



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Abschlussbericht über US Aufenthalt zur Anfertigung einer Diplomarbeit

von

Johannes Pitzl

Matrikelnummer: e0325586

Unterdörfel 8

3241 Kirnberg an der Mank

joh.pitzl@gmail.com

Kirnberg, September 2010

Danksagung

Ich möchte hiermit meine Dankbarkeit gegenüber all jenen ausdrücken, die mir die Möglichkeit und Unterstützung gegeben haben meine Diplomarbeit an der University of California, San Diego anzufertigen.

Ein sehr herzlicher Dank gilt Herrn ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Ernst Pucher, meinem Betreuer an der Technischen Universität Wien, der mich ermutigt hat meine Diplomarbeit im Ausland anzufertigen. Seine ständigen Bemühungen Studenten mit seinen internationalen Beziehungen zu unterstützen machten diese Gelegenheit für mich möglich.

Des Weiteren bin ich dankbar für meinen Betreuer an der University of California in San Diego Professor Dr. Kalyanasundaram Seshadri, der mich nach San Diego eingeladen hat und mich während meines Aufenthalts in den USA mit seinem akademischen Wissen als auch im täglichen Leben unterstützt und gefördert hat.

Ein ganz spezieller Dank gilt der Austrian Marshall Plan Foundation, die mir mit dem bewilligten Stipendium finanziell kräftig unter die Arme gegriffen hat. Dieses Stipendium machte den Aufenthalt unter anderem so angenehm wie er war.

Zum Schluss möchte ich noch meine Familie danken, die mich während meines Aufenthalts immer wieder mit Gesprächen unterstützt und mit Neuigkeiten von Zuhause versorgt hat.

Inhalt

Inhalt.....	3
1. Motivation.....	4
2. Gaststadt – San Diego.....	6
3. Gastuniversität – UCSD.....	7
4. Beschreibung des Aufenthalts.....	8
5. Kurzfassung der Diplomarbeit.....	11
6. Versuchsablauf und Forschungsergebnisse.....	13
6.1. Nicht-vorgemischte Flammen.....	13
6.2. Versuchsaufbau – Coflow Burner.....	15
6.3. Forschungsergebnisse.....	20
6.3.1. Definition der Flammen und Lift-Off Höhe.....	20
6.3.2. Verwendete Kraftstoffe.....	21
6.3.3. Flammenhöhe.....	22
6.3.4. Flammen Lift-Off Höhe.....	24
6.3.5. Flammenhöhe während des Lift-Offs.....	26
6.3.6. Berechnung nach Burke-Schumann.....	28
6.3.7. Flammenhöhen und Lift-Off in Bildern.....	30
7. Fazit.....	32
8. Gruppenfotos.....	33

1. Motivation

Ich bin seit Wintersemester 2003 Maschinenbaustudent an der TU Wien und hatte nun die Möglichkeit meine Diplomarbeit im Bereich der Grundlagenforschung für Verbrennung an der University of California in San Diego, USA zu schreiben.

Nach dem Abschluss der Pflichtschule habe ich 1993 eine KFZ-Mechanikerlehre begonnen und bis Anfang 2003 war ich auch in diesem Beruf tätig. Es entstand aber in mir der Drang nach detaillierterem Wissen bezüglich der Technik, also besuchte ich von 1999 bis 2003 die Abendschule der HTBL&VA St.Pölten mit dem Ausbildungsschwerpunkt Maschinenbau – Automatisierungstechnik. Nach erlangter Hochschulreife war mein Wissensdurst aber noch nicht gestillt, deshalb begann ich im Wintersemester 2003 mit dem Maschinenbaustudium an der TU Wien. Als Schwerpunkt wählte ich im Jahr 2007 Kraftfahrzeugtechnik mit den Bereichen Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugdynamik.

Da ich über die Jahre auch eine Begeisterung für den Motorsport entwickelte, hat mir das Projekt "Formula Student" an der TU Wien von Anfang an sehr gut gefallen. Bei diesem Projekt ging es darum neben dem Studium, also in der Freizeit, ein Rennauto zu planen und nach dem Bau damit an Wettbewerben teilzunehmen, um sich mit anderen Universitäten zu messen. Ich war aktives Mitglied des TUW Racing Teams von der Geburtsstunde im Jänner 2007 bis Oktober 2008 und hatte dabei die Funktion des Teamleiters vom Modul Motor inne. Der Schwerpunkt meiner Arbeit war es einen serienmäßigen Motorradmotor an das Reglement der "Formula Student" anzupassen und dabei dem Motor ausreichend Leistung für das Rennauto zu entlocken. Diese Aufgabe erforderte eine Vielzahl an selbst konstruierten und gefertigten Bauteilen sowie etliche Wochen am Motorenprüfstand zur Anpassung der Motorsteuerung.

Nach dem Projekt "Formula Student" entschied ich mich das Sommersemester 2009 in Norwegen an der NTNU Trondheim zu verbringen, um Auslandserfahrung zu sammeln. An der NTNU beschäftigte ich mich während meines Aufenthalts mit dem dynamischen Verhalten von Schiffen und Plattformen im Meer sowie mit großvolumigen Dieselmotoren, Pumpen und Turbinen. Die Vorlesungen und Prüfungen wurden allesamt in englischer Sprache abgehalten.

Nach meiner Rückkehr aus Norwegen begann ich im September meine letzte Projektarbeit an der TU Wien im Bereich Fahrzeugdynamik und legte die Prüfung Anfang Jänner 2010 erfolgreich ab. Mit dem Wissen alle erforderlichen Prüfungen für den Abschluss des Maschinenbaustudiums erledigt zu haben, begab ich mich am 14. Jänner 2010 auf die Reise nach San Diego.

Die Zusage von Professor Dr. Kalyanasundaram Seshadri von der University of California, San Diego, kurz UCSD, meine Diplomarbeit in seinem Team schreiben zu dürfen motivierte mich ungemein und macht mich nach wie vor sehr stolz. Durch diese Diplomarbeit erhoffe ich mir für meine berufliche Zukunft, im Bereich Forschung und Entwicklung von Verbrennungsmotoren, sehr viele Vorteile.

Das Thema Krafftfahrzeug und im Besonderen der Verbrennungsmotor zieht sich wie ein roter Faden durch meine Ausbildung und ich möchte noch so vieles mehr darüber erfahren und lernen.

Meine Aufgabe an der UCSD bestand darin bei der Grundlagenforschung von Verbrennungsvorgängen von laminaren nicht-vorgemischten Flammen dem Team um Professor Dr. Kalyanasundaram Seshadri unterstützend zur Seite zu stehen. Das Ziel der Diplomarbeit war es, das Verhalten von Kerosinkraftstoffen und Ersatzkraftstoffen (Surrogates) bei der Verbrennung in einem Coaxial Flow Burner zu betrachten und die erhobenen Daten auszuwerten. Gegen Ende der Arbeit wurde mit Hilfe der von Burke und Schumann entwickelten Gleichungen der Trend der experimentell erfassten Flammenhöhen bestätigt. Während meines gesamten Aufenthalts an der UCSD stand mir die Ausstattung des Verbrennungslabors, experimenteller Aufbau, Software und Messgeräte zur Verfügung. Die Dauer der Diplomarbeit betrug 5 Monate von 18. Jänner bis 18. Juni 2010. Meine Rückreise war am 12. Juli 2010 kurz vor Ablauf der 30 Tage Nachbereitungszeit.

Es macht mich stolz, dass ich für das Joint Research Programm an der UCSD ausgewählt wurde und mit Herrn Professor Dr. Kalyanasundaram Seshadri stand mir ein ausgezeichnete(r) Betreuer mit einem hervorragend ausgestatteten Verbrennungslabor zur Seite. Auch von seinem Laborteam konnte ich vieles erfahren und erlernen.

Die Verteidigung meiner Diplomarbeit wird voraussichtlich im Oktober 2010 an der TU Wien stattfinden und den Abschluss meines Maschinenbaustudiums darstellen.

2. Gaststadt – San Diego

San Diego ist die zweit größte Stadt im US-Bundesstaat Kalifornien und die achtgrößte der Vereinigten Staaten von Amerika. Die Stadt hat rund 1,36 Millionen Einwohner und liegt im Südwesten von Kalifornien nahe der Grenze zu Mexiko. Wegen des angenehmen Klimas wird San Diego von seinen Bewohnern gern als „America’s Finest City“ bezeichnet. Die Strände am Pazifik erfreuen sich bei Surfern großer Beliebtheit.

Die Stadt wurde in den letzten Jahren zu einem der bedeutendsten Zentren der Telekommunikationsindustrie, dank der von Dr. Irvin Jacobs 1985 gegründeten Firma, und der Biotechindustrie. Auch erneuerbare Energien schaffen hier immer mehr Arbeitsplätze. Des Weiteren sind in San Diego mehrere Schiffswerften beheimatet.

In San Diego ist auch den Heimathafen der US Flugzeugträger USS Nimitz und USS Ronald Reagan.



Abbildung 1: San Diego Down Town

3. Gastuniversität – UCSD

Die University of California, San Diego wurde 1960 gegründet und ist einer der versiertesten Forschungsuniversitäten der USA. Der Name UCSD ist weithin anerkannt für die lokale Bedeutung, den nationalen Einfluss und die globale Forschung. Der Campus liegt neben dem Pazifischen Ozean an der US – Mexikanischen Grenze. Die UC San Diego ist für die gemeinschaftliche, verschiedenartige und fächerübergreifende Gesinnung, welche die traditionellen Grenzen in den Naturwissenschaften, Künsten und Geisteswissenschaften überschreitet, bekannt. Die Universität ist weitgehend dezentral organisiert und in sechs Colleges unterteilt. Im Herbstsemester 2009 waren insgesamt 28.200 Studenten eingeschrieben und über 1.400 Wissenschaftler beschäftigt.



Abbildung 2: Mechanical Engineering Building II am Campus der UCSD.

Abbildung 2 zeigt das Mechanical Engineering Building II in dessen Untergeschoß sich das Verbrennungslabor von Professor Dr. Seshadri befindet.

4. Beschreibung des Aufenthalts

Nach meiner Rückkehr aus dem Erasmus-Semester in Trondheim, Norwegen, im Sommer 2009 habe ich beschlossen meine Diplomarbeit, falls sich Möglichkeiten ergeben, ebenfalls im Ausland zu absolvieren. Bei der Umsetzung meines Vorhabens sind mir die Unterstützung und die sehr guten Kontakte von Herrn ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Ernst Pucher sehr behilflich gewesen. Nach erfolgreicher Bewerbung um eine Diplomarbeit bei Professor Dr. Kalyanasundaram Seshadri begann die Vorbereitungsphase für meinen Aufenthalt in den USA. Das Einholen aller benötigten Dokumente, Visumsansuchen, Abschließen einer Auslandskrankenversicherung sind nur wenige der Punkte die zu erledigen waren.

Die Vorbereitungen starteten Anfang September 2009 und endeten mit der Genehmigung des US-Studentenvisums (J1-Status) am 28.Dezember 2009 durch die US Botschaft in Wien.

Nach einem letzten Gespräch mit meinem Betreuer an der TU Wien Herrn ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Ernst Pucher ging die Reise am 18. Jänner 2010 nach San Diego los. Dort angekommen nahm ich mit meinem Betreuer an der UCSD Herrn Professor Dr. Kalyanasundaram Seshadri Kontakt auf und wurde auch gleich mit meinen Laborkollegen bekanntgemacht, Herrn Ulrich Niemann und Herrn Tei Newman-Lehman. Es wurde mir mein Arbeitsplatz im Labor gezeigt und mir eine Führung durch das Labor und die Büroräume gegeben. Die ersten beiden Wochen dienten der Organisation von Universitäts- und Privatleben. Eine verpflichtende Orientierung (Rechte und Pflichten des J1-Visumsbesitzers) für alle neuen Wissenschaftler wird jeden Mittwoch an der UCSD abgehalten und es werden dabei zusätzlich eine Menge nützlicher Hinweise für das Leben rund um die Universität gegeben.

