

Schlussbericht 2005, 9. Dezember 2005

Projekt

Erarbeitung von Grundlagen für innovative Brennverfahren und motorische Arbeitsprozesse

Autor und Koautoren	G. Barroso, A. Escher, K. Boulouchos
beauftragte Institution	Labor für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme LAV / ETHZ
Adresse	Clausiusstr. 33, ETH Zentrum / CLT B, 8092 Zürich
Telefon, E-mail, Internetadresse	01 632 75 34, barroso@lav.mavt.ethz.ch, www.lav.ethz.ch 01 632 26 50 escher@lav.mavt.ethz.ch, www.lav.ethz.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	Projekt-Nr. 40070, Verfügung Nr. 79887
Dauer des Projekts (von – bis)	1. September 2000 – 31. August 2003

ZUSAMMENFASSUNG

Das Projekt „Erarbeitung von Grundlagen für innovative Brennverfahren und motorische Arbeitsprozesse“ hat auf dem Gebiet der Simulation zur Erstellung von chemischen, reduzierten Reaktionsmechanismen von stochastischen Mehrzonenmodellen und zur Kopplung der reduzierten Chemie mit dreidimensionalen-reaktiven-fluid-mechanischen Simulation geführt. Diese Modelle ermöglichen die Einsicht in den Brennraum, um Verbrennungsphänomene für neue Brennverfahren verstehen zu können. Die verwendeten Reaktionsmechanismen repräsentieren die Chemie zweier Kraftstoffe. Der erste, n-Heptan, hat dieselähnliche Zünd- und Verbrennungseigenschaften. Der zweite, n-Butan, hat Zünd- und Verbrennungseigenschaften zwischen Benzin und Diesel. Dies ermöglicht die Untersuchung von technischen Möglichkeiten mit alternativen Kraftstoffen. Die reduzierte Chemie wurde anhand von detaillierten Reaktionsmechanismen validiert und zeigte trotz ihrer Vereinfachung eine sehr gute Übereinstimmung. Die Modelle für die motorische Verbrennung wurden mit Messungen von der Universität Stuttgart und der Fachhochschule Dresden validiert und zeigten ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung. Parallel zu den numerischen Arbeiten wurden erfolgreich experimentelle Untersuchungen am Einhubtriebwerk durchgeführt. Nach aufwändigen Modifikationen im Q1 und Q2 2005 konnte mit dem Einhubtriebwerk, welches seit August 2004 am Institut im Einsatz steht, ein Prüfstand realisiert werden, um unter definierten Bedingungen von T, p und λ sowie qualitativ abhängig vom Homogenisierungsgrad, Zündzeitpunkte sowie Zündorte zu bestimmen. Im Berichtsjahr wurden zahlreiche Versuche mit n-Butan, n-Heptan und Dieselmotorkraftstoff durchgeführt. Messungen mit n-Heptan (dieselähnlich) zeigten einen Beginn der Wärmeumsetzung unabhängig vom Verbrennungsluftverhältnis. Allerdings spielt der Homogenisierungsgrad, resp. der Einspritzzeitpunkt eine entscheidende Rolle. Der direkte Vergleich von Messungen mit konventionellem Dieselmotorkraftstoff und n-Heptan zeigt, dass der Zustand im Brennraum bei Beginn der Wärmeumsetzung praktisch identisch ist. Die unterschiedlichen Verdampfungseigenschaften führen zu einem tieferen Umsetzungsgrad bei Dieselmotorkraftstoff. Mittels der schnellen CMOS High-Speed Kamera konnten Aufnahmen der OH- und CH- Chemilumineszenz realisiert werden. Als grossen Erfolg kann die gewonnene Ausschreibung für die Weiterführung des Projektes „Homogene Dieselmotorkraftstoffverbrennung“ gewertet werden. Der Beginn wird voraussichtlich 2007 sein. Dies als Auszeichnung für unsere bisherige, anerkannte Arbeit.

Projektziele

Durch eine homogene Kompressionszündung (Homogeneous Charge Compression Ignition, HCCI) können die Russ- sowie die Stickstoffemissionen markant reduziert werden. Das Projekt wurde durch die FVV (Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen) und dem Bundesamt für Energiewirtschaft finanziert. Die Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen ist ein Verbund der wichtigsten deutschen Motorenhersteller und Zulieferer. Die größten europäischen Motorenhersteller sind zusätzlich auch Mitglieder.

Der Grundgedanke ist die vollständige Gemischaufbereitung vor der Verbrennungseinleitung. Je magerer und homogener ein Gemisch bei gegebenem Luftmassenanteil im Zylinder, desto kleiner ist die Energiedichte was in einer tieferen Verbrennungstemperatur und geringeren Stickstoffemissionen resultiert. Gleichzeitig wird durch die Homogenisierung die Bildung von Russ minimiert. Bei diesem neuen Brennverfahren sind allerdings gewisse Nachteile und Herausforderungen zu nennen, die Basis für intensive Forschungstätigkeiten sind. Problematisch sind die hohen UHC Emissionen welche durch die kalte Verbrennung sowie eine unvollständige Verdampfung des Brennstoffes vor der Verbrennung hervorrufen. Eine weitere Herausforderung ist die Steuerung des Verbrennungsbeginns.

Der experimentelle Teil dieser Arbeit soll einen Beitrag dazu leisten, um unter definierten Zuständen die Zündverzögerungen sowie die Zündorte (Mittelwerte und Standardabweichungen) für einen Dieseleratzkraftstoff sowie für geeignete Kraftstoffmischungen - auch gasförmige - zu bestimmen. Dies soll möglichst in Abhängigkeit von Betriebsparametern wie Druck und Temperatur im Brennraum, Lambda, Abgasrückführung, Homogenisierungsgrad (bei später Gemischaufbereitung), Kraftstoffart sowie - nach Möglichkeit - gezielter Beeinflussung lokaler thermischer Randbedingungen erfolgen.

Damit sollen bessere Aussagen zur Selbstzündung von homogenen Gemischen in motorischen Anwendungen in Abhängigkeit von verschiedenen Betriebsparametern möglich sein, insbesondere im Hinblick auf die Validierung von Simulationsalgorithmen.

