phenomenon is the turbulent flow. The liquid, the vapor and the ignition location are well defined in the images. The Chemiluminescence method is suitable method to detect the beginning and the location of the combustion process. Till now this technique was applied without any filter, therefore detecting all the light from combustion. For this reason an improvement to these techniques is necessary. By using the OH-filters it will be possible to define precisely the ignition delay and its location.

As mentioned before, a detailed insight into the mechanisms of pollution formation is further necessary. In order to understand soot formation and oxidation during combustion it is planned to apply the multi-colour pyrometry as well [4]. This technique is a non-invasive routine and uses a multi-color sensor probe. It also relies on the measurement of the intensity of the light on at least two wavelengths. A third wavelength is used, giving the opportunity to check the plausibility of the results. This technique is going to be used for different injection pressures and air/fuel ratios among others.

References

- [1] Schneider B.: *Experimentelle Untersuchungen zur Spraystruktur in transienten, verdampfenden und nicht verdampfenden Brennstoffstrahlen unter Hochdruck* Diss. ETH Nr. 15004, 2003
- [2] Gabriel Barroso, Andreas Escher, Ourania Margari: *Beitrag der ETH Zürich an das FVV-HDV Projekt Experimenteller Teil*, 2. Arbeitskreissitzung, Stuttgart, 11/2003
- [3] Settles G.S.: *Schlieren and Shadograph techniques* Springer Verlag 2001
- [4] Schubiger R., Boulouchos K, Eberle M.: *Russbildung und Oxidation bei der dieselmotorischen Verbrennung*, MTZ, Vol. 63, pp. 342-353, 5/2002

TEIL 2: NUMERISCHE SIMULATION

Autoren: Dr. Sc. tech. L. Demiraydin, Dipl. -Ing. Y. M. Wright

Projektziele

Das Ziel dieser Arbeit ist die Weiterentwicklung des Verständnisses von **Hochdruck- und Verbrennungsprozessen in mehrphasigen Systemen** (Sprayflammen) sowie der Modellierungsmethoden für Hochdruckprozesse. Sprayflammen finden sich in technischen Anwendungen beispielsweise in Ölf Feuerungen, Gasturbinenbrennkammern, Flugzeugantrieben sowie motorischen Verbrennungsprozessen. Durch enorm gesteigerte Rechnerleistung wird **CFD (Computational Fluid Dynamics)** in der näheren Zukunft zu einem Entwicklungswerkzeug. Spray-Flammen werden durch eine Vielzahl von komplexen Prozessen wie turbulente Strömung, Mischung, chemische Kinetik sowie auch von der Verdunstung und Dispersion des Sprays dominiert. Erschwerend kommt hinzu, daß diese Prozesse untereinander stark interagieren, wodurch die numerische Beschreibung einer reagierenden Strömung eine große Herausforderung darstellt.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Sprayflammen finden sich in technischen Anwendungen beispielsweise in Ölf Feuerungen, Gasturbinenbrennkammern, Flugzeugantrieben sowie motorischen Verbrennungsprozessen. Die grundlegenden Prozesse beinhalten den Strahlzerfall und -Aufbruch, die Atomisierung, die Aufheizung und Verdampfung der Flüssigkeit sowie die anschließende Zündung und Verbrennung in der Gasphase. In dieser Arbeit wird zur Berechnung des Strömungsfeldes der kommerzielle Löser StarCD [3] benutzt. Im Simulationsprogramm StarCD, gelösten Erhaltungsgleichungen werden zeitlich und räumlich diskretisiert. Eine turbulente Strömung wird durch die Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie vollständig beschrieben. Das verwendete Turbulenzmodell in dieser Arbeit ist das RNG $k-\epsilon$ Modell [3]. Zusätzlich werden die zwei Gleichungen für den Mischungsbruch und die Favre-gemittelte Varianz des Mischungsbruches im Rahmen der Lösungsprozedur für das Strömungsfeld gelöst. Im Programm StarCD sind mehrere verschiedene Modelle zur Simulation des Aufbruches von Tropfen implementiert. In dieser Arbeit wird das Modell nach Reitz-Diwakar verwendet. In diesem Modell wird gemäß Nicholls [7] strikt zwischen dem Blasen- und dem 'stripping'-Mechanismus unterschieden. Während Reitz und Diwakar in [5,6] von einem schlagartigen Zerfall in stabile Einzeltropfen ausgehen, wird in [3] kontinuierlicher Zerfall angenommen.