Nach erfolgreicher Apartment- und Autosuche begann meine Arbeit Anfang Februar 2010 im Verbrennungslabor. Zu Beginn wurde ich mit dem Versuchsaufbauten und dem Ablauf im Labor vertraut gemacht. In den ersten Wochen unterstützte Herrn Tei Newman-Lehman bei den Versuchen am Co-Flow-Burner und erlernte so den Umgang mit diesem Experiment.

Der Co-Flow-Burner ist eine Vorrichtung in der laminare nicht-vorgemischte Flammen aus Kraftstoffen erzeugt werden. Die Besonderheit dieser Anlage ist, dass sie für flüssige Kraftstoffe, wie Kerosin, Diesel, Benzin, Alkohole oder Bio-Kraftstoffe, konzipiert wurde und eine von wenigen Anlagen dieser Art darstellt. Der Kraftstoff trifft erst am Ende der Düse im Brennraum auf Sauerstoff (Luft) dabei bildet sich eine laminare nicht-vorgemischte Flamme aus. Da es für flüssige Kraftstoffe noch nicht so viele Daten von solchen Flammen gibt, wurden zu Beginn der Arbeit die Flammenhöhen von Kerosinkraftstoffen und Ersatzkraftstoffen bei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten des Kraftstoffs mittels Digitalfotographie ermittelt. Bei den Kraftstoffen handelte es sich um Düsenkraftstoffe genauer gesagt um Jet-Propellant 8, kurz JP-8, Fischer-Tropsch Shell GTL und Fischer-Tropsch IPK Sasol. JP-8 wird von Erdöl gewonnen, Fischer-Tropsch Shell GTL wird von der Firma Shell mittels Fischer-Tropsch Synthese aus Erdgas hergestellt und Fischer-Tropsch IPK Sasol wird von der Firma Sasol in Südafrika durch Fischer-Tropsch Synthese aus Kohle hergestellt. Die Ersatzkraftstoffe, auch genannt Surrogates, sind Kraftstoffe mit einigen wenigen verschiedenen Kohlenwasserstoffkomponenten und sollen Verbrennungseigenschaften der realen Kraftstoffe so gut als möglich abbilden. Diese Surrogates dienen der Vereinfachung von Rechenmodellen und somit der Verkürzung von Rechenzeiten bei Computersimulation von Verbrennungen.

Ziel der Diplomarbeit war es die Flammenhöhen der drei Kerosinkraftstoffe und von fünf Surrogates bei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten des Kraftstoffes zu dokumentieren. Gestartet wurde bei einer niedrigen Strömungsgeschwindigkeit bis die Geschwindigkeit für den Lift-Off der Flamme erreicht wurde. Im Zuge dieses Experiments ist mir aufgefallen, dass es nach dem Lift-Off der Flamme eine Hysterese für die Rückkehr der Flamme zur Düse gibt. Der Lift-Off war nicht nur von der Strömungsgeschwindigkeit des Kraftstoffs abhängig sondern auch vom Mischungsverhältnis Kraftstoff und Transportgas (Stickstoff). Lift-Off wurde auch beobachtet bei magerem Mischungsverhältnis bei konstanter Strömungsgeschwindigkeit des Kraftstoffgemisches. Auch hier gibt es einen Hysterese Effekt zu beobachten. Zum Abschluss der Arbeit wurde noch eine Berechnung nach Burke und Schumann durchgeführt. Dabei konnte gezeigt werden, dass die berechnete Flammenhöhe dem Trend der Flammenhöhe, ermittelt während des ersten Teils der Diplomarbeit, folgt. Die ermittelten Daten können nun

weiterverwendet werden, um Computersimulationen weiter zu entwickeln und somit den Verbrennungsvorgang besser zu verstehen. Des Weiteren wird bei der US Air Force eine Datenbank für flüssige Kraftstoffe angelegt und diese Versuche stellen den ersten Abschnitt dieser Datenbank dar.

Ein weiterer Schritt zur Erweiterung der Datenbank wird sein, mittels Gaschromatographie die Komponenten in der Flamme beim Verbrennungsvorgang festzustellen. Wie schon oben erwähnt befindet sich diese Datenbank erst im Aufbau und es wird noch einige Zeit vergehen bis sie fertiggestellt ist.

Während meines Aufenthalts wurde auch ein Seminar, organisiert von Herrn ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Ernst Pucher, an der UCSD abgehalten, wo ich die Gelegenheit hatte meine ersten Versuchsergebnisse zu präsentieren. Des Weiteren wurde eine Exkursion zu GM in Los Angeles durchgeführt, wo wir mit dem Chevy Equinox Fuel Cell SUV einige Meilen am Highway zurücklegen durften.

Um nicht nur geistig etwas für mich und meinem Körper zu tun beschloss nach meiner Ankunft in San Diego mich für den San Diego Rock 'n' Roll ½-Marathon Anfang Juni 2010 anzumelden und mit einer Zeit von 1:32:26 war ich sehr zufrieden mit meiner läuferischen Leistung.

Abschließend kann ich noch sagen, dass ich die Zeit in San Diego sehr genossen habe und die Menschen sehr freundlich und hilfsbereit waren. Meine Englischkenntnisse haben sich in diesen sechs Monaten sehr verbessert und ich habe ungemein an Erfahrung gewonnen. Die Diplomarbeit habe ich in Englisch verfasst und die Verteidigung der Diplomarbeit wird Anfang Oktober 2010 stattfinden. Ich möchte mich auch nochmals für die Betreuung bei der Vorbereitung und während meines Aufenthalts in den USA bei meinen beiden Betreuern bedanken sowie für die finanzielle Unterstützung bei der Austrian Marshall Plan Foundation.

5. Kurzfassung der Diplomarbeit

Die steigenden Kosten für Flugzeugtreibstoff und die Erhöhung der Abhängigkeit von ausländischem Erdöl hat das Interesse der U.S. Air Force an alternativen Kraftstoffen erneut geweckt. Das ehrgeizige Ziel ist es fünfzig Prozent des kontinentalen U.S. Air Force Treibstoffbedarfs durch inländische Quellen bis 2016 zu decken. Diese erneute Aufmerksamkeit für alternative Düsenkraftstoffe hat die Notwendigkeit für ein verbessertes Verständnis der Verbrennung von flüssigen Kohlenwasserstoffen aufgezeigt. Es besteht ein Mangel an Daten von kontrollierten Verbrennungen von flüssigen Kraftstoffen in Laborumgebung, wie es zum Beispiel die Diffusionsflamme im Coflow Burner Experiment darstellt. Um die Lücke fehlender Daten zu schließen arbeitet die U.S. Air Force mit Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulationen mit chemischen Modellen und die University of California in San Diego (UCSD) stellt die experimentellen Daten von den Co-flow Diffusionsflammen zur Verfügung. Düsenkraftstoff 8 (Jet Propellant 8, JP-8) aus Rohöl ist ein Gemisch von Hunderten von Kohlenwasserstoffverbindungen und das verursacht eine enorme Vielfalt an unterschiedlichen Reaktionen während des Brennvorgangs. Computersimulationen für diese Art von Brennstoffe sind, aufgrund der Menge der Reaktionen bei der Verbrennung, mit langen Rechenzeiten verbunden. Daher werden Mischungen aus einigen wenigen Kohlenwasserstoffkomponenten entwickelt. Deren relative Konzentrationen kann so eingestellt werden, dass ihre physikalischen Eigenschaften und ihre Verbrennungseigenschaften die der kommerziellen Kraftstoffe abbilden. Diese Mischungen werden Ersatzkraftstoffe (Surrogates) genannt.

In der vom mir verfassten Diplomarbeit wurden JP-8, Fischer-Tropsch (FT) Shell GTL und FT IPK Sasol Diffusionsflammen mit den Flammen von Aachen Surrogate, JP-8 Surrogate C, SERDP Surrogate, Modified SERDP Surrogate und Gasoline Surrogate C verglichen. Die Experimente wurden mit Hilfe des UCSD Coflow Burner Experiments, indem eine Diffusionsflamme umgeben von einem koaxialen Luftstrom erzeugt wird, durchgeführt. Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit lag darin, bestehende Surrogates für Kerosin Kraftstoffe für die Tauglichkeit bei Diffusionsflammen, speziell für die Flammenhöhe bei konstantem Kraftstoffmassenanteil und veränderlicher Kraftstoffaustrittsgeschwindigkeit, zu bewerten. Flammen Lift-Off Höhen für konstante Kraftstoffaustrittsgeschwindigkeit als Funktion vom veränderlichen Kraftstoffmassenanteil bilden den zweiten Teil dieser Arbeit. Diese experimentelle

Studie zeigt, dass das Aachen Surrogate die Flammenhöhe als Funktion der Kraftstoffaustrittsgeschwindigkeit für FT Shell GTL und FT IPK Sasol sehr gut wieder gibt und dass das Aachen Surrogate mit der Flammen Lift-Off Höhe als Funktion des Kraftstoffmassenanteils für JP-8 korreliert. Für die Flammenhöhen während des Flammen Lift-Off Experiments wurde nur einen Trend zwischen JP-8, Aachen Surrogate und JP-8 Surrogate C gefunden. Das Diffusionsflammenproblem behandelt von Burke und Schumann stellt den numerischen Teil der Arbeit dar und wurde verwendet, um die experimentellen Daten zu evaluieren. Die Arbeit konnte zeigen, dass der Trend der Berechnung den Trend des Flammenhöhenexperiments widerspiegelt.

6. Versuchsablauf und Forschungsergebnisse

6.1. Nicht-vorgemischte Flammen

Bei nicht-vorgemischten Flammen findet die Mischung von Oxidationsmittel und Kraftstoff durch Diffusion statt. Die Verbrennung ist in diesem Fall limitiert durch die Diffusionsgeschwindigkeit, das heißt der Mischungsvorgang von Luft und Kraftstoff kontrolliert die Verbrennungsgeschwindigkeit. Die meisten üblichen Systeme fallen in diese Kategorie, wo Oxidationsmittel und Kraftstoff in der Reaktionszone durch molekulare und turbulente Diffusion zusammenkommen. Der Kraftstoffstrom kann dabei fest, flüssig oder gasförmig sein. Die markante Charakteristik einer nicht-vorgemischten Flamme ist eben, dass die Verbrennungsgeschwindigkeit bestimmt wird durch die Geschwindigkeit in der Kraftstoff und, in Fall dieser Arbeit, Luft ein stöchiometrisches Mischungsverhältnis erreichen.

Nicht-vorgemischte Flammen haben eine niedrigere Verbrennungsgeschwindigkeit als vorgemischte Flammen, da die Verbrennungsgeschwindigkeit bei vorgemischten Flammen von der chemischen Reaktionsgeschwindigkeit abhängt und diese schneller abläuft als die Diffusion. Auch produzieren nicht-vorgemischte Flammen mehr Ruß, da sich nicht genügend Oxidationsmittel in der Flamme befindet um die Verbrennung vollständig abzuschließen. Die Bereiche einer laminaren nicht-vorgemischten Flamme sind in Abbildung 3 zu sehen.