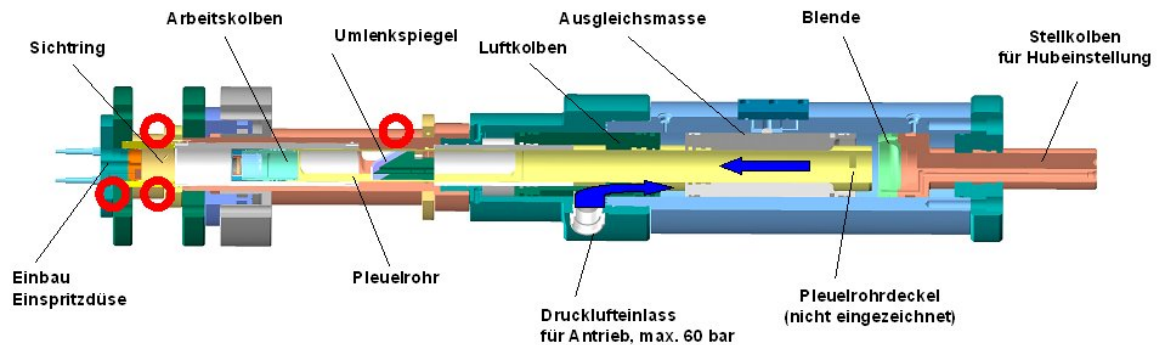
Die Simulation wird immer stärker zur Entwicklung von Verbrennungsmotoren eingesetzt. Die beschränkten Rechenkapazitäten und die verkürzten Entwicklungszeiten erfordern die Modellierung der komplexen chemischen und physikalischen Prozesse. Das vorliegende Projekt lieferte einen Beitrag zum Verständnis der 3D-Spraysimulation, indem dank detaillierten Messergebnissen mit unterschiedlichen Randbedingungen diese validiert werden konnten. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Analyse von detaillierten Reaktionsmechanismen für Alkane und deren Reduktion auf die wesentlichsten Reaktionen um diese in einem weiteren Schritt mit Mehrzonenmodellen und kompletter 3D-Strömungssimulation koppeln zu können. Das Endziel des Simulationsbeitrages war es, Modelle zu erstellen, welche die Gemischaufbereitung, die Entzündung sowie die Verbrennung von homogen betriebenen kompressionsgezündeten Motoren vorrausberechnen und somit einen wesentlichen Beitrag zur Entwicklung eines HCCI Motors leisten. Die gesetzten Ziele, wurde auf dem Gebiet der Simulation erreicht.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Experiment, Prüfstand: Das neue Einhubtriebwerk (EHT)

Im Jahresbericht 2004 wurden die erreichten Ergebnisse von Messungen in der Hochdruck-Hochtemperatur Zelle (HDTZ) zusammengefasst. Da die HDTZ nicht für einen Betrieb mit homogener Ladungsverteilung ausgelegt ist, wurden die fortführenden Experimente am Einhubtriebwerk, welches seit August 2004 am Institut im Betrieb ist, durchgeführt. An dieser Stelle wird nur kurz auf den Prüfstandaufbau eingegangen. Für detailliertere Ausführungen sei auf [4, 5] verwiesen. Das Antriebskonzept basiert auf zwei gegenläufigen, koaxial angeordneten Kolben. Mittels

einem Kolben wird der Hub eingestellt und kann in einem grossen Bereich von 120 mm bis 250 mm variiert werden (dieser Wert entspricht rund dem Doppelten eines konventionellen PKW Motors). Durch das Verhältnis zwischen Antriebsdruck und Brennraumdruck vor der Schussauslösung kann eine Drehzahl simuliert werden. Die folgende Abbildung und die Tabelle geben einen Überblick über den Aufbau des EHT sowie über die möglichen Betriebsparameter.



Antriebskonzept : gegenläufige Bewegung zweier koaxial angeordneter Kolben



n	1000 U/min – 3000 U/min
H	stufenlos verstellbar zwischen 120 mm – 250 mm
B	84 mm
ϵ	5 – 25
p_{\max}	200 bar
Drall	möglich
Heizung	Arbeitskolben und Zylinder sind heizbar bis 150 °C

Abb. 1: Das neue Einhubtriebwerk (EHT), Betriebsparameterbereich

Die gute optische Zugänglichkeit durch den Sictring, den Zylinderkopf sowie durch den transparenten Kolben in Kombination mit dem grossen Betriebsparameterbereich bei guter Reproduzierbarkeit von Kolbenweg und Zylinderdruck sind entscheidende Vorteile gegenüber einem transparenten Kolbenmotor. Nachteilig ist die geringere Schusskadenz zu erwähnen (pro Experiment 2 Minuten).

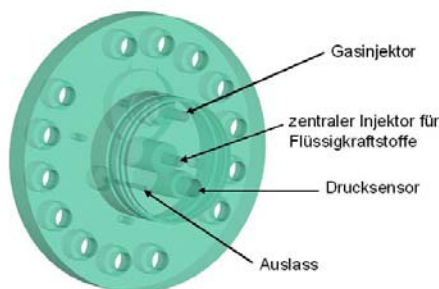


Abb. 2:

Modifizierter Zylinderkopf [5] zur gleichzeitigen Aufnahme von 2 Injektoren (flüssig und gasförmig)

Im Folgenden werden die erreichten Resultate mit 3 verschiedenen Kraftstoffen aufgezeigt. Wie in Schlieren Versuchen am EHT gezeigt wurde, kann beim Betrieb mit einer frühen n-Butaneinspritzung von einer voll-homogenen Ladungsverteilung ausgegangen werden. Die Cetanzahl ist mit 37 tief, die Zündeigenschaften sind eher benzinähnlich. Als Dieseleratzkraftstoff wurde n-Heptan gewählt mit einer Cetanzahl von 55 sowie einer definierten Verdampfungstemperatur

von 370 K. In früheren Versuchen [7] wurde gezeigt, dass sich die Zündtemperaturen und –zeitpunkte mit konventionellem Dieseldieselkraftstoff in guter Übereinstimmung im Bereich von 20 – 40 bar, 650 K – 900 K vergleichen lassen. Die Kombination von beiden Kraftstoffen decken einen grossen Bereich betreffend Zündeigenschaften von Hydrokarbonaten ab. Als dritter Kraftstoff wurden Messungen mit Diesel durchgeführt mit dem Ziel, die Zündeigenschaften in Bezug auf Zündzeitpunkt sowie Wärmeumsetzung mit n-Heptan zu vergleichen.

Messungen mit n-Butan

Die Abbildungen 3a und 3b zeigen eine Variation von Lambda wobei die Luft im Zylinder konstant gehalten und die eingespritzte Masse variiert wurde.

$T_{\text{Zylinderkopf}}$	400 K
$p_{\text{Zylinder vor Kompression}}$	1.1 bar
Antriebsdruck	30.5 bar, daraus resultiert eine simulierte Drehzahl von 1250 U/min, $\varepsilon = 18$
Hub	225 mm
Kraftstoff	13.7 mg – 22.9 mg n-Butan flüssig, ESB im UT

Der Spitzendruck, die aus der Druckanalyse berechnete mittlere Temperatur sowie die integrale Wärmeumsetzung steigen erwartungsgemäss mit abnehmendem Verbrennungsluftverhältnis.