StarCD berechnet in jedem Zeitschritt mittels der eingestellten Initialisierungen und Randbedingungen das Strömungsfeld durch. Der Solver übergibt dem CMC-Code die Werte des gesamten Strömungsfeldes. Dabei werden Werte wie Geschwindigkeiten, Turbulenzquantitäten, Skalar Massenbruch etc. übergeben. Das Conditional moment closure Verbrennungsmodell (CMC) ist ein Modell für das Beschreiben des Transportes der reagierenden Scalar für turbulente Verbrennungsprozesse. Es wurde von Klimenko, der es von der joint PDF (probability density function) Gleichung ableitete, dann unabhängig von Bilger über Aufspaltung der reagierenden Scalar in seine "conditional averages" und "conditional fluctuations" vorgeschlagen. Das Modell des Conditional moment closure (CMC) Verbrennungsmodells wurde in einem Paper [8] unter dem Titel "Conditional Moment Closure for turbulent reacting flow" veröffentlicht. In der vorliegenden Arbeit wird ein 0D-CMC Ansatz verwendet. Das heißt, dass in der 0D-Formulierung die Konzentration der Spezies und die Temperatur nur eine Funktion des Mischungsbruches sind, es gibt keine räumliche Abhängigkeit. Ausgehend von einem detaillierten Reaktionmechanismus für n-Heptan mit ungefähr 1000 Elementarreaktionen und 168 chemischen Spezies wird mittels einer Reaktionsflussanalyse ein Startmechanismus von Bikas und Mastorakos, welcher auf dem Hewsonmechanismus basiert, mit 59 chemischen Spezies erstellt.

Der CMC-Code berechnet nun in jedem Zeitschritt mit den übergebenen Werten die Flammenstruktur, resp. die chemische Zusammensetzung. Liegt der Massenbruch Y_i der chemischen Komponente i im Mischungsbruchraum Z als Ergebnis einer Flameletrechnung vor, so kann der Favre-gemittelte Wert im physikalischen Raum durch Integration mit einer geeigneten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion berechnet werden.

Die Simulationen soll anhand des Experiments von Koss [4] demonstriert werden. Die Randbedingungen für Experiment und Simulation sind in Tab.1.

Gaszusammensetzung	Luft
Gastemperatur	800 K
Gasdichte	21.8 kg/m ³
Kraftstoff	n-Heptan
Kraftstofftemperatur	300 K
Kraftstoffdichte	684 kg/m ³
Injektortyp	Einlochdüse
Lochdurchmesser	200 μ m
Spritzdauer	1.4 ms
Spritzmenge	6 mg

Tabelle -1: Randbedingungen des Experiments

Begonnen wurde mit der Modellierung der Geometrie. Als Vereinfachung wurde die annähernde Rotationssymmetrie des Bereiches ausgenutzt, um das zu berechnende Gebiet auf ein zweidimensionales Problem zu reduzieren. StarCD enthält einen einfachen Gittergenerierungsbausatz, der für axialsymmetrische Geometrien verwendet werden kann. Das zweidimensionale Gitter enthält 60x40 Zellen. Die Tropfen werden durch 'parcels' repräsentiert. Der Strahlwinkel ist mit 100 richtig eingestellt. Die 'parcel'-Anzahl per Sekunde während der Rechnung ist $2.0E+07$. Das Brennpunkt dieses Forschungsvorhabens ist es, die Gas- und die Partikelphase hinsichtlich der Berücksichtigung von Verdampfung von Tropfen im Kontext verschiedener Verdampfungmodellen zu erweitern. In dieser Arbeit wird der Verdampfungmodelle von Vervisch [9] benutzt.