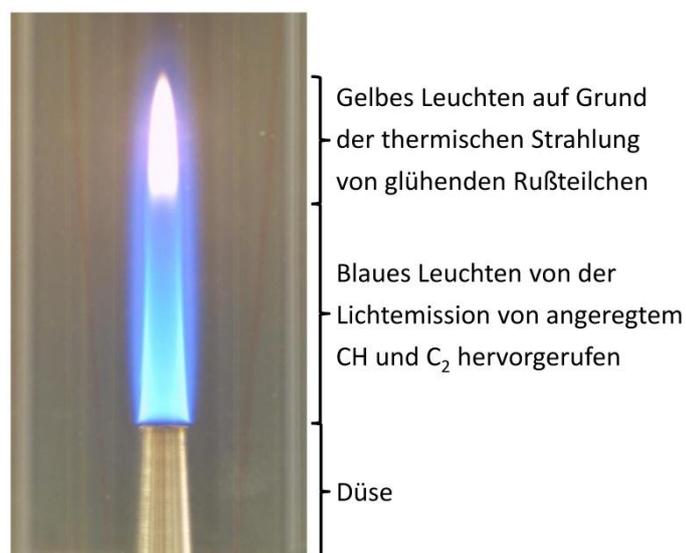


Abbildung 3: Bereiche einer laminaren nicht-vorgemischten Flamme

Die Flammenform einer laminaren nicht-vorgemischten Flamme in einem seitlich abgeschlossenen Zylinder hängt von der Menge an Kraftstoff und Oxidationsmittel ab, d.h. bei vorhandenem Kraftstoff von der Quantität des Oxidationsmittels, ab. Ist ein Überschuss an Oxidationsmittel vorhanden bildet sich eine längliche und geschlossene Flamme (Overventilated Flame) aus. Dies passiert, wenn ein Kraftstoffstrahl in z.B. großen Volumen von Umgebungsluft entzündend wird oder wenn zwei achsgleiche Strömungen, wie in dieser Arbeit, benutzt werden. Wird nun die Oxidationsmittelzufuhr unter die, für das stöchiometrische Verhältnis, benötigte Menge reduziert bildet sich eine fächerförmige Flamme (Underventilated Flame) aus. Abbildung 4 zeigt die zwei Flammenformen von laminaren nicht-vorgemischten Flammen hier ist y_F die Flammenhöhe, r_s der Radius des Zylinders und r_j der Radius der Düse.

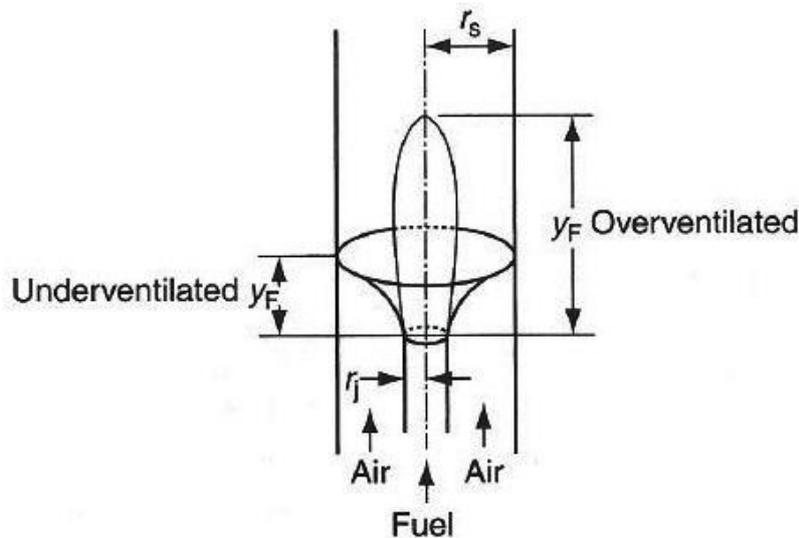


Abbildung 4: Flammenformen von laminaren nicht-vorgemischten Flammen

Bei laminaren nicht-vorgemischten Flammen variiert das Mischungsverhältnis von Kraftstoff und Oxidationsmittel im horizontalen Bereich der Flamme sehr stark. An der Oxidationsmittelseite herrscht Lambda (Luftzahl) unendlich ($\lambda = \infty$) und in der Mitte der Flamme ist Lambda gleich null ($\lambda = 0$). Die eigentliche Umsetzung findet in einer sehr engen Zone, welche der Flamme ihre Form gibt statt. Hottel und Hawthorne (1949) haben den Verlauf der Konzentrationen der Stoffe durch eine laminare nicht-vorgemischte H_2 -Flamme in einer fixen Höhe gemessen (siehe Abbildung 5).

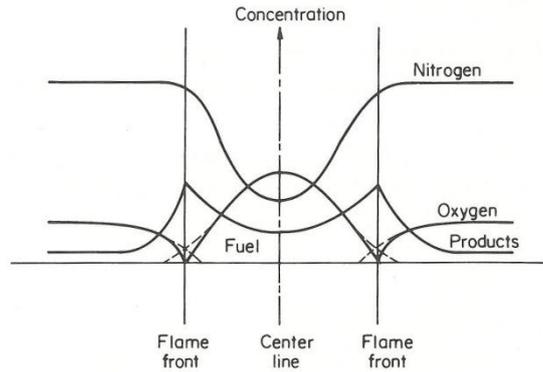


Abbildung 5: Konzentrationsverlauf durch eine laminare nicht-vorgemischte Flamme in einer fixen Höhe über der Kraftstoffdüse

6.2. Versuchsaufbau – Coflow Burner

Eine stabile achssymmetrische Flamme wird von einem Aufbau erzeugt, welcher hier als Coflow Burner bezeichnet wird. Zum Brenneraufbau werden Luft und Kraftstoff durch ein Netzwerk von geheizten Leitungen geleitet wo eine Serie von separaten Gittern die beiden Strömungen ausrichten bevor sie am Ende der aus Edelstahl bestehenden Kraftstoffaustrittsdüse aufeinandertreffen. Es gibt noch einige Teilsysteme die hier wie folgt bezeichnet werden, Verdampfer-, Gas Handling-, Heizungs-, Temperaturkontroll-, Durchflusskontroll- und Abgasabsaugungssystem.

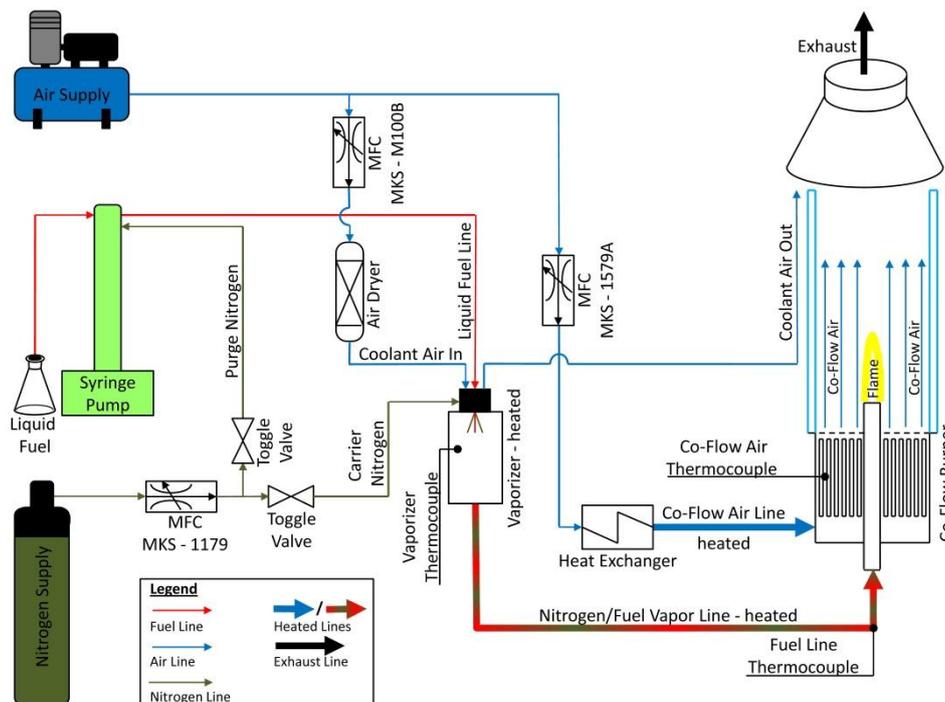


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus. Die Abbildung zeigt den Coflow Burner, den Verdampfer und das Luft-, Kraftstoff- und Stickstoffversorgungssystem

Abbildung 6 zeigt schematisch den Versuchsaufbau mit dem Coflow Burner, dem Verdampfer und dem Luft-, Kraftstoff- und Stickstoffversorgungssystem. Die einzelnen Teilsysteme werden weiter unten im Text noch genauer behandelt.

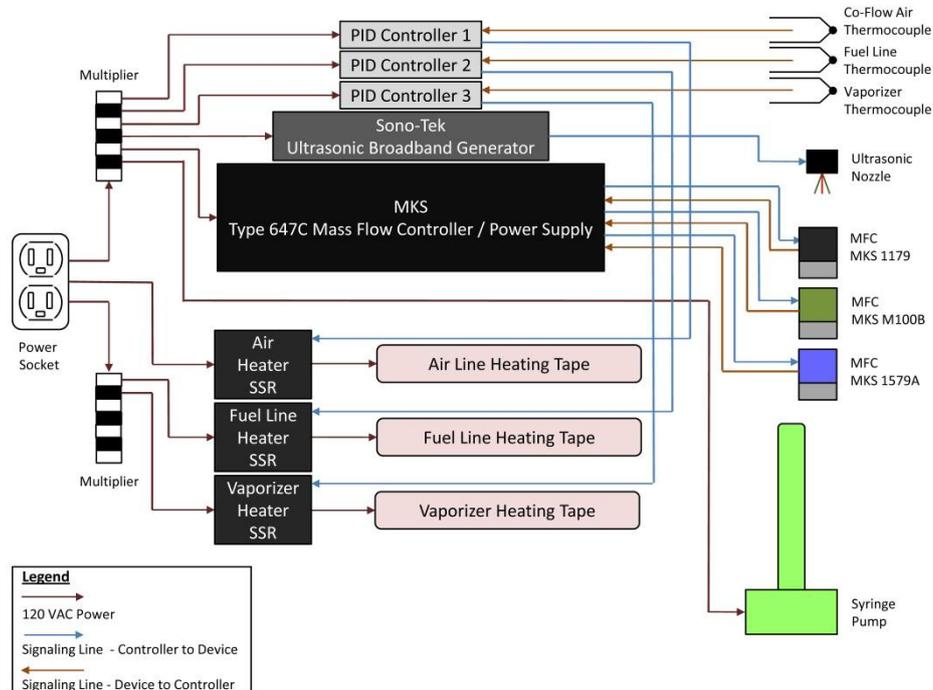


Abbildung 7: Schematisch Darstellung des Kontroll- und Messaufbaus und der Verkabelung des Versuchsaufbaus

Abbildung 7 zeigt schematisch den Kontroll- und Messaufbau der Versuchsanlage. Es sind hier PID Regler, Halbleiterrelais, K-Type Temperaturelemente, Heizbänder, Durchflussregler, eine Dosierpumpe, eine Ultraschalldüse mit einem Ultraschallgenerator und der Kontrolleinheit für die Durchflussregler.

Abbildung 8 bis Abbildung 11 zeigen den realen Versuchsaufbau Coflow Burner im Verbrennungslabor der UCSD.

Der Coflow Burner (Abbildung 8-5) ist das Herzstück der Versuchsanlage. Hier kommt die Mischung aus Kraftstoff und Stickstoff in Kontakt mit der koaxial strömenden Luft. Der Coflow Burner besteht seinerseits aus etlichen Einzelbauteilen, wie der Bodenplatte, dem Luftdiffusor, dem Glaszylinderhalter mit Adapter, dem Glaszylinder (Abbildung 8-3) und der zentral angeordneten Kraftstoffaustrittsdüse (Abbildung 8-4).

Die Luftversorgung (Abbildung 8-1) kommt vom hauseigenen Kompressor und wird aufgeteilt in Ultraschalldüsen-Kühlluft (Abbildung 8-9) und Luft, die zum Coflow Burner geleitet wird.