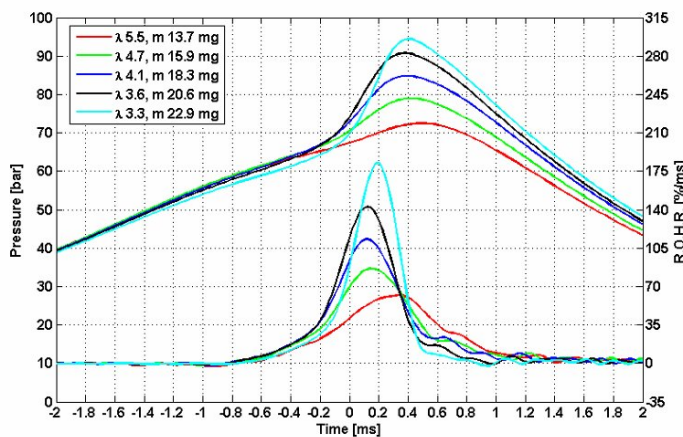


Abb. 3a:

Druckverlauf und Wärmeumsetzung, Variation von λ

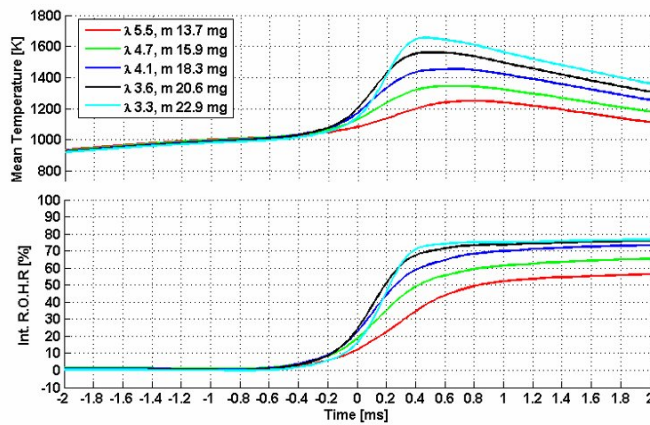


Abb. 3b:

mittlere Gastemperatur und
integrale Umsetzung

Abb. 3: Messungen mit n-Butan, vollhomogener Fall

Es wurden die Konditionen von p und T im Zylinder untersucht bei Beginn der Tief- und Hochtemperaturreaktion (LTR, HTR).

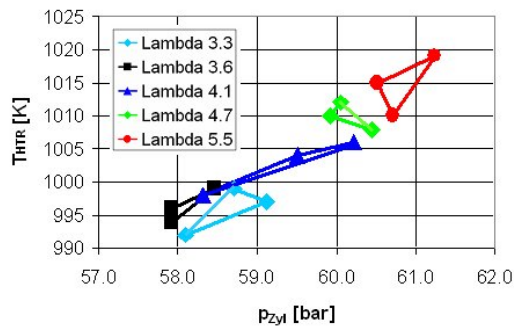


Abb. 4a:

Temperatur und Druck bei Beginn der HTR,
Darstellung von 3 aufeinanderfolgenden
Experimenten

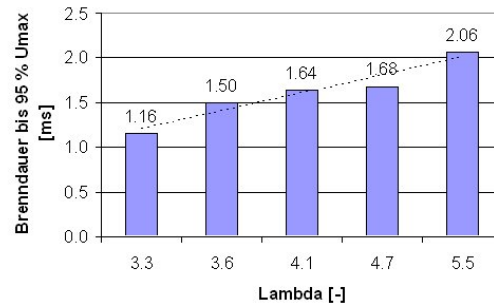


Abb. 4b:

Brenndauer als Funktion von λ , gemittelter
Wert über 3 Experimente

Den Abbildungen 4a und 4b kann entnommen werden, dass mit sinkendem Verbrennungsluftverhältnis die Verbrennung schneller abläuft. Bei einem λ von 3.3 werden 95% der maximalen Wärmefreisetzung innerhalb 1.16 ms umgesetzt, was zu sehr hohen Druckraten (Pa/s) führt. Es zeigte sich auch, dass der Beginn der Umsetzung früher, d.h. bei tieferen Brennraumdrücken und Temperaturen erfolgt mit sinkendem λ . Cool flames traten nur bei tiefer Zylinderkopftemperatur und hohem λ auf. Dies wurde ebenfalls in [8] nachgewiesen.

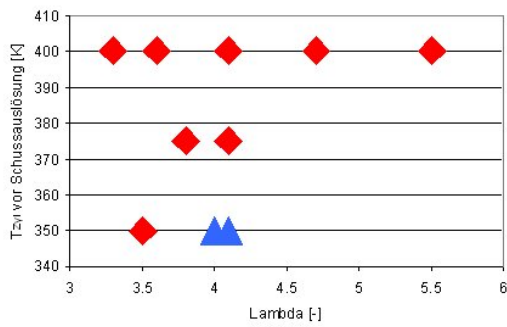


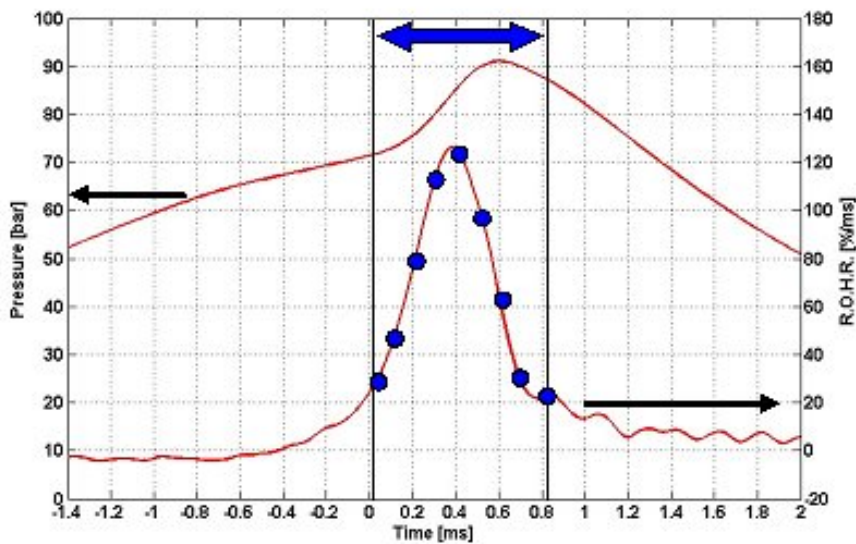
Abb. 5:

Bereich von HTR und LTR einer vollhomogenen n-Butan Verbrennung

rot = durchgeführte Experimente, nur HTR Verbrennung

blau = durchgeführte Experimente, LTR und HTR Verbrennung

In der folgenden Abbildung sind OH-Chemilumineszenzaufnahmen dargestellt. Sie wurden mittels der neuen CMOS High-Speed Kamera (bis 10 kHz non-intensified, 3 kHz intensified) durch den transparenten Kolbenboden realisiert. Die Aufnahmen zeigen, dass der gesamte einsehbare Brennraum (\varnothing Kolbenboden 56 mm, Bohrung 84 mm) vom OH Signal erfasst wird. Das Umsatzmaximum liegt bei 0.4 ms nahe dem OH-Intensitätsmaximum.