Das Conditional Moment Closure Verbrennungsmodell (CMC) liefert Eindringtiefen, die sehr gut mit den experimentellen Werten übereinstimmen [1]. Die Auflösung des mittel und feinen Netzes unterschieden sich um den Faktor 1,5 und 2. Die Eindringtiefe bei Netzverfeinerung konvergiert, d.h. sich bei weiterer Netzverfeinerung nicht mehr ändert. In der vorliegenden Arbeit wurde auch eine Parameteruntersuchung von die Zündverzugszeiten für ohne Turbulenzfall und mit Turbulenzfallen gezeigt (siehe Abb. 2 (a) and (b)). Es kommt hier für höhere Anfangstemperaturen zu kürzeren Zündverzugszeiten. Dabei kommt es sehr gute Übereinstimmung für hoch Temperaturen in beiden Fälle.

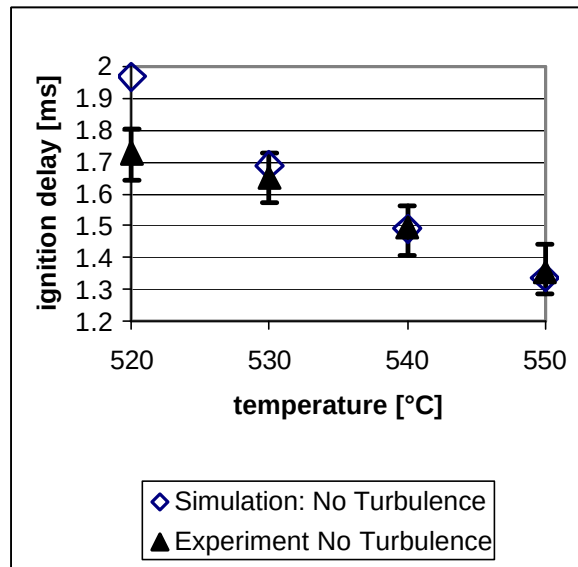


Abbildung 2(a) : Zündverzugszeiten für verschiedene Temperaturen, ohne Grundturbulenz [1]

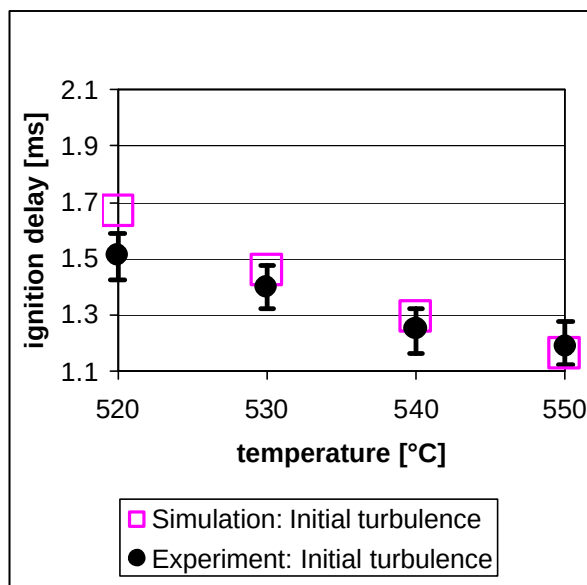


Abbildung 2(b): Zündverzugszeiten für verschiedene Temperaturen, mit Grundturbulenz [1]

Ein Vergleich der mit CMC-Modell berechneten Temperaturen für den Fall mit und ohne Grundturbulenz ist im Abb. 3(a) und (b) gezeigt.

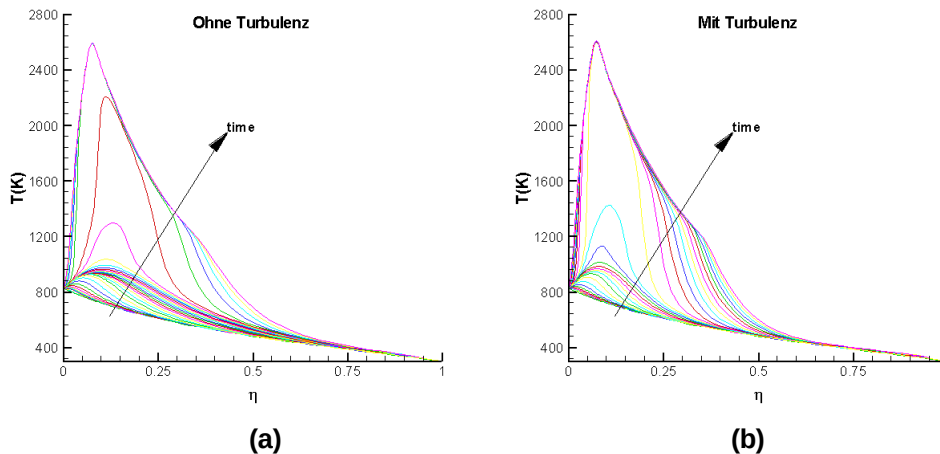


Abbildung 3: Temperaturverlauf während der Zündung für verschiedene Mischungsbruch (a) ohne Grundturbulenz (b) mit Grundturbulenz