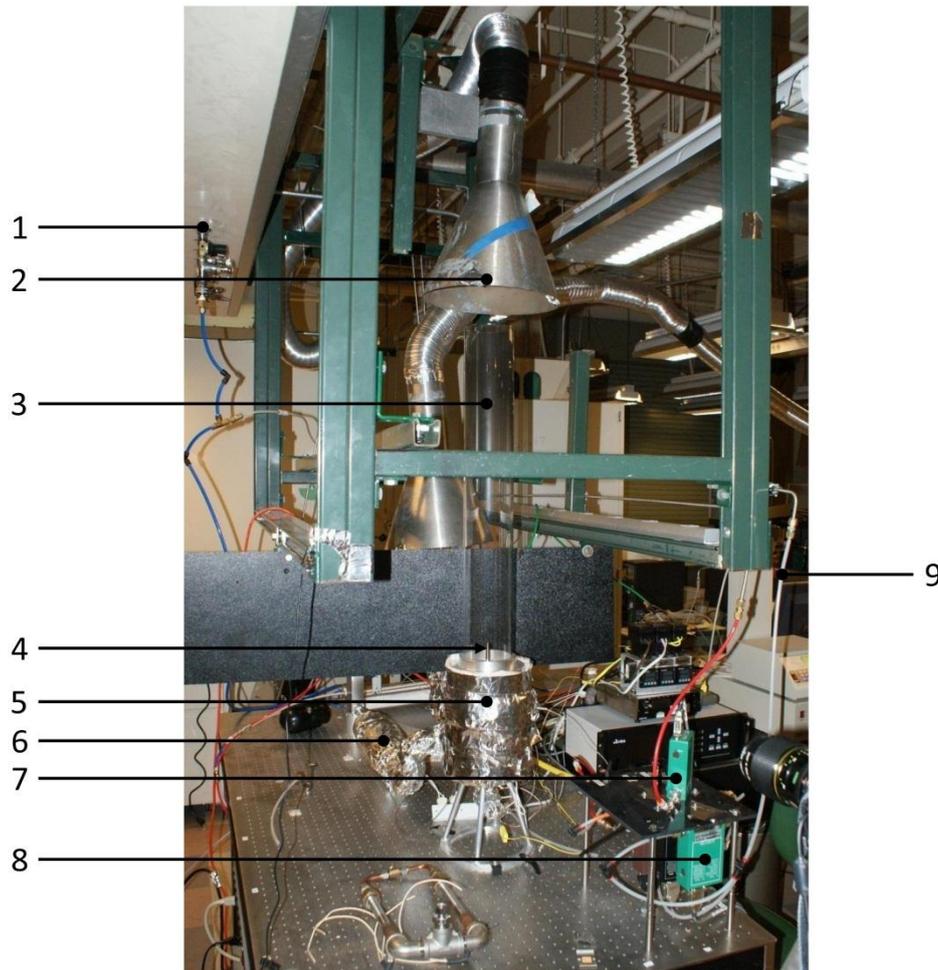


Abbildung 8: Versuchsaufbau Coflow Burner: 1, Luftversorgung; 2, Abgasabsaugung; 3, Pyrex-Glaszylinder; 4, Kraftstoffaustrittsdüse; 5, Coflow Burner; 6, Gebauter Luftherhitzer; 7, Stickstoff Durchflussregler; 8, Kühlluft Durchflussregler; 9, Kühlluft Versorgungsleitung.

Die Kühlluft wird von einem Durchflussregler (Abbildung 8-8) geregelt und von einem Lufttrockner (Abbildung 10-19) entfeuchtet. Danach geht es weiter zur Ultraschalldüse (Abbildung 10-20) zum Kühllufteinlass (Abbildung 11-24) und danach zum Kühlluftauslass (Abbildung 11-27). Der Weg der Luft für den Coflow Burner führt über einen Durchflussregler (Abbildung 10-18), dem gebauten Luftherhitzer (Abbildung 8-6 und Abbildung 10-23) und die beheizte Luftleitung (Abbildung 10-22) direkt in den Burner.

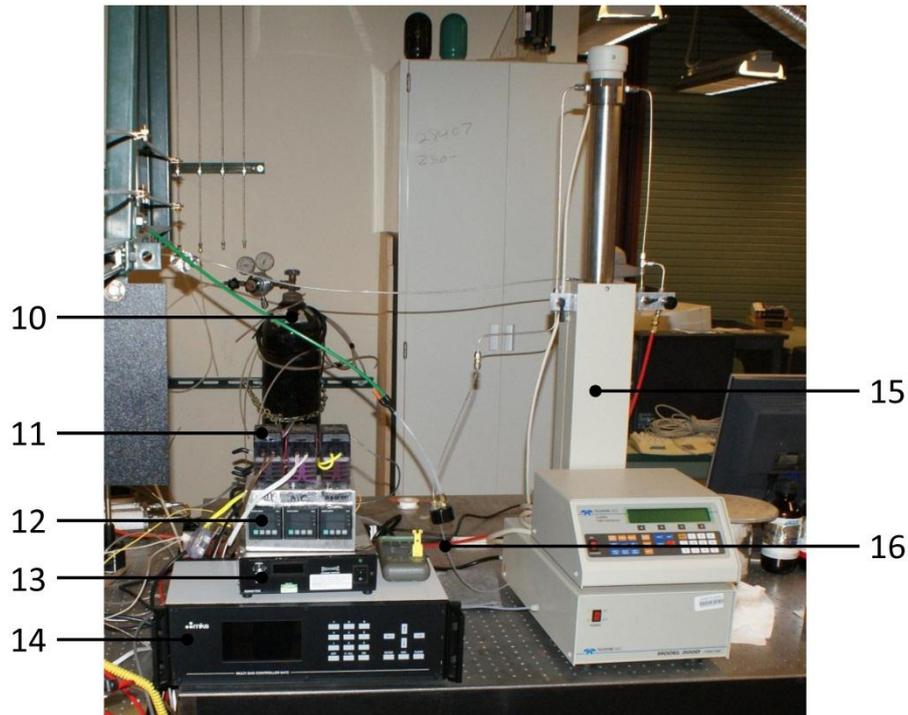


Abbildung 9: Versuchsaufbau Coflow Burner: 10, Stickstoffgasflasche; 11, Halbleiterrelais; 12, Watlow PID Temperaturregler; 13, Ultraschallbreitbandgenerator; 14, MKS Durchflussregler Steuereinheit; 15, Dosierpumpe; 16, Kraftstofffülleitung.

Die Dosierpumpe (Abbildung 9-15) wird durch die Kraftstofffülleitung (Abbildung 9-16) mit Kraftstoff gefüllt. Die gewünschte Kraftstofffördermenge wird an der Dosierpumpe eingestellt und wird zur Ultraschalldüse befördert (Abbildung 11-28).

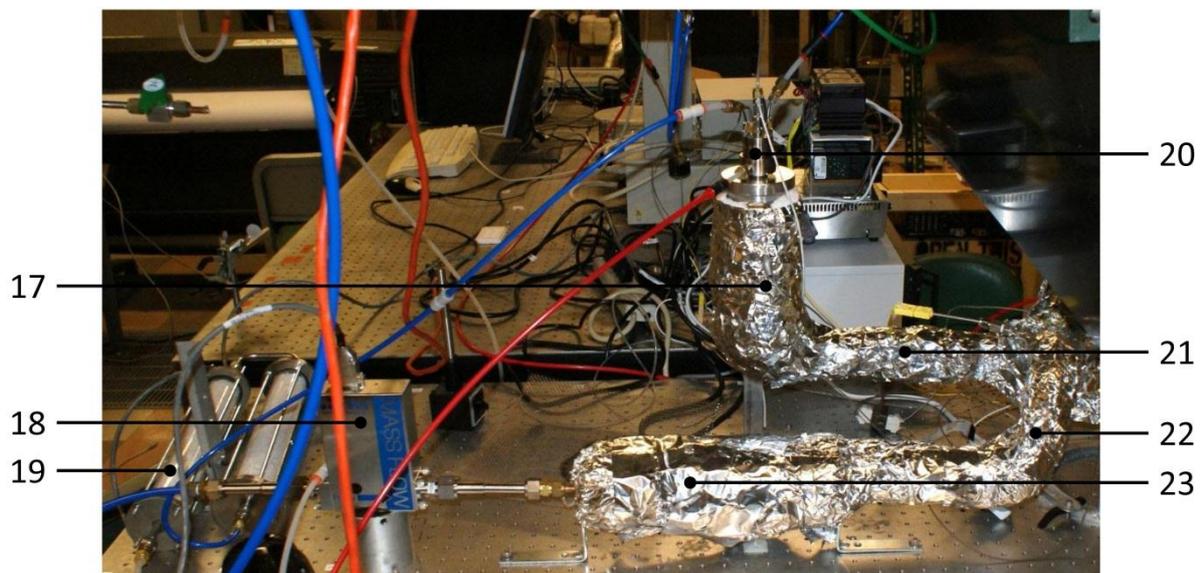


Abbildung 10: Versuchsaufbau Coflow Burner: 17, Verdampfer mit Isolierung; 18, Luft Durchflussregler; 19, Kühllufttrocknereinheit; 20, Ultraschalldüse; 21, Beheizte Kraftstoffleitung mit Isolierung; 22, Beheizte Luftleitung mit Isolierung; 23, Gebauter Luftheritzer.

Die Düse atomisiert den Kraftstoff mittels Ultraschall, der anschließend im Verdampfer (Abbildung 10-17 und Abbildung 11-29) verdampft wird und mit Stickstoff (Abbildung 11-25) von einer Gasflasche (Abbildung 9-10), dosiert durch einen Durchflussregler (Abbildung 8-7), vermischt wird. Die Mischung gelangt danach über die beheizte Kraftstoffleitung (Abbildung 10-21), umwickelt mit Heizbändern (Abbildung 11-26), zur Kraftstoffaustrittsdüse im Coflow Burner.

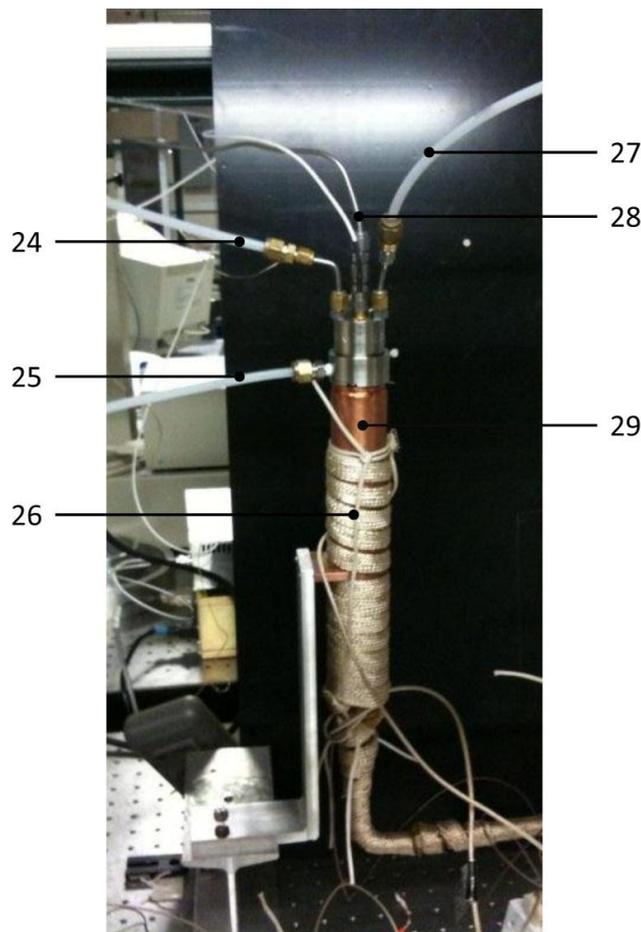


Abbildung 11: Versuchsaufbau Coflow Burner: 24, Kühllufteinlass; 25, Stickstoff-Transportgaseinlass; 26, Verdampfer Heizbänder; 27, Kühlluftauslass; 28, Kraftstoffeinlass; 29, Verdampfer.

Die Regelung der Heizbänder erfolgt durch K-Type Thermoelemente, PID Regler (Abbildung 9-12) und Halbleiterrelais (Abbildung 9-11), die Leistung der Ultraschalldüse wird durch den Ultraschallbreitbandgenerator geregelt (Abbildung 9-13) und die Durchflussregler werden mit der MKS Einheit (Abbildung 9-14) überwacht.

Die Abgase werden durch den Absaugtrichter (Abbildung 9-2) aus dem Labor befördert.

6.3. Forschungsergebnisse

6.3.1. Definition der Flammen und Lift-Off Höhe

Abbildung 12 zeigt wie Flammenhöhe beziehungsweise Lift-Off Höhe in dieser Arbeit definiert wurde.