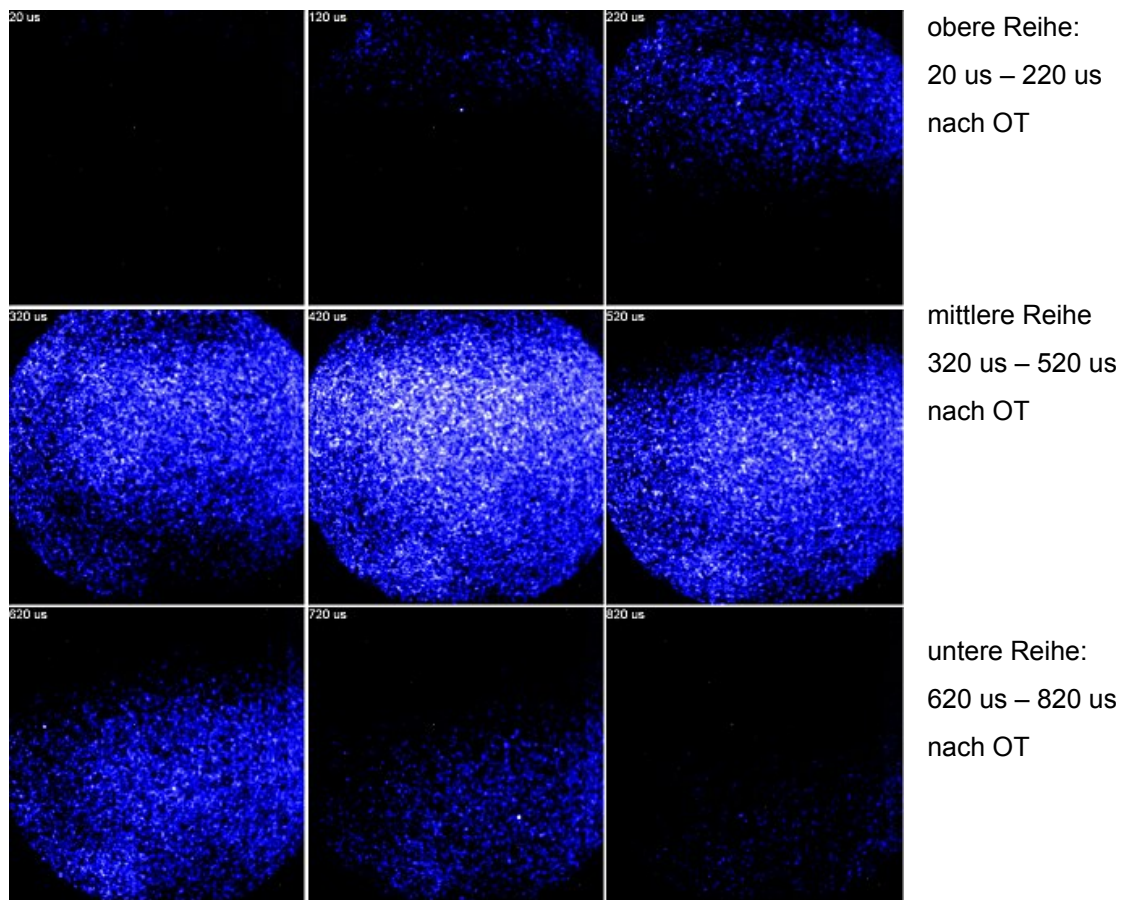


Abb. 6: OH-Chemilumineszenz, 310 nm, Entflammung einer vollhomogenen n-Butan Verbrennung, Aufnahme­frequenz 10 kHz, Gate 40 us, Gain 65 % $T_{\text{Zylinder}} 373 \text{ K}$, $p_{\text{Zylinder}} 1.1 \text{ bar}$, $\lambda=3.7$, Einspritzung von 21.5 ms n-Butan im UTP

Messungen mit n-Heptan

Durch die definierte Verdampfungstemperatur von 370 K sowie eine ähnliche Cetanzahl wie Diesel eignet sich n-Heptan als guter Modellkraftstoff. Abbildung 7 zeigt eine Variation von λ . Variiert wurde die eingespritzte Brennstoffmasse, die Luftmasse wurde konstant gehalten.

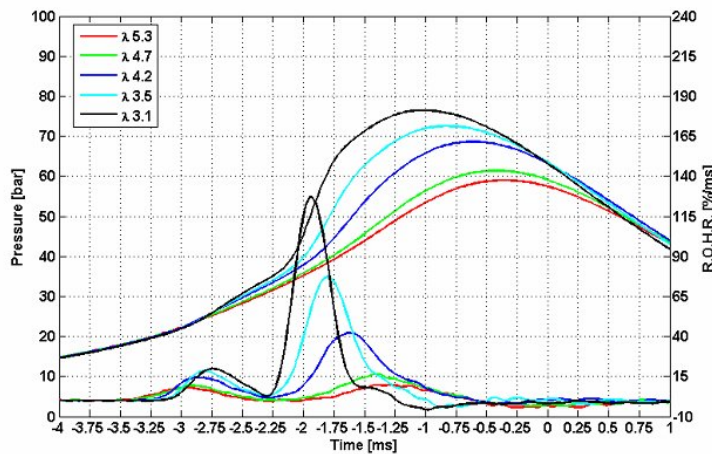


Abb. 7:
Variation von λ durch mB.
 $T_{\text{Zylinder}} 400 \text{ K}$
 $p_{\text{Zylinder}} 1.1 \text{ bar}$
 $n_{\text{sim}} 1200 \text{ U/min}$

	LTR		HTR	
	p [bar]	T [K]	p [bar]	T [K]
$\lambda = 5.3$	17.8	841	34.5	1004
$\lambda = 4.7$	18.5	843	33.8	1007
$\lambda = 4.2$	19.7	853	33.9	1028
$\lambda = 3.5$	20.1	845	33.4	1036
$\lambda = 3.1$	20.7	846	34.3	1054

Abb. 8:
Beginn der Umsetzung von
LTR und HTR als Funktion
von λ

Der Einfluss von κ bei tieferem λ während der Kompression ist in einer späteren Wärmeumsetzung bei höheren Drücken erkennbar. Es ist ersichtlich, dass der Beginn der Umsetzung der Tieftemperaturreaktion (LTR) bei rund 848 K erfolgt. In den betrachteten Betriebspunkten steigt T_{HTR} mit sinkendem λ . Es wird vermutet, dass durch den erhöhten Umsatz in den cool flames der Beginn der HTR zu höheren Temperaturen verschoben wird.

Vergleich von Messungen mit n-Heptan und Diesel

Im Folgenden sind exemplarische Vergleichsmessungen von Diesel und n-Heptan aufgezeigt. Beide Kraftstoffe haben eine ähnliche Cetanzahl (Diesel 56, n-Heptan 55). Der tiefere und definierte Verdampfungspunkt von n-Heptan lässt vermuten, dass die Verdampfungseigenschaften unterschiedlich sind.

$T_{\text{Zylinderkopf}}$	400 K
p_{Zylinder} vor Kompression	1.1 bar
Antriebsdruck	30 bar, daraus resultiert eine simulierte Drehzahl von 1200 U/min, $\epsilon = 17$
Hub	175 mm
Kraftstoff	16.4 mg Diesel / 15.9 mg n-Heptan, $\lambda = 3.8$

Die Kraftstoffmenge wurde um den unteren Heizwert korrigiert, wobei die Menge mittels der Einspritzdauer angepasst wurde. Der Einspritzdruck wurde bei 500 bar konstant gehalten. Variiert wurde in der untenstehenden Abbildung der Einspritzzeitpunkt von 5.8 ms resp. 6.8 ms vor OT.

