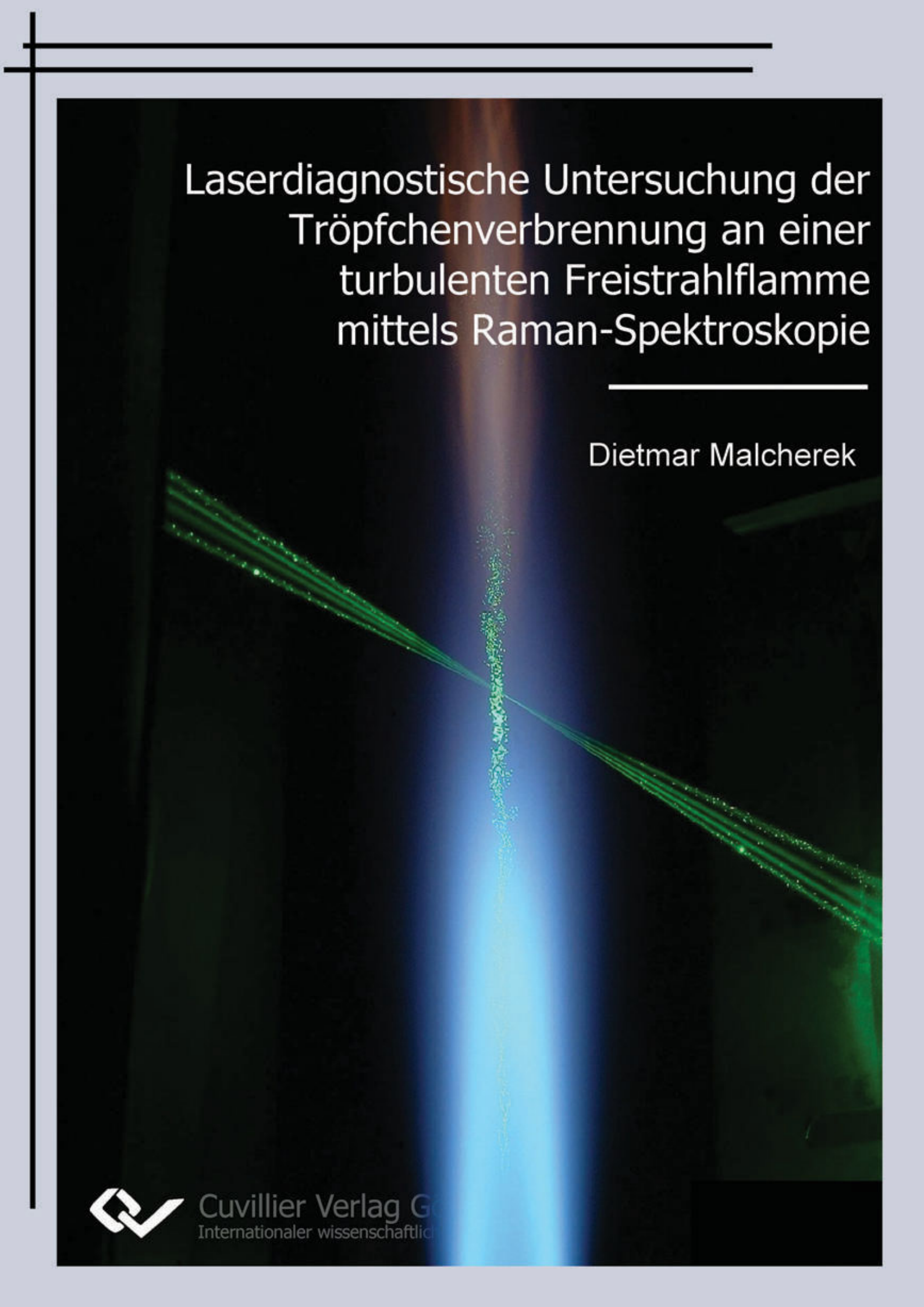




Laserdiagnostische Untersuchung der Tröpfchenverbrennung an einer turbulenten Freistrahlf Flamme mittels Raman-Spektroskopie

Dietmar Malcherek



Cuvillier Verlag G
Internationaler wissenschaftl

Laserdiagnostische Untersuchung der Tröpfchenverbrennung an einer turbulenten Freistrahlf Flamme mittels Raman-Spektroskopie

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
der Fakultät für Maschinenbau
Universität Karlsruhe (TH)

genehmigte
Dissertation
von
Dipl.-Phys. Dietmar Malcherek

Tag der mündlichen Prüfung:	15. Dezember 2009
Hauptreferent:	Prof. Dr. rer. nat. habil. Ulrich Maas
Koreferent:	Prof. Dr. rer. nat. habil. Rainer Suntz

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über

<http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2010

Zugl.: (TH) Karlsruhe, Univ., Diss., 2009

978-3-86955-294-1

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2010

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2010

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86955-294-1

Oft ist die Suche nach einer Antwort wichtiger als die Antwort selbst.

Lloyd Chudley Alexander

Zusammenfassung

Die Untersuchung von Verbrennungsvorgängen gestaltet sich mit herkömmlichen Mitteln bei mässiger Auflösung in Ort und Zeit sehr ungenau. Oft versagt einem die schwere Zugänglichkeit zum Ort, an welchem die Verbrennung stattfindet, sogar jegliche Untersuchungsmethodik, die zu tieferen Erkenntnissen des Verbrennungsvorganges führt. Mit der Laserspektroskopie lassen sich bei sehr hoher Zeit- und Ortsauflösung aber genau die Informationen gewinnen, die Reaktanden in einem thermisch-chemischen Wechselspiel vollführen. Mit dem entscheidenden Vorteil der Berührungslosigkeit tritt das Laserlicht mit den an der chemischen Reaktion beteiligten Reaktanden in Wechselwirkung, die nicht nur auf molekulspezifischer Weise wie ein genetischer Fingerabdruck wichtige Erkenntnisse via Emissionsspektren liefert, sondern das zu untersuchende