Die Flammenhöhe wurde vom oberen Ende der Düse bis zur Spitze der Flamme gemessen. Für das Lift-Off Experiment wurde die Lift-Off Höhe vom oberen Ende der Düse bis zum unteren Anfang der Flamme gemessen und vom unteren Anfang bis zur Flammenspitze wurde wiederum die Flammenhöhe gemessen.

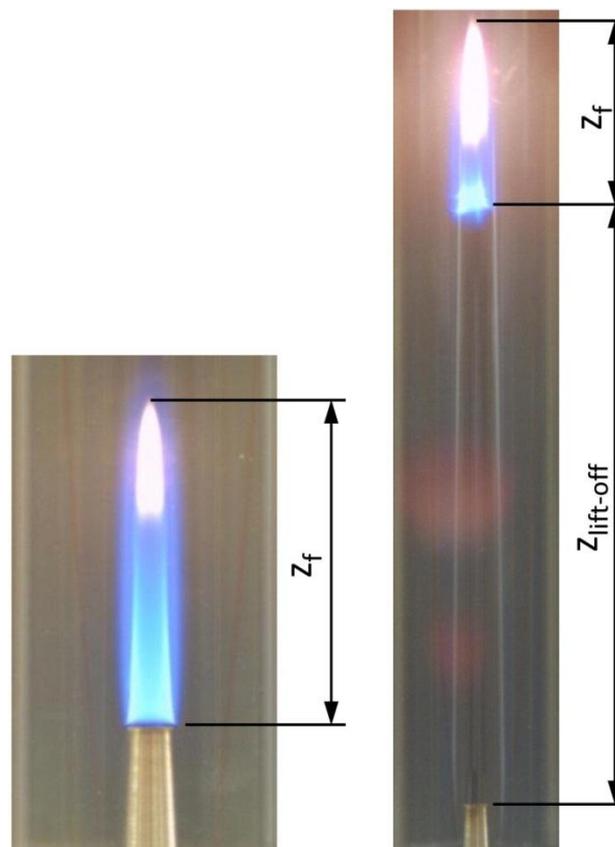


Abbildung 12: Definition von Flammenhöhe und von Flammen Lift-Off Höhe

6.3.2. Verwendete Kraftstoffe

Tabelle 1 zeigt die in der Diplomarbeit verwendeten Kraftstoffe und mit ihrem Molekulargewicht und ihrer Dichte.

Tabelle 1: Verwendete Kraftstoffe und Surrogates und deren Eigenschaften.

Fuel	Molecular Weight [g/mol]	Density [kg/m ³] @ 298 K
JP-8	147.83	803.6
FT Shell GTL	156.5	736.1
FT IPK Sasol	170.3	768.8
Aachen Surrogate	137.24	755.0
JP-8 Surrogate C	132.14	773.6
SERDP Surrogate	147.18	759.9
Modified SERDP Surrogate	145.62	771.0
Gasoline Surrogate C	103.27	743.2

JP-8 ist ein Düsentreibstoff erzeugt aus Rohöl, FT Shell GTL wird von Shell mittels Fischer-Tropsch Synthese aus Erdgas hergestellt und FT IPK Sasol wird von Sasol nach dem „Coal to Liquid“ Verfahren erzeugt.

Während die Düsenkraftstoffe aus vielen verschiedenen Kohlenwasserstoffen bestehen werden bei den Ersatzkraftstoffen nur einige wenig eingesetzt. Aachen Surrogate besteht aus n-Decan und Trimethylbenzol, JP-8 Surrogate C aus n-Dodecan, Methylcyclohexan, und o-Xylol, SERDEP Surrogate aus n-Dodecan und m-Xylo, Modified SERDP Surrogate aus n-Dodecan und Toluol und Gasoline Surrogate C als einziges mit vier Komponenten aus n-Heptan, iso-Octan, Toluol und Methylcyclohexan.

Die Komponenten für die Ersatzkraftstoffe wurden vor Ort im Labor zusammengemischt und direkt dem Versuch zugeführt. Das Mischungsverhältnis von Aachen Surrogate und Modified SERDP Surrogate werden in Prozent der Masse, das von JP-8 Surrogate C und Gasoline Surrogate C in Prozent des Raumvolumens und jenes von SERDP Surrogate in Prozent des molaren Volumens angegeben

6.3.3. Flammenhöhe

Abbildung 13 zeigt die Versuchsergebnisse von Flammenhöhen der Kraftstoffe JP-8, FT IPK Sasol und FT Shell GTL als Funktion der Kraftstoffströmungsgeschwindigkeit. Wie zu sehen war wichen bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten die Höhen nur geringfügig voneinander ab. Jedoch bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten wurden die Abweichungen größer. Auffallend war hier, dass FT Shell GTL eine höhere Strömungsgeschwindigkeit des Kraftstoffs >80 cm/s besitzt, bevor sich die Flamme von der Düse abhebt (Lift-Off einstellt), als die beiden anderen Kerosinkraftstoffe.

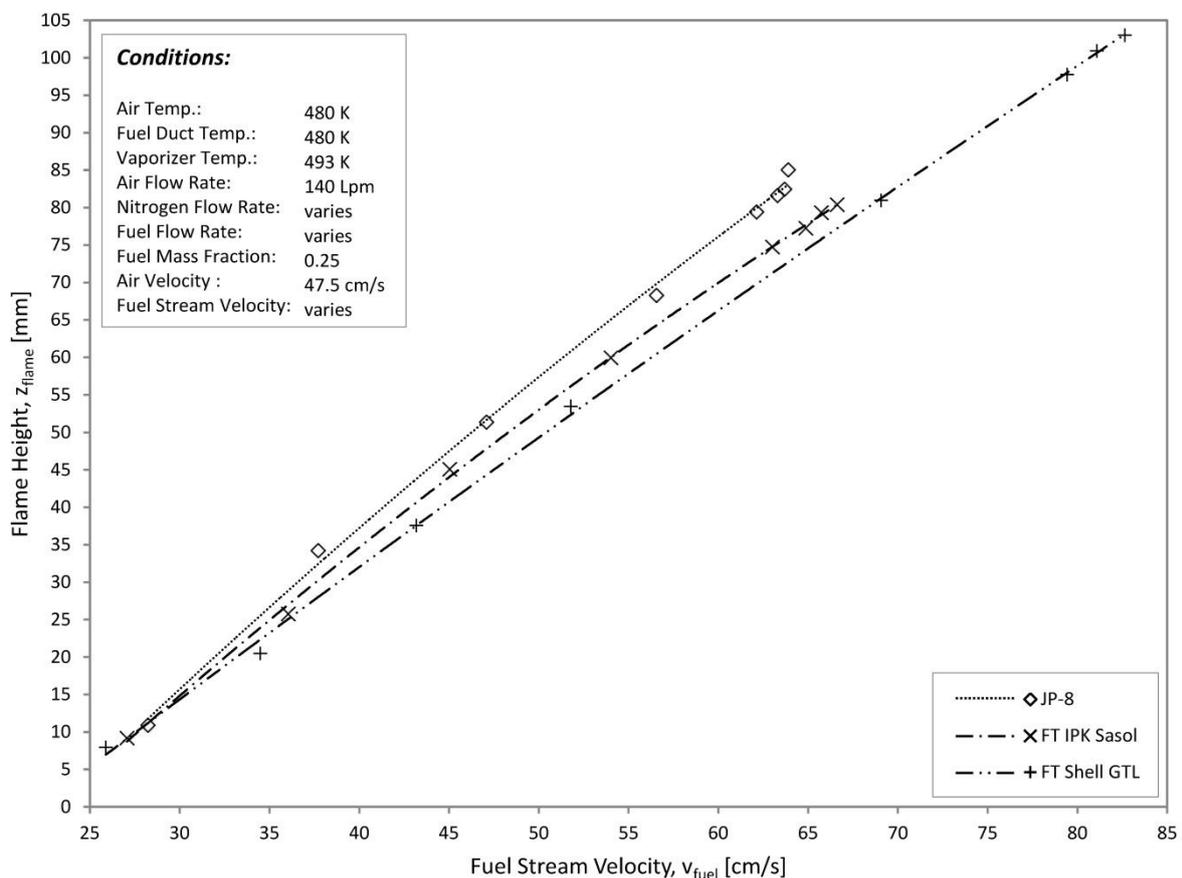


Abbildung 13: Flammenhöhe z_{flame} von JP-8, FT IPK Sasol und FT Shell GTL als Funktion der Kraftstoffströmungsgeschwindigkeit v_{fuel}

Abbildung 14 zeigt zum Vergleich die Flammenhöhen der Ersatzkraftstoffe und JP-8 als Funktion der Kraftstoffströmungsgeschwindigkeit. JP-8 dient hier als Referenz, da die Surrogates entwickelt wurden um die JP-8 Verbrennungseigenschaften bestmöglich abzubilden.

Aus Abbildung 14 ist auch ersichtlich, dass für das Coflow Experiment die Ersatzkraftstoffe angepasst werden müssen, da sich Abweichungen zwischen JP-8 und den Surrogates einstellen. Lediglich Aachen Surrogate, SERDP Surrogate und JP-8 Surrogate C zeigen einen ähnlichen Verlauf der Flammenhöhenentwicklung und der Lift-Off Strömungsgeschwindigkeit.

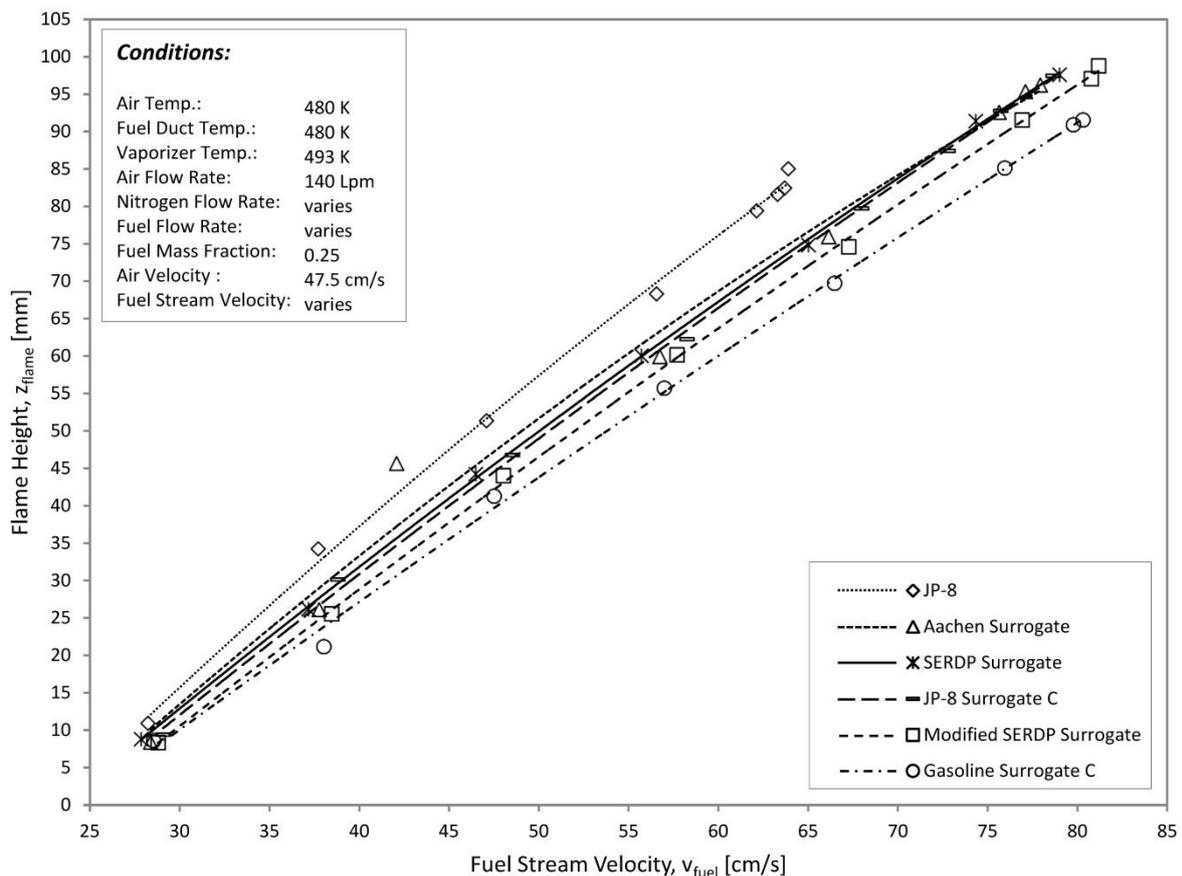


Abbildung 14: Flammenhöhe z_{flame} von JP-8, Aachen Surrogate, SERDP Surrogate, JP-8 Surrogate C, Modified SERDP Surrogate und Gasoline Surrogate C als Funktion der Kraftstoffströmungsgeschwindigkeit v_{fuel}

6.3.4. Flammen Lift-Off Höhe

In Abbildung 15 wird die Entwicklung der Lift-Off Höhe von FT IPK Sasol, JP-8 und FT Shell GTL bei zunehmenden Kraftstoffmassenanteils gezeigt. Zuerst bewegt man sich auf der Nulllinie bis der Lift-Off Zustand erreicht wurde und nach schrittweiser Erhöhung der Kraftstoffmassenanteils kehrt die Flamme ab einem bestimmten Massenanteils wieder zur Düse (Nulllinie) zurück.