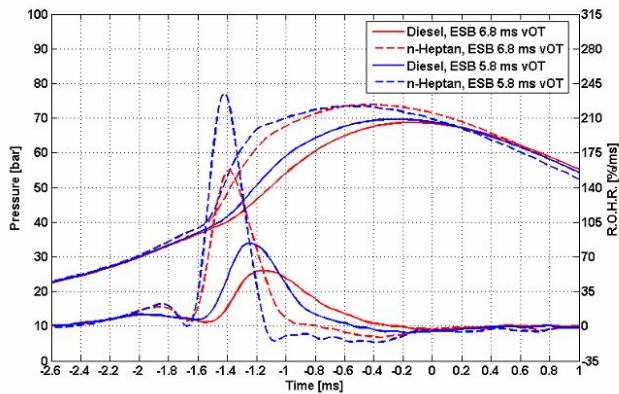


Abb. 9a:

Druckverlauf und Wärmeumsetzung, Variation von λ

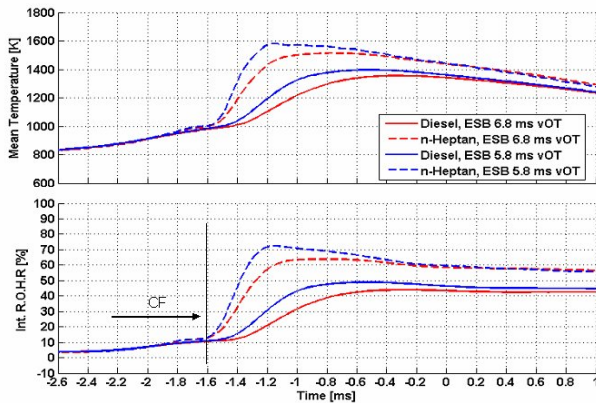


Abb. 9b:

mittlere Gastemperatur und integrale Umsetzung

Es ist erkennbar, dass die Verbrennung mit n-Heptan ein ausgeprägteres cool-flame Verhalten aufweist. Bei n-Heptan sowie bei Dieselkraftstoff werden rund 10% der Wärmefreisetzung in der Tieftemperaturreaktion bei 850 K umgesetzt. Die integrale Umsetzung liegt bei einer Verbrennung mit n-Heptan insgesamt auf einem höheren Niveau, dies auf Grund des grösseren Anteils der verdampften Kraftstoffmenge.

Der Beginn der Kraftstoffumsetzung liegt bei n-Heptan und Diesel in der LTR und HTR in einem ähnlichen Bereich wie die folgende Abbildung zeigt:

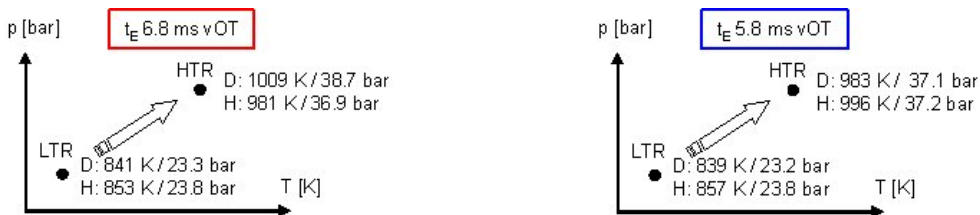


Abb. 10: Beginn der Wärmeumsetzung der LTR und HTR von Diesel (D) und n-Heptan (H)

Diese Messungen, in Kombination mit Resultaten aus der Hochdruck-Hochtemperatur Zelle lassen den Schluss zu, dass für die Bestimmung des Zündbeginns von Dieselkraftstoff Daten von Experimenten mit n-Heptan verwendet werden können; dies ist v.a. für die Simulation eine wichtige Erkenntnis.

Simulation

Das Projekt konnte in Kernaufgaben aufgeteilt werden. Die erste war eine detaillierte Untersuchung der Möglichkeiten der Spraysimulation zur Voraussage der Gemischbildung. Diese Frage wurde umfassend in den vorherigen Zwischenberichten beantwortet und in [3] publiziert und wird nicht erneut aufgerollt. Die Kernaussage war, dass die Gemischbildung sinnvoll wiedergegeben werden kann, wenn eine gute Netzauflösung gewählt wird und wenn das Netz in Richtung der Sprayachse erstellt wird. Die zweite Kernaufgabe war, die Erstellung von reduzierten Reaktionsmechanismen, die die wesentliche Chemie für zwei Kraftstoffe repräsentieren. Unten werden erfolgreiche Vergleiche zwischen der detaillierten Anfangschemie und der reduzierten Chemie gezeigt. Die Industriepartner zeigten großes Interesse an reduzierten Mechanismen für dieselähnliche Kraftstoffe. Ein weiterer Punkt war die Erstellung von schnellen stochastischen Modellen zur Vorausberechnung von praktisch perfekt homogenen Motoren die mittels Selbstzündung verbrennen. Die Ergebnisse wurden an Messpunkte der Universität Stuttgart und der Fachhochschule Dresden erfolgreich validiert. Einige Beispiele werden weiter unten gezeigt. Die Ergebnissen wurden in [2] publiziert. Die letzte Kernaufgabe war die Koppelung der reduzierten Chemie mit 3D-CFD Simulation um Phänomene im Brennraum inneren sehen und verstehen zu können. Auch diese Teilaufgabe konnte erfolgreich gemeistert werden. Einige Beispiele sind weiter unten aufgezeigt. Umfangreiche Ergebnisse wurden in [1] publiziert.

Reduktion der n-Heptan Chemie

In Abbildung 11 werden Berechnungen mit dem reduzierten Mechanismus denjenigen mit dem detaillierten Mechanismus gegenübergestellt. Es ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der detaillierten und der reduzierten Chemie festzustellen. Nur an einigen Punkte mit Verdichtungsverhältnis 15, also an Punkten wo die Temperatur tiefer ist, ist die Abweichung etwas grösser.

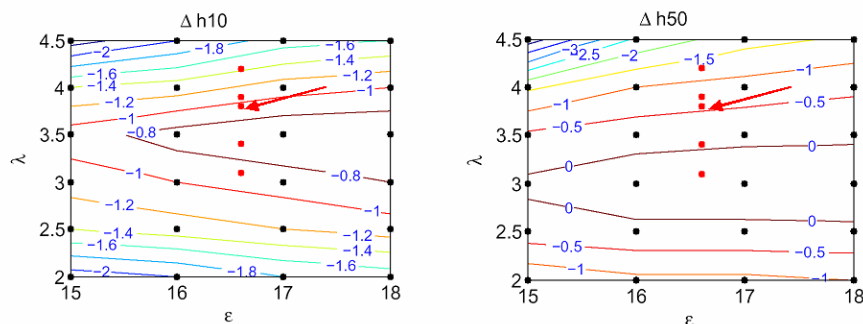


Abb. 11: Vergleich des reduzierten n-Heptan Mechanismus mit dem detaillierten Mechanismus anhand des 10% Umsatzpunktes und des 50 % Umsatzpunktes unter motorischen Bedingungen (Drehzahl 1200 U/min)

Reduktion der n-Butan Chemie

In Abbildung 12 werden Berechnungen mit dem reduzierten Mechanismus denjenigen mit dem detaillierten Mechanismus gegenübergestellt. Es ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der detaillierten und der reduzierten Chemie festzustellen. Nur an einigen Punkte mit Verdichtungsverhältnis 15 und einem $\lambda = 3$, also an Punkten wo die Temperatur tiefer ist, ist die Abweichung etwas grösser. Es ist jedoch erstaunlich, wie der Startmechanismus mit 385 chemischen Spezies und 1895 Reaktionen, auf einen Mechanismus mit 22 Spezies und 57 Reaktionen mit so guter Übereinstimmung reduziert werden konnte.