Abbildung 4 zeigt die Massenbrüche verschiedener Komponenten für den Fall mit Grundturbulenz.

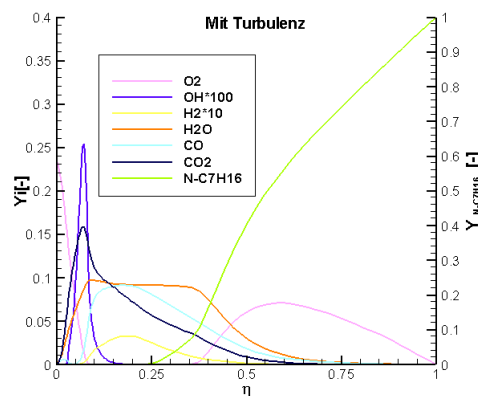
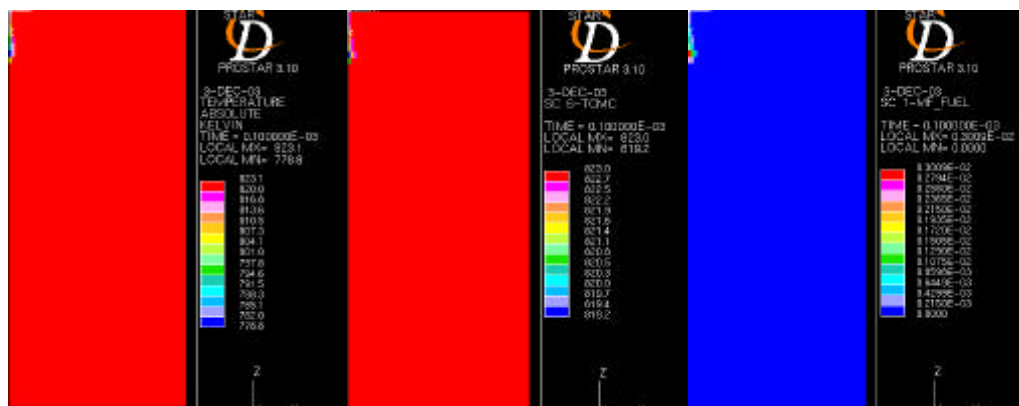


Abbildung 4: Massenbruch für verschiedene Komponenten (Fall mit Grundturbulenz)

In Abbildung 5 und 6 sind die Ergebnisse mit verschiedenen Turbulenzzuständen für verschiedene Zeiten dargestellt. Abb. 5.1(a), 5.1(b), 6.1(a) und 6.1(b) zeigen die berechnete Temperaturfelder mit der Energietransport Gleichung von Star CD und Energietransport Gleichung von CMC für $t=10^{-4}$ s. Die Temperaturfelder sind ähnlich in beiden Figuren. Abb. 5.1(c) und 6.1(c) zeigt die Mischungsbruch für $t=10^{-4}$ s. Abb. 5.2(a) 5.2(b), 6.2(a) und 6.2(b) zeigen die berechnete Temperaturfelder für $t=10^{-3}$ s. Die sind verschiedene für die Energietransport Gleichung von Star CD und die Energietransport Gleichung von CMC. Da die Temperaturfeld im CMC Code nicht mitberücksichtigt wird, weil das Verdampfungquellterm von der Energietransport Gleichung während die Berechnungen vernachlässigt ist. Abb. 5.2(c) und 6.2(c) zeigt den Mischungsbruchfeld für $t=10^{-3}$ s. Abb. 5.3(a), 5.3(b), 6.3(a) und 6.3(b) zeigen die berechnete Temperaturfelder für $t=2 \times 10^{-2}$ s. Zusätzlich ist es absichtlich, dass für den Fall ohne Grundturbulenz die Eindringtiefe sogar größer als mit Grundturbulenz ist.