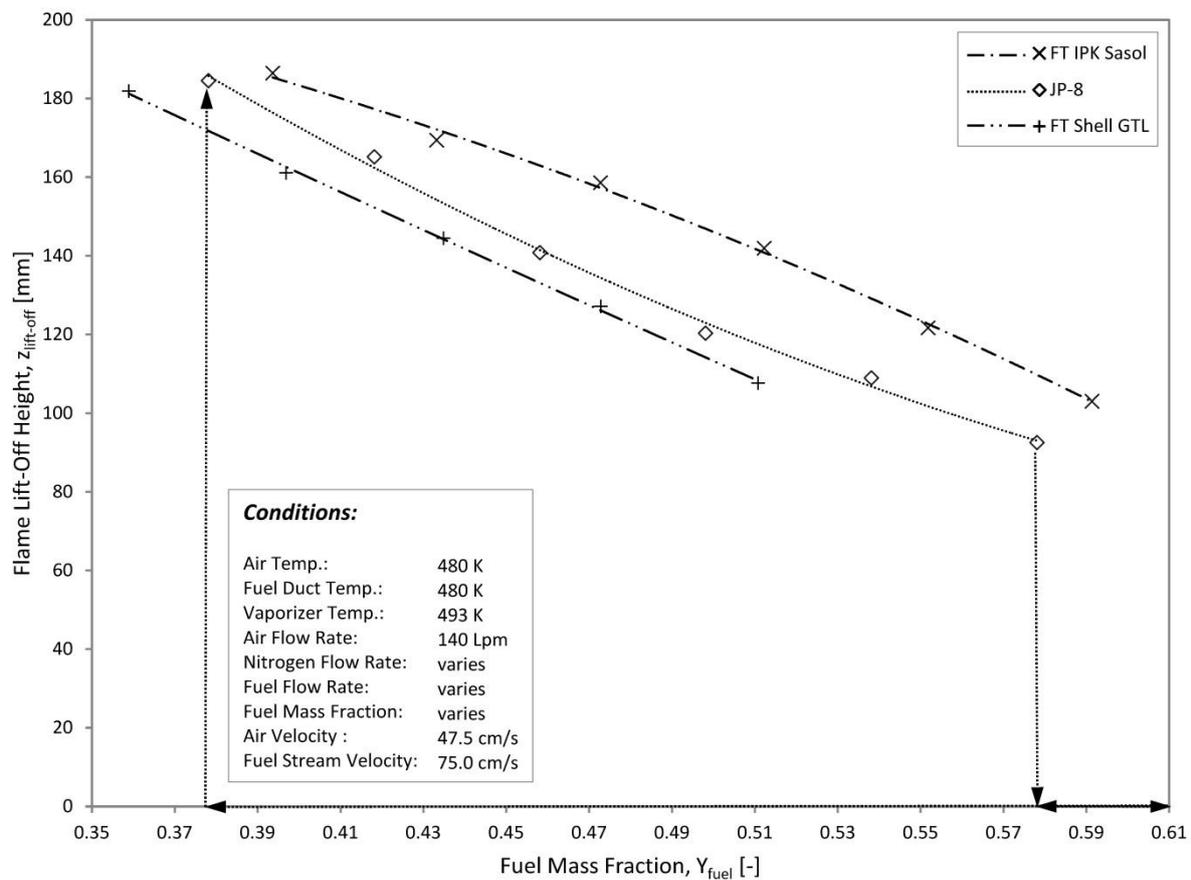


Abbildung 15: Lift-Off Höhe $z_{lift-off}$ von FT IPK Sasol, JP-8, und FT Shell GTL als Funktion des Kraftstoffmassenverhältnisses Y_{fuel} bei konstanter Kraftstoffströmungs-geschwindigkeit v_{fuel} .

Abbildung 16 zeigt das Verhalten von Gasoline Surrogate C, JP-8 (als Referenz), SERDP Surrogate, JP-8 Surrogate C, Aachen Surrogate und Modified SERDP Surrogate. Hier ist zu erkennen, dass sich die Lift-Off Höhen von JP-8, SERDP Surrogate, JP-8 Surrogate C und Aachen Surrogate in großen Bereichen ähnlich ist.

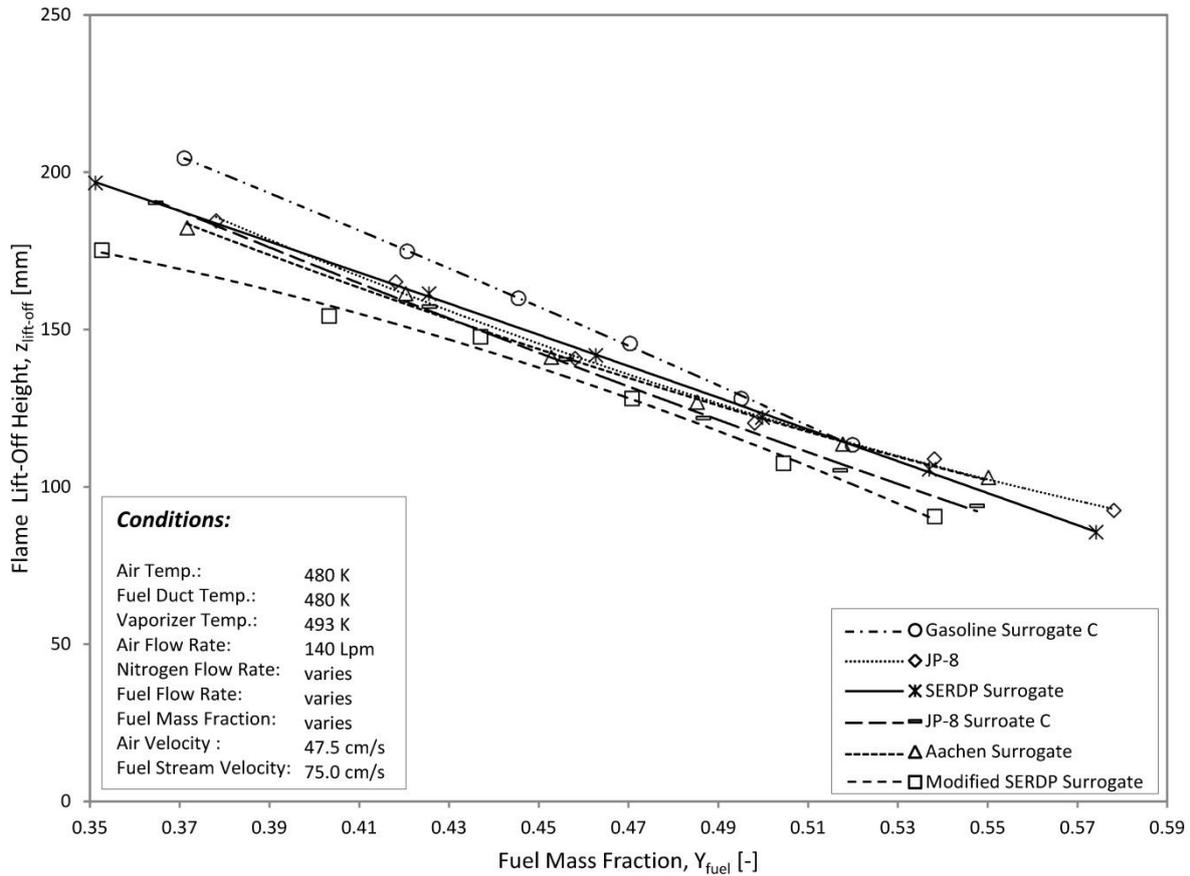


Abbildung 16: Lift-Off Höhe $z_{\text{lift-off}}$ von Gasoline Surrogate C, JP-8, SERDP Surrogate, JP-8 Surrogate C, Aachen Surrogate und Modified SERDP Surrogate als Funktion des Kraftstoffmassenverhältnisses Y_{fuel} bei konstanter Kraftstoffströmungs-geschwindigkeit v_{fuel} .

6.3.5. Flammenhöhe während des Lift-Offs

Abbildung 17 zeigt das Verhalten der Flammenhöhe während des Lift-Off Experiments. Es wurde bei jeder Lift-Off Höhe ebenfalls die Flammenhöhe vermessen und aufgezeichnet. Hier ist die Entwicklung der Flammenhöhe von JP-8, FT Shell GTL und FT IPK Sasol zu sehen. Die Flammenhöhe verringert sich sehr stark während des Lift-Offs und nimmt mit zunehmendem Kraftstoffmassenverhältnisses bzw. mit abnehmender Lift-Off Höhe (siehe Abbildung 15) wieder zu.

Es ist zu erkennen, dass die Verläufe der Flammenhöhen aller drei Kerosinkraftstoffe unterschiedlich aussehen.

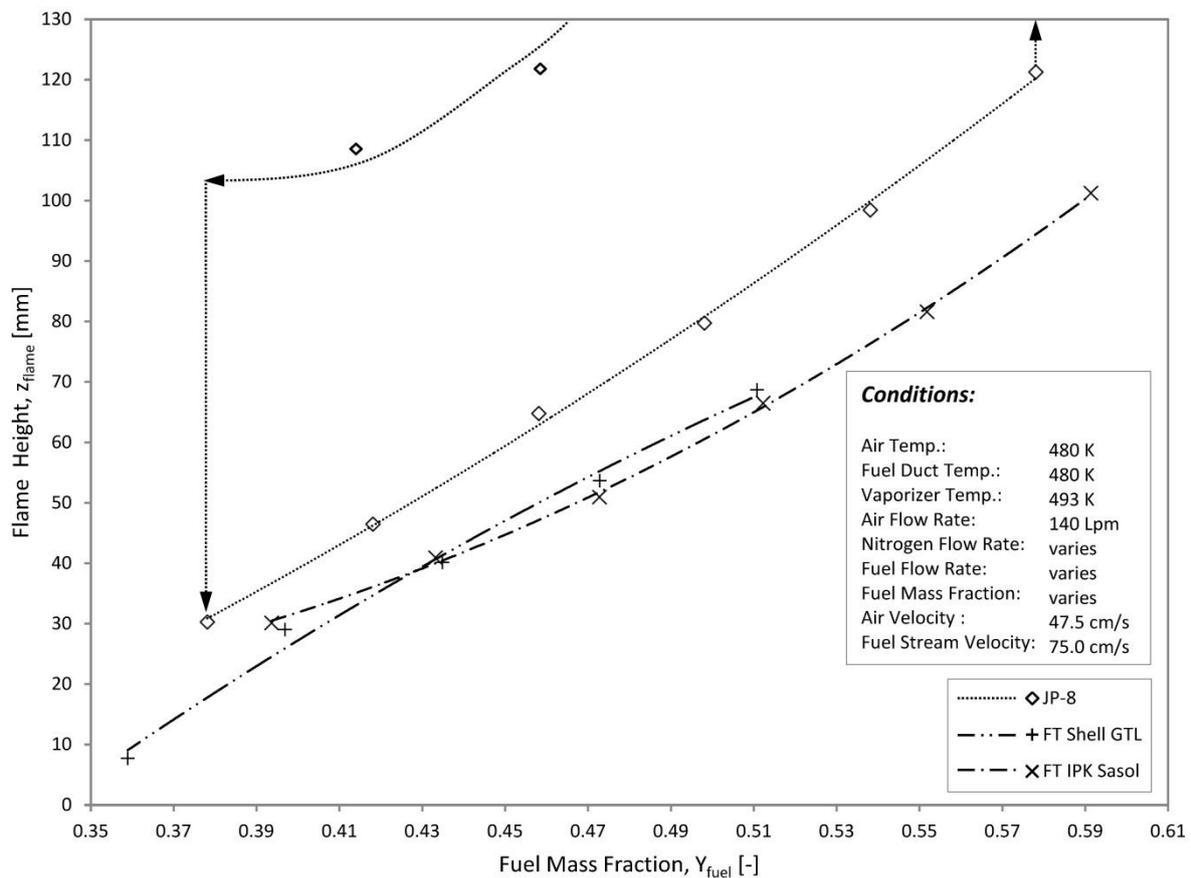


Abbildung 17: Flammenhöhe z_{flame} während des Lift-Off Experiments von JP-8, FT Shell GTL und FT IPK Sasol als Funktion des Kraftstoffmassenverhältnisses Y_{fuel} bei konstanter Kraftstoffströmungsgeschwindigkeit v_{fuel} .