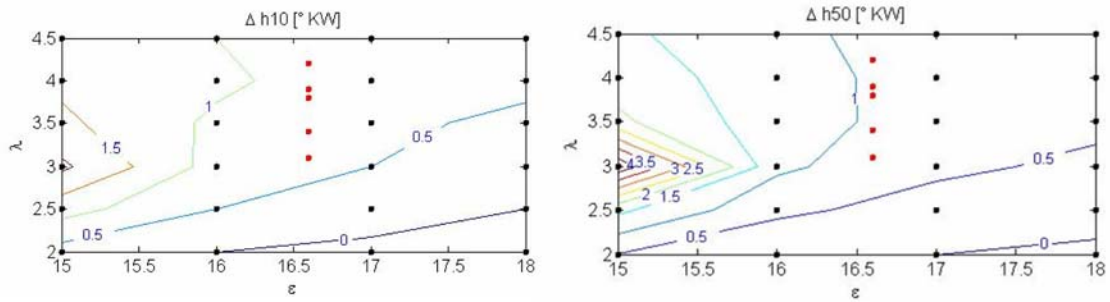


Abb. 12: Vergleich des reduzierten n-Butan Mechanismus mit dem detaillierten Mechanismus anhand des 10% Umsatzpunktes und des 50 % Umsatzpunktes unter motorischen Bedingungen (Drehzahl 1200 U/min)

Mehrzonen-Modellierung homogener Verbrennung

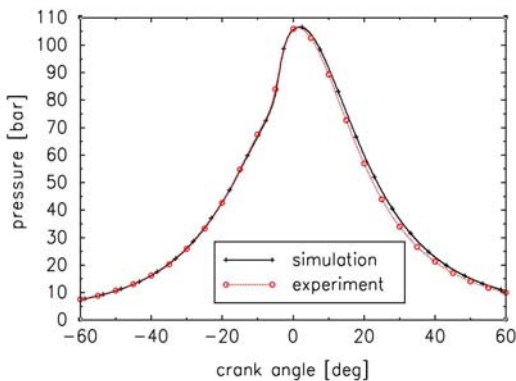


Abb. 13: Vergleich der Druckkurven zwischen Experiment und Simulation (Betriebspunkt: Drehzahl 1200 U/min, $\lambda = 5.4$, Verdichtungsverhältnis = 16.6)

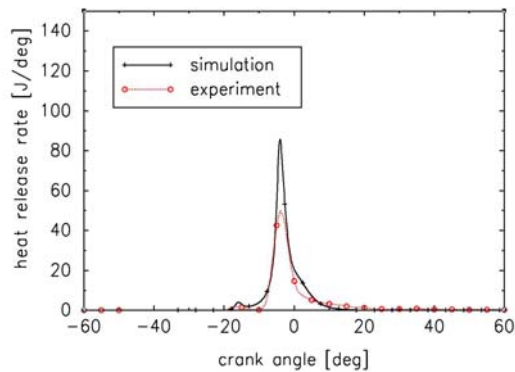


Abb. 14: Vergleich der Wärmefreisetzung zwischen Experiment und Simulation (Betriebspunkt: Drehzahl 1200 U/min, $\lambda = 5.4$, Verdichtungsverhältnis = 16.6)

Wie aus Abbildung 13 und 14 ersichtlich ist, zeigt das stochastische Mehrzonenmodell eine gute Übereinstimmung zwischen der Simulation und dem Experiment der Universität Stuttgart. Mit diesem Modell konnten verschiedene Betriebspunkte berechnet werden. Im weiteren zeigte eine Sensitivitätsuntersuchung, dass die Verbrennung sensitiver auf die Temperaturverteilung reagierte als auf die Gemischverteilung. Eine Verlängerung der Brenndauer war mittels einer grösseren Standardabweichung der Temperatur möglich. Eine Erhöhung der Standardabweichung der Gemischzusammensetzung führte nicht zu diesem Ergebnis. Dennoch war die Erhöhung der Standardabweichung der Temperatur nicht nur vorteilhaft. Es führte nämlich zu einer Verlagerung des Verbrennungsbeginns in Richtung früh, mit dem Nachteil grösserer Druckerhöhungen. Diese verursachen Geräusch und sind folglich nicht angenehm. Eine Möglichkeit wäre, die Standardabweichung zu Erhöhen, bei gleichzeitiger Senkung des Verdichtungsverhältnisses. Die technische Umsetzung der einer kontrollierten Erhöhung der Standardabweichung der Temperatur ist jedoch nicht ganz einfach.

3d-Simulation homogener Verbrennung

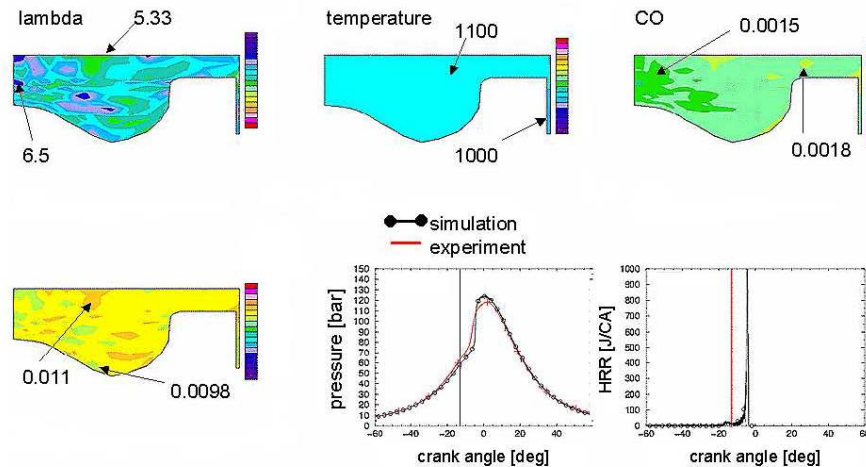


Abb. 15: 3d-Simulation homogener selbstzündender Brennverfahren mit n-Butan (Betriebspunkt-daten: Drehzahl 1420 U/min, IMEP_{HP} = 4.02 bar, $\lambda = 5.13$, Verdichtungsverhältnis = 17.2)

Abbildung 15 visualisiert den Zustand im Brennraum inneren nach den Cool-flames. Ein λ gleich 1 bedeutet, daß so viel Luft vorhanden ist um eine stöchiometrische Verbrennung zu ermöglichen. Aus der Abbildung ist deutlich sichtbar, daß das λ größer 1 ist und folglich eine überstöchiometrische Verbrennung, also eine Verbrennung mit starkem Luftüberschuß stattfindet. Etwas Kraftstoff ist bereits verbraucht, so dass das λ Werte zwischen 5.33 und 6.5 aufweist. Die Temperatur ist noch ziemlich homogen verteilt. In der Mitte des Brennraumes ist die Temperatur bei ca. 1100K, wohingegen im Feuersteg eine mittlere Temperatur von 1000 K zu beobachten ist. Es hat sich bereits etwas CO gebildet. In der Mitte des Brennraumes ist die CO-Konzentration höher, da die Verbrennung an dieser Stelle etwas fortgeschrittener ist. In der unteren Zeile von Abbildung 15 kann auch der Vergleich zwischen dem gerechneten und dem gemessenen Druckverlauf beobachtet werden. Die Übereinstimmung ist gut.