Die Idee ist nun, dieses Problem mit einem neu eingefügten Verdampfungquellterm zu berücksichtigen, um die Temperatur von der CMC Energietransportgleichung zu korrigieren.

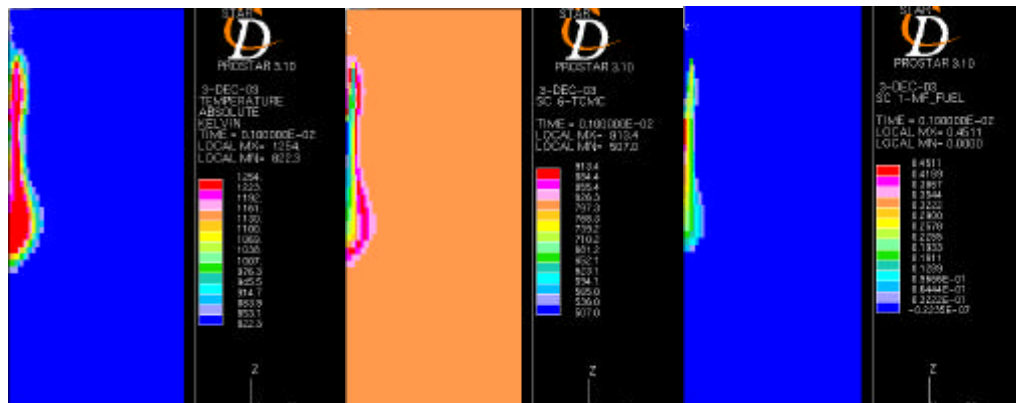


(a)

(b)

(c)

Abbildung 5.1: Temperaturen und Mischungsbruch, bei einer Zeit $t=10^{-4}$ s (ohne Grundturbulenz), nach Beginn der Einspritzung

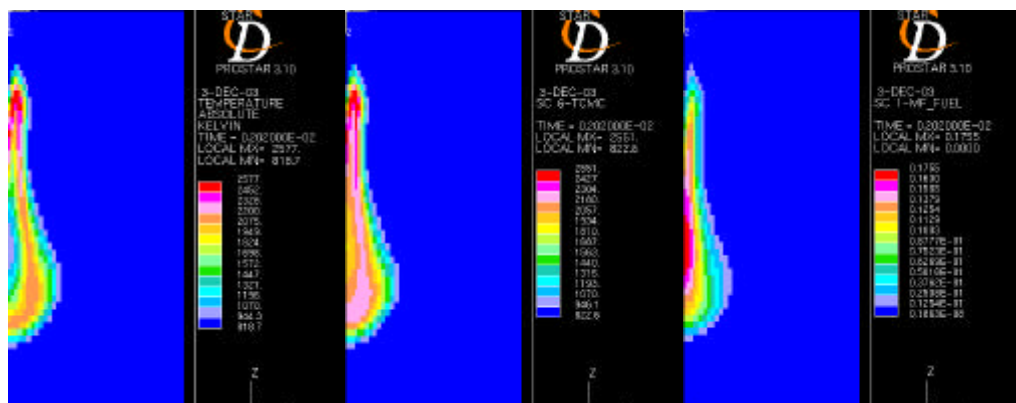


(a)

(b)

(c)

Abbildung 5.2: Temperaturen und Mischungsbruch, bei einer Zeit $t=10^{-3}$ s (ohne Grundturbulenz), nach Beginn der Einspritzung



(a)

(b)

(c)

Abbildung 5.3: Temperaturen und Mischungsbruch, bei einer Zeit $t=2 \times 10^{-3}$ s (ohne Grundturbulenz), nach Beginn der Einspritzung