Die Abbildung 18 zeigt das Verhalten der Flammenhöhen für JP-8 (als Referenz), Modified SERDP Surrogate, JP-8 Surrogate C, SERDP Surrogate, Aachen Surrogate und Gasoline Surrogate C.

Es ist zu sehen, dass Modified SERDP Surrogate, JP-8 Surrogate und SERDP Surrogate über weite Bereiche ähnliche Flammenhöhen aufweisen und das Gasoline Surrogate C die niedrigste Flammenhöhe von allen aufweist.

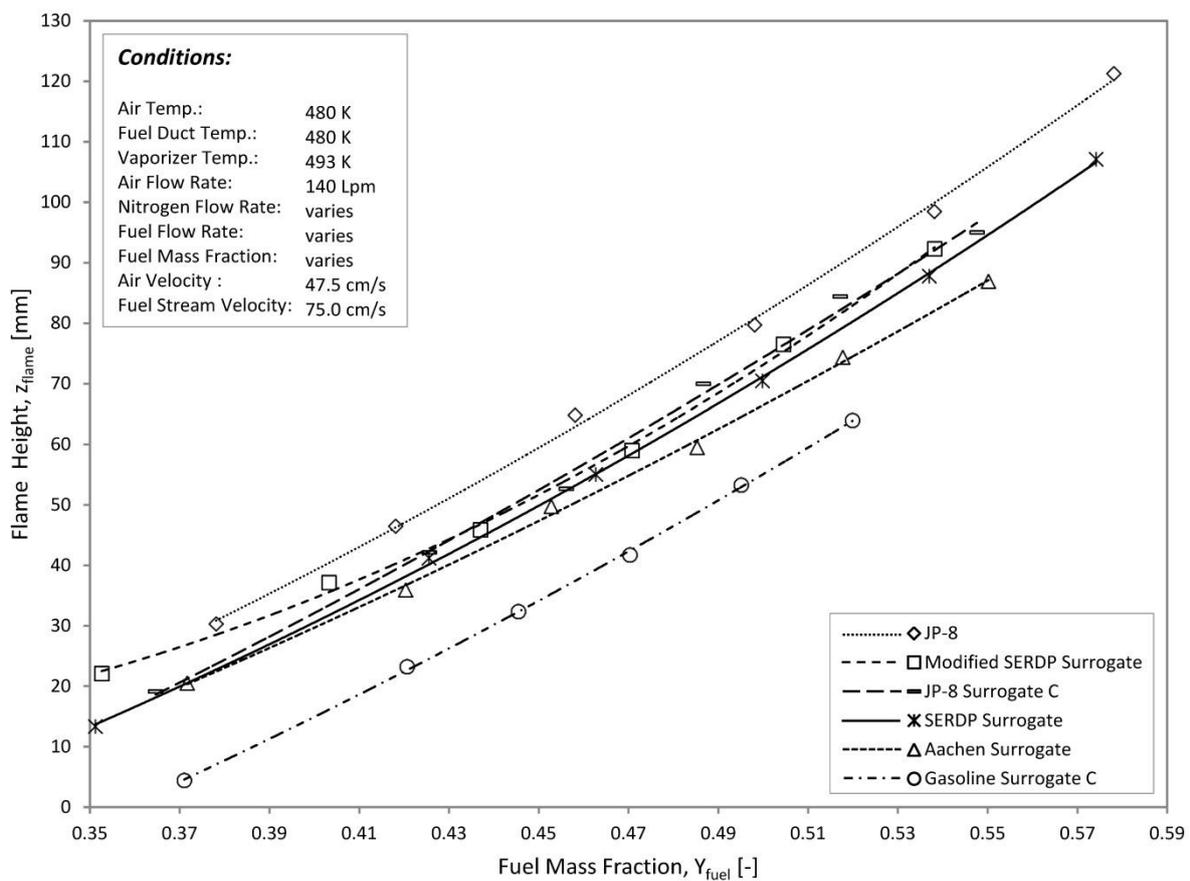


Abbildung 18: Flammenhöhe z_{flame} während des Lift-Off Experiments von JP-8, Modified SERDP Surrogate, JP-8 Surrogate C, SERDP Surrogate, Aachen Surrogate und Gasoline Surrogate C als Funktion des Kraftstoffmassenverhältnisses Y_{fuel} bei konstanter Kraftstoffströmungsgeschwindigkeit v_{fuel} .

6.3.6. Berechnung nach Burke-Schumann

Die Ergebnisse des Kapitels Flammenhöhenberechnung nach Burke-Schumann sind in Abbildung 19 zu sehen. Es wurden zwei Methoden angewendet um den Trend der Flammenhöhe zu berechnen.

Methode 1 war die Anwendung der Formel (6-1) für sehr kleine Werte von c , wobei c das Verhältnis von Außendurchmesser der Kraftstoffausströmdüse r_j zu Glaszylinderinnendurchmesser r_s ist (siehe oberste Graphengruppe in Abbildung 19).

$$c = \frac{r_j}{r_s} \quad (6-1)$$

$$z = \frac{vr_j^2}{D} \frac{1+v}{4v} \quad (6-2)$$

z ist die Flammenhöhe, v die Kraftstoffaustrittsgeschwindigkeit, D der Diffusionskoeffizient und v ist das Massenverhältnis von Kraftstoff zu Sauerstoff.

Methode 2 war die Anwendung der aufwendigeren Anfangsgleichung unter vorhergehender Berechnung weiterer Koeffizienten für den tatsächlichen Wert von c . Wie zu erkennen ist stimmt der Trend der Methode 2 (siehe mittlere Graphengruppe) besser mit den Ergebnissen aus den Experimenten überein als der Trend der Methode 1.

$$z = \eta \frac{vr_s^2}{D} \quad (6-3)$$

$$\gamma = (1+v)c^2 - v + 2(1+v)c \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\varphi_n} \frac{J_1(c\varphi_n)}{[J_0(\varphi_n)]^2} J_1(\varphi_n \xi) e^{-\varphi_n^2 \eta} \quad (6-4)$$

η wurde durch Lösen der Gleichung (6-4) erhalten und in Formel (6-3) eingesetzt. Genaueres zu der Anwendung dieser Formeln entnehmen Sie bitte meiner Diplomarbeit. Die Berechnung der exakten Flammenhöhe hätte den Umfang meiner Diplomarbeit gesprengt daher habe ich mich lediglich mit der Trendanalyse begnügt.

Abbildung 20 zeigt das Bestimmtheitsmaß und die Geradengleichungen der drei Flammenhöhenverläufe für Aachen Surrogate, dabei wurde die polynomische Trendlinie zweiter Ordnung der experimentell ermittelten Höhen durch eine Gerade ersetzt.

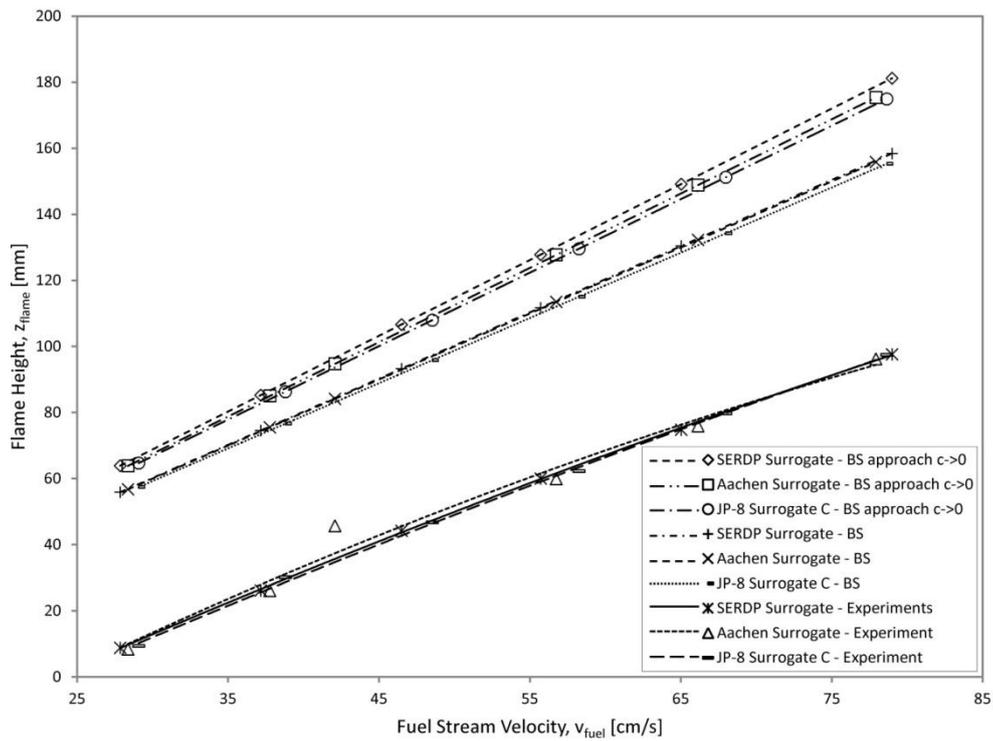


Abbildung 19: Vereinfachte Berechnung für kleine c nach Burke-Schumann, erweiterter Berechnung nach Burke-Schumann und experimentelle Messung der Flammenhöhe z_{flame} von SERDP Surrogate, Aachen Surrogate und JP-8 Surrogate C als Funktion der Kraftstoffströmungsgeschwindigkeit v_{fuel}

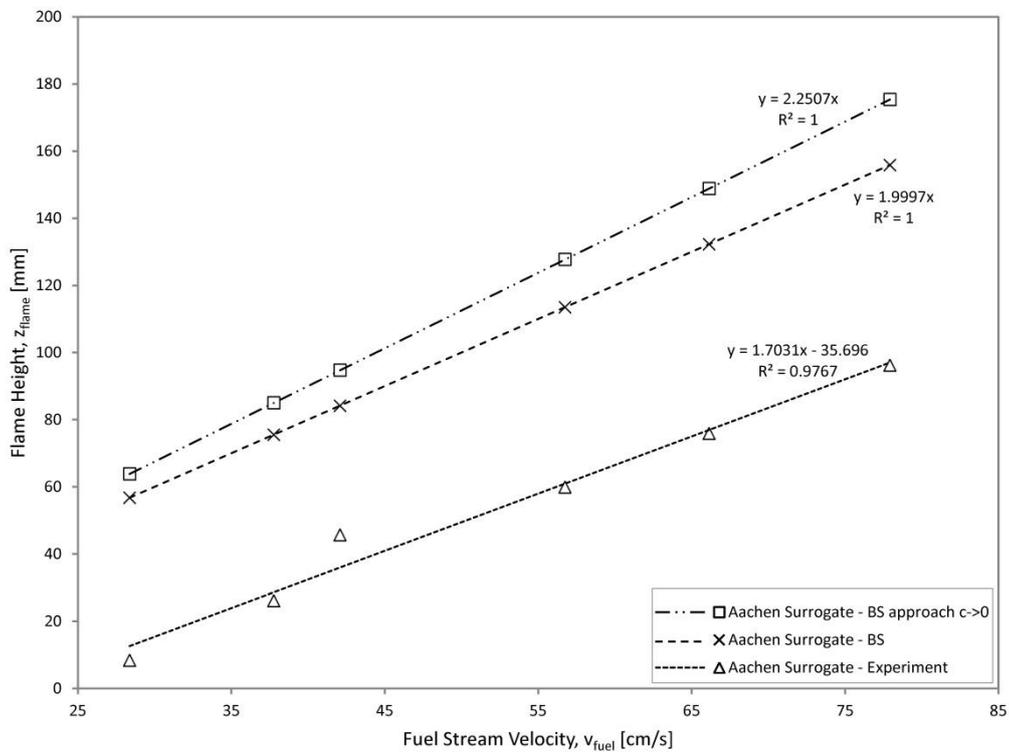


Abbildung 20: Vereinfachte Berechnung für kleine c nach Burke-Schumann, erweiterter Berechnung nach Burke-Schumann und experimentelle Messung der Flammenhöhe z_{flame} von Aachen Surrogate. Darstellung der Graphen mit Bestimmtheitsmaß R^2 und den Geradengleichungen.