Abbildung 16 visualisiert den Zustand im Brennraum inneren im oberen Totpunkt. Die Verbrennung ist abgeschlossen. Aus diesem Grunde ist da λ im gesamten beobachteten Schnitt, praktisch unendlich. Der Kraftstoff ist praktisch auch schon verschwunden. Man kann jedoch beobachten, dass in den kalten Zonen am Brennraumrande etwas Kraftstoff unverbrannt bleibt. Sehr schön zu beobachten ist auch, dass die Zonen in Wandnähe kälter sind als diejenigen in der Brennraummitte. Unverbrannte Kohlenwasserstoffe sind folglich in diesen Randregionen zu erwarten.

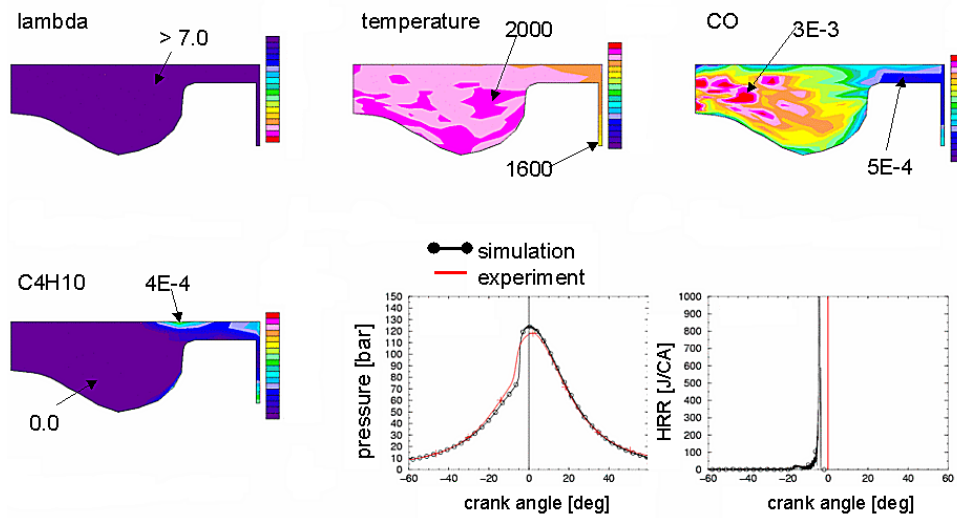


Abb. 16: 3d-Simulation homogener selbstzündender Brennverfahren mit n-Butan (Betriebspunkt-
daten: Drehzahl 1420 U/min, IMEP_{HP} = 4.02 bar, lambda = 5.13, Verdichtungsverhältnis = 17.2)

3d-Simulation inhomogener Verbrennung

Die gleiche Modellierung wie im obigen Abschnitt konnte auch für die inhomogene Verbrennung verwendet werden. Für die Berechnung der Gemischaufbereitung, wurden in diesem Fall die validierten Spraymodelle verwendet.

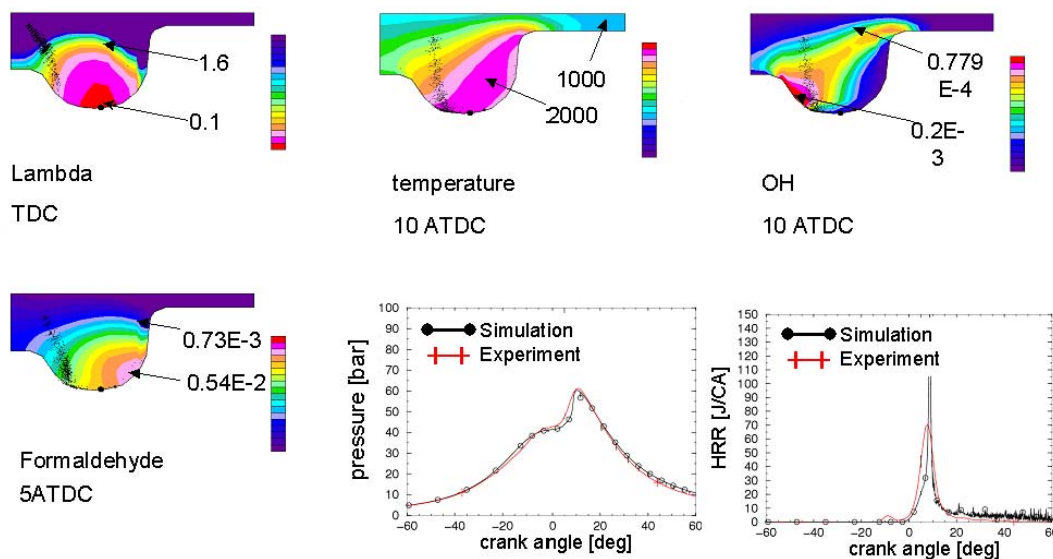


Abb. 17: 3d-Simulation inhomogener selbstzündender Brennverfahren mit n-Heptan (Betriebspunkt-
daten: Drehzahl 2000 U/min, AGR = 53 %, Einspritzdruck 1200 bar, Einspritzbeginn 20 v.OTP, Ver-
dichtungsverhältnis = 14.7)

Im unteren Bereich von Abbildung 17 sind die globalen Größen der Simulation mit denjenigen des Experimentes verglichen. Es ist ersichtlich, dass der berechnete Druckverlauf respektive Wärmefreisetzung eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Experiment aufweisen. Die erste Abbildung (oben links) zeigt den Gemischzustand kurz vor Brennbeginn an. Es ist ersichtlich, dass ein relativ grosser Bereich im Brennraum, ein Lambda unterhalb von 0.5 hat. Dies führte zur Russbildung an diesem

Betriebspunkt. Die zweite Abbildung in der oberen Zeile zeigt die höchste Temperatur im Brennraum. Diese liegen lokal in gewissen Brennraumzonen bei ca. 2000 K. Dies ist die NO_x-Bildungsgrenztemperatur. Die NO_x sind dennoch sehr tief. Es konnte auch festgestellt werden, daß Formaldehyd früher als OH auftritt.

Nationale Zusammenarbeit

Das Projekt hat keine Schnittstellen mit nationalen Instituten oder Industrie. An der ETH Zürich werden innerhalb vom Projekt mehrere Semester- und Diplomarbeiten durchgeführt.

Internationale Zusammenarbeit

Seit 1. März 2003 wird am Laboratorium für Aerothermochemie der ETH Zürich ein Teilprojekt des Forschungsvorhabens der deutschen Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) „homogene Dieselerverbrennung“ bearbeitet. Das Projekt endet am 1. März 2006. Neben rund 30 Industriepartnern aus der Motoren- und Zuliefererindustrie sind die Universität Stuttgart, die Technische Universität (TU) Braunschweig sowie die Hochschule für Technik und Wirtschaft (HWT) Dresden im Arbeitskreis involviert.