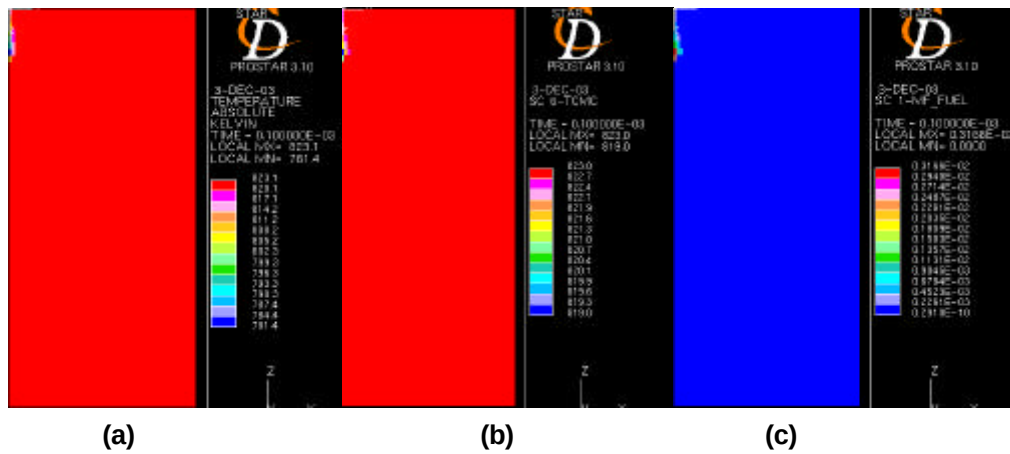


Abbildung 6.1: Temperaturen und Mischungsbruch, bei einer Zeit $t=10^{-4}$ s (mit Grundturbulenz), nach Beginn der Einspritzung

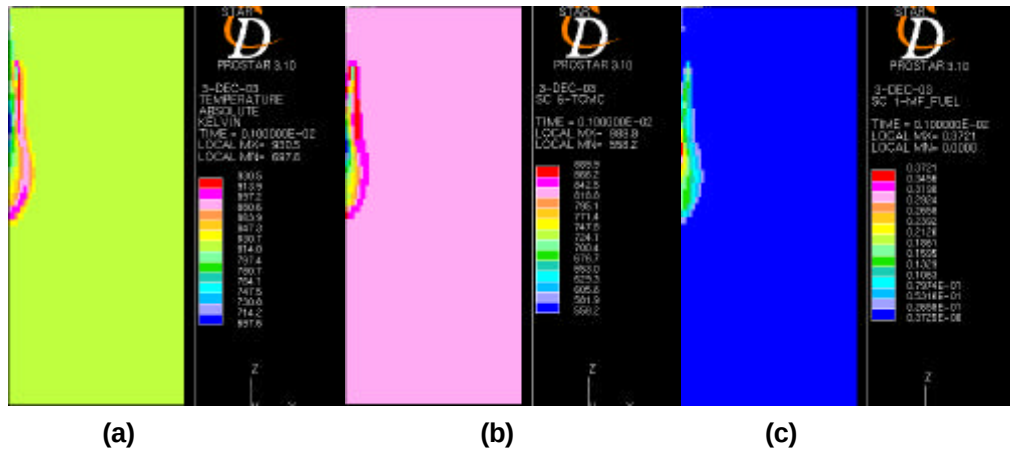


Abbildung 6.2: Temperaturen und Mischungsbruch, bei einer Zeit $t=10^{-3}$ s (mit Grundturbulenz), nach Beginn der Einspritzung