6.3.7. Flammenhöhen und Lift-Off in Bildern

Die Flammenhöhenentwicklung bei zunehmender Kraftstoffströmungsgeschwindigkeit wird in Abbildung 21 am Beispiel von Aachen Surrogate gezeigt. Es ist zusehen wie sich die Flamme bei Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit verändert. Die Flammenhöhe nimmt zu und die Rußregion (oberer hell leuchtender Teil der Flamme) wird größer bis die Lift-Off Strömungsgeschwindigkeit der Kraftstoffes erreicht wird (Reihe zwei letztes Bild)

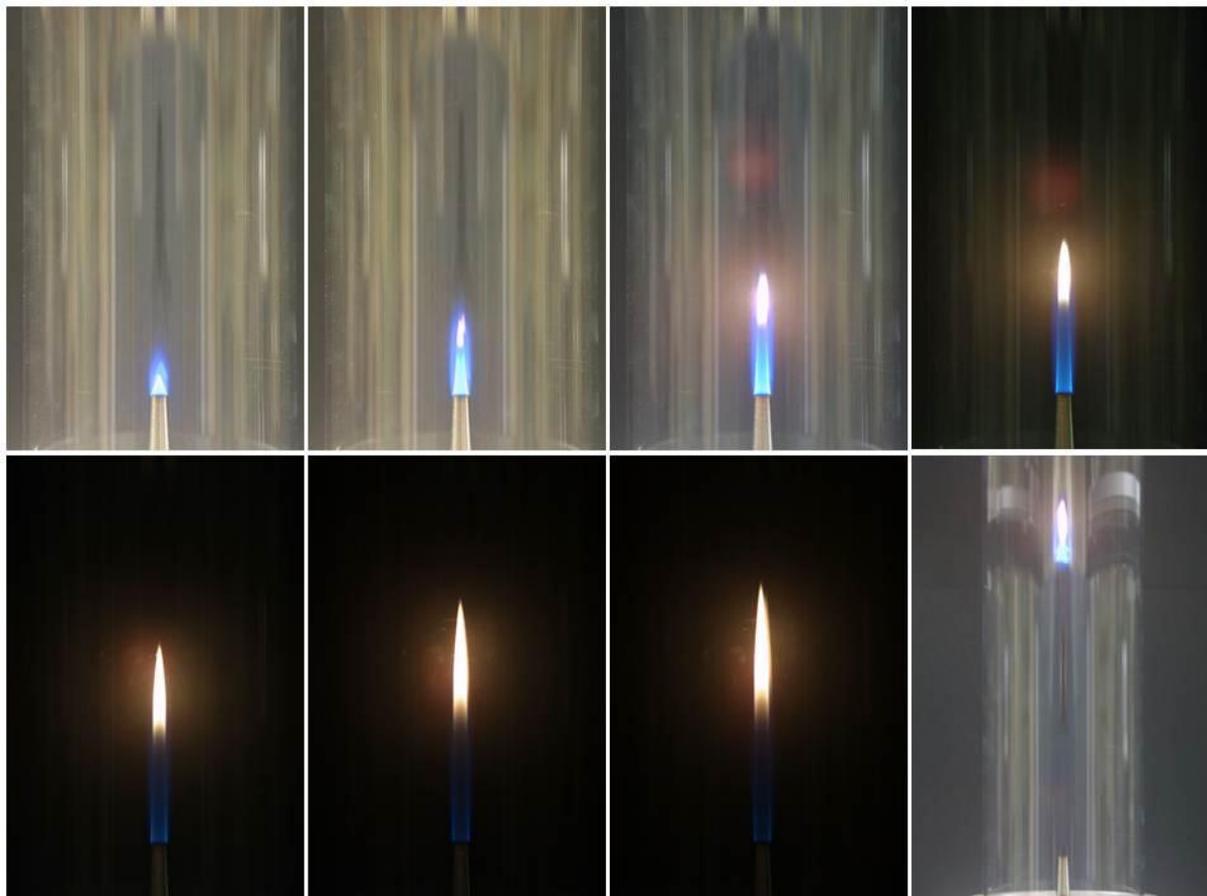


Abbildung 21: Beispiel der Flammenhöhenentwicklung bei zunehmender Kraftstoffströmungsgeschwindigkeit anhand von Aachen Surrogate.

In Abbildung 22 wird der Verlauf des Lift-Off Verhaltens einer JP-8 Flamme veranschaulicht. Der Kraftstoffmassenanteil wurde bis zum Lift-Off der Flamme verringert (Bild 1 auf Bild 2) nach Erreichen des Lift-Offs ist der Kraftstoffmassenanteil kontinuierlich erhöht worden bis die Flamme wieder die Düse erreicht hat (Bild 2 bis Bild 8). Es ist deutlich zu sehen, dass bei Erhöhung der Kraftstoffmassenanteils sich die Lift-Off Höhe verringert und dabei die Flammenhöhe zunimmt. Bei JP-8 konnte am Ende des Experiments eine starke Rußbildung beobachtet werden (siehe Bild 8).

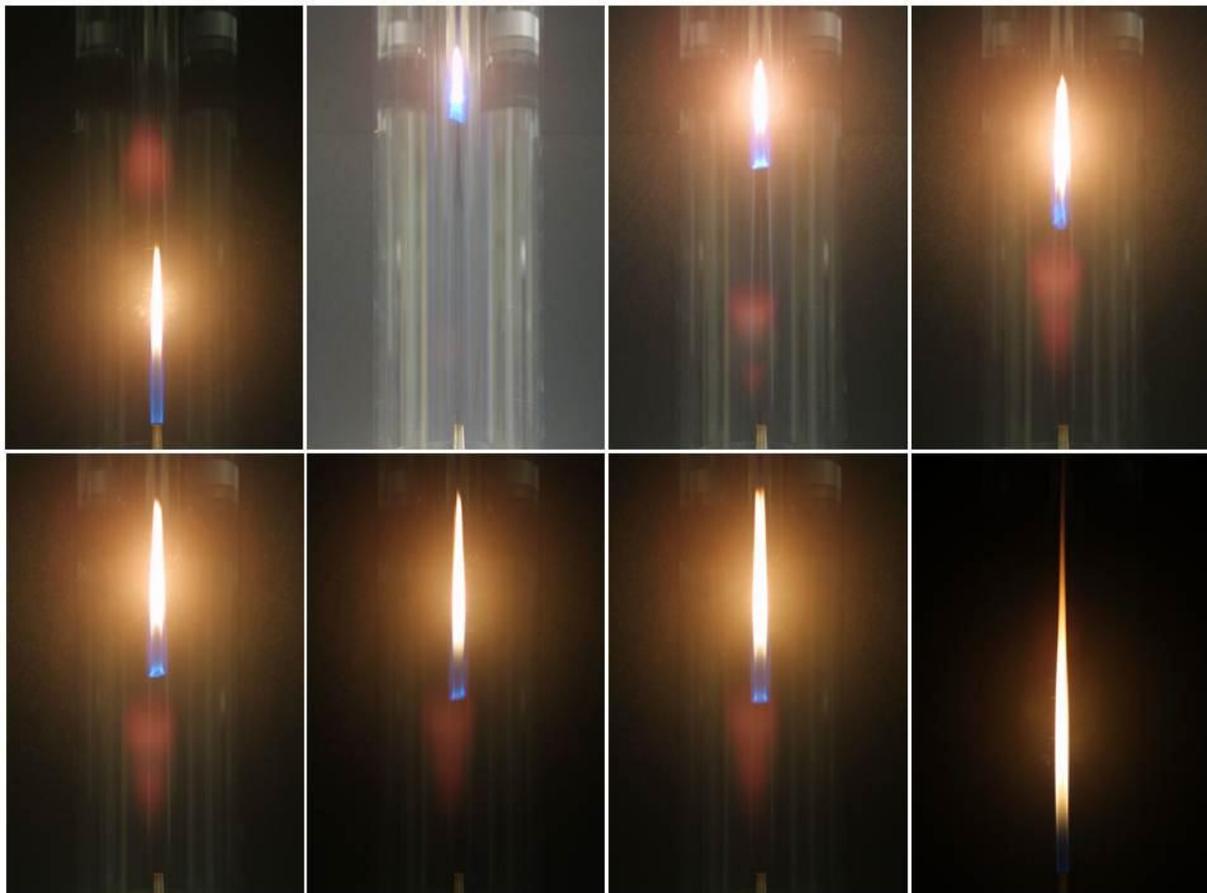


Abbildung 22: Beispiel der Lift-Off und Flammenhöhenentwicklung bei zunehmendem Kraftstoffmassenanteils und konstanter Kraftstoffströmungsgeschwindigkeit anhand von JP-8.

7. Fazit

Abschließend möchte ich sagen, dass diese 6 Monate sehr erfahrungsreich für mich waren, sowohl in akademischen als auch in privater Hinsicht. Die Arbeit im Verbrennungslabor war lehrreich und die Diskussionen mit Professor Dr. Kalyanasundaram Seshadri und seinem Laborteam haben meine Diplomarbeit positiv beeinflusst und mir neue Denkanstöße gegeben. Die Ergebnisse meiner Diplomarbeit werden für weiterführende Forschungen verwendet und dienen auch der Air Force als experimentelle Daten für ihre Computersimulationen.

Meine Diplomarbeit habe ich größtenteils bereits in den USA fertig zusammengefasst und Korrekturlesen lassen. Im Moment befinde ich mich in der Vorbereitung zur Verteidigung der Diplomarbeit, die im Oktober 2010 stattfinden wird.

Abschließend kann ich nur all jenen raten, die die Möglichkeit haben einen Auslandsaufenthalt ins Studium zu integrieren, diesen auch durchzuführen. Es ist eine Erfahrung die sich bezahlt machen wird. Dank der guten Unterstützung, seitens der Professoren und der Marshall Plan Foundation, ist dieser Aufenthalt für mich sehr angenehm verlaufen.

8. Gruppenfotos



Abbildung 23: Gruppenfoto Seminarraum UCSD – Dipl.-Ing. Luis Cachon, ao.Univ.-Prof. Dr.techn. Ernst Pucher, Professor Dr. Kalyanasundaram Seshadri und Johannes Pitzl (v.l.n.r), Mai 2010.



Abbildung 24: Gruppenfoto mit GM Chevy Equinox Fuel Cell SUV an der 700 bar Wasserstofftankstelle in Irvine, Los Angeles – ao.Univ.-Prof. Dr.techn. Ernst Pucher, Johannes Pitzl und Dipl.-Ing. Luis Cachon (v.l.n.r), Mai 2010.