Der Beitrag der ETH Zürich soll ein fundiertes Verständnis für die Selbstzündung von diversen Kraftstoffen im homogenen sowie teilhomogenen Fall liefern. Neben der Simulation wurden Experimente in der Hochdruck-Hochtemperatur Zelle (HDTZ) sowie im Einhubtriebwerk der ETH Zürich durchgeführt.

Bewertung 2005 und Ausblick 2006 (Teil FVV)

Die weiteren, verbleibenden und unten genannten Arbeiten betreffen ausschliesslich den Teil des Projektes „Homogene Dieselerverbrennung“ der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV). Es darf darauf aufmerksam gemacht werden, dass nicht zuletzt wegen unserem Beitrag am Gesamtprojekt die Weiterführung und –finanzierung durch die FVV gesprochen wurde. Der Projektbeginn wird voraussichtlich im Jahr 2007 sein.

Das Projekt „Erarbeitung von Grundlagen für innovative Brennverfahren und motorische Arbeitsprozesse“ hat auf dem Gebiet der Simulation zur Erstellung von chemischen, reduzierten Reaktionsmechanismen von stochastischen Mehrzonenmodellen und zur Kopplung der reduzierten Chemie mit dreidimensionalen-reaktiven-fluid-mechanischen Simulation geführt. Diese Modelle ermöglichen die Einsicht in den Brennraum, um Verbrennungsphänomene verstehen zu können. Die verwendeten Reaktionsmechanismen repräsentieren die Chemie zweier Kraftstoffe. Der erste, n-Heptan, hat dieselähnliche Zünd- und Verbrennungseigenschaften. Der zweite, n-Butan, hat Zünd- und Verbrennungseigenschaften zwischen Benzin und Diesel. Dies ermöglicht das Explorieren von technischen Möglichkeiten mit alternativen Kraftstoffen. Die reduzierte Chemie wurde anhand von detaillierten Reaktionsmechanismen validiert und zeigte trotz ihrer Vereinfachung eine sehr gute Übereinstimmung. Die Modelle für die motorische Verbrennung wurden mit Messungen von der Universität Stuttgart und der Fachhochschule Dresden validiert und zeigten ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung.

Die gesteckten Ziele konnten erreicht und gar übertroffen werden. Modellierungsansätze können jedoch immer weiter verbessert werden, sodass kein Stillstand zu erwarten ist. Dennoch zeigen und übertreffen die gezeigten Ansätze den „Stand der Technik“ und können als sehr gute Basis für eine weitere Arbeit verwendet werden.

Parallel zu den numerischen Arbeiten wurden erfolgreich experimentelle Untersuchungen am Einhubtriebwerk durchgeführt. Nach aufwändigen Modifikationen im Q1 und Q2 2005 konnte mit dem Einhubtriebwerk, welches seit August 2004 am Institut im Einsatz steht, ein Prüfstand realisiert werden, um unter definierten Bedingungen von T , p und λ sowie qualitativ abhängig vom Homogenisierungsgrad, Zündzeitpunkte sowie Zündorte bestimmt werden. Im Berichtsjahr wurden zahlreiche Versuche mit n -Butan, n -Heptan und Dieselmotorkraftstoff durchgeführt. Messungen mit n -Heptan (dieselähnlich) zeigten einen Beginn der Wärmeumsetzung unabhängig vom Verbrennungsluftverhältnis. Allerdings spielt die Homogenisierungsgrad, resp. der Einspritzzeitpunkt eine entscheidende Rolle. Der direkte Vergleich von Messungen mit konventionellem Dieselmotorkraftstoff und n -Heptan zeigten, dass der Zustand im Brennraum bei Beginn der Wärmeumsetzung praktisch identisch ist. Die unterschiedlichen Verdampfungseigenschaften führen zu einem tieferen Umsetzungsgrad bei Dieselmotorkraftstoff. Bei Experimenten mit n -Butan (benzinähnlich) zeigte sich eine starke Abhängigkeit von den Initialparametern (p und T im Brennraum). Nur in einem gewissen Betriebsbereich sind Tief- und Hochtemperaturreaktionen nachweisbar. Mittels der schnellen CMOS High-Speed Kamera konnten Aufnahmen der OH- und CH- Chemilumineszenz realisiert werden.

Neben weiterführenden Messungen mit n -Butan und n -Heptan sowie Vergleichsmessungen mit Dieselmotorkraftstoff sind Messungen mit Abgasrückführung geplant. Der Massenstrom des EHT reicht für den Betrieb allerdings nicht aus. Somit wurde ein Konzept zur Simulation von AGR aus CO_2 , N_2 und O_2 entwickelt, erste Messungen sind noch in diesem Jahr geplant.

Weitere Messungen betreffen die gezielte Beeinflussung der Homogenität durch eine kombinierte Einspritzung von gas- und flüssigen Kraftstoffen. Ebenso ist eine Modifikation des Zylinderkopfes denkbar für die Einbringung von thermischen Abweichungen von der perfekten Homogenisierung.

Referenzen

- [1] G. Barroso, A. Escher, K. Boulouchos, SAE Naples Section, ICE 2005, 7th International Conference on Engines for Automobiles, Capri (Italy), September 2005, Paper 87, "Experimental and Numerical Investigations on HCCI-Combustion"
- [2] G. Barroso, D. Dietschweiler, M. Warth, K. Boulouchos, 1. Tagung: Motorprozesssimulation und Aufladung, Berlin (Germany), 30. Juni / 1. Juli 2005, "Simulation der Zündung und Energieumsetzung in Motoren mit HCCI-Brennverfahren mit Reaktor-netzwerke"
- [3] G. Barroso, B. Schneider, K. Boulouchos, SAE Powertrain and Fluid Systems Conference and Exhibition, Pittsburgh (USA), October 2003: Paper 2003-01-3230 "An Extensive Parametric Study on Diesel Sprays Simulation and Verification with Experimental Data"
- [4] Eisen S., Ofner B., „**Schnelle Kompressionsmaschine – eine Alternative zum Transparentmotor?**“, Forschung Kompressionsmaschine, MTZ 9/2001, Seite 62 ff
- [5] Escher A., Barroso G., Boulouchos K., „**5. FVV Arbeitskreissitzung des Vorhabens HDV**“, 9. / 10. März 2005, Dresden
- [6] Thurnheer Th., Studentenarbeit LAV ETH Zürich, „**konstruktive Modifikationen am Einhubtriebwerk**“, Sommersemester 2005
- [7] Boulouchos, K., Margari, O., Escher, A., Barroso, G., Schneider, B., Kunte, S.: „**Optical Diagnostic on Diesel Sprays for the Validation of Computer Aided Simulation**“, Proceedings, 6. Internationales Symposium für Verbrennungsdagnostik, Baden-Baden, 2004
- [8] Ilda N. et al, „**Auto-ignition and combustion of n -Butane and DME mixtures in a HCCI engine**“, SAE 2000-01-1832