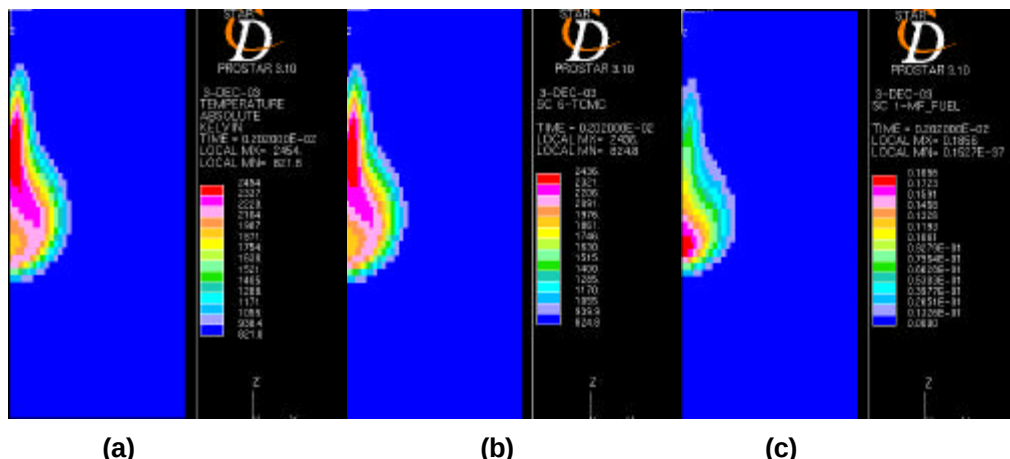


Abbildung 6.3: Temperaturen und Mischungsbruch, bei einer Zeit $t=2 \times 10^{-3}$ s (mit Grundturbulenz), nach Beginn der Einspritzung

Nationale Zusammenarbeit

Das Projekt weist Synergien mit einer parallelen Zusammenarbeit mit der Firma Wärtsilä Schweiz.

Internationale Zusammenarbeit

Das Projekt "Spray Flammen mit CMC-Modelle" beinhaltet eine Zusammenarbeit mit der Universität Cambridge (Dr. E. Mastorakos) . Wir sind auch in Verbindung zu Schlüsselpersonen von der Abteilung Unterstützung, "CD Adapco Group (StarCD)", um den Code in wesentlichen Punkten zu verbessern.

Bewertung 2003 und Ausblick 2004

Die Modellierung turbulenter Sprayflammen umfasst die Beschreibung des turbulenten Strömungsfeldes in Anwesenheit der Verdampfung und Verbrennung von Tröpfchen sowie deren Bewegung. Hierzu wird das Conditional Moment Closure (CMC) Verbrennungsmodell, in Verbindung mit dem CFD – Simulationsprogramm StarCD berücksichtigt. Die Entflammung und Verbrennung wurde mittels des Conditional Moment Closure (CMC) Verbrennungsmodells untersucht. Verschiedene Turbulenzfälle sind berücksichtigt.

In Zukunft wird ein Verdampfungsquellterm eingefügt, so dass die dem CMC-Code übergebene Temperatur korrekt berechnet wird. Zusätzlich müssen Verbesserungen im Bereich einer effizienteren Rechenzeit sowie auch einer verbesserten Stabilität erarbeitet werden, damit das Conditional Moment Closure Verbrennungsmodell ein effizientes Standardwerkzeug in der Simulation der turbulenten 1- und 2-phasigen Verbrennung wird.

Referenzen (LAV-Beitrag)

- [1] E. Mastorakos, , Y.M. Wright: ***Simulations of Turbulent Spray Auto-ignition with Elliptic Conditional Moment Closure***, Proceedings of the European Combustion Meeting, 2003.
- [2] Schneider B.: ***Experimentelle Untersuchungen zur Spraystruktur in transienten, verdampfenden und nicht verdampfenden Brennstoffstrahlen unter Hochdruck*** Diss. ETH Nr. 15004, 2003

Referenzen

- [3] **CD Adapco Group: StarCD Methodology** Version 3.15A Computational Dynamics Limited, 2002.
- [4] H.J Koss, D. Brüggemann, A. Wiartilla, H. Bäcker, A. Breuer: ***Investigations of the Influence of Turbulence and Type of Fuel on the Evaporation and Mixture Formation in Fuel Sprays***, Final Report of JOULE project on Integrated Diesel European Action (IDEA), 1992.
- [5] R.D. Reitz, R. Diwakar: ***Structure of High-Pressure Fuel Sprays***, SAE 870598,1987.
- [6] R.D. Reitz, R. Diwakar : ***Effect of Drop Breakup on Fuel Sprays***, SAE 860469,1986.
- [7] J.A. Nicholls: ***Stream and Droplet Breakup by Shock Waves***, NASA-SP-194, Eds. D.T. Harrje and F.H. Reardon, S. 126-128,1972.
- [8] R.W. Bilger: ***Conditional Moment Closure for Turbulent Reacting Flow***, Phys. Fluids A 5 (2), 436-444 ,1993.
- [9] J. Reveillon, L. Vervisch: ***Spray Vaporization In Nonpremixed Turbulent Combustion Modeling: A Single Droplet Model***, Comb. and Flame 121, 75-90, 2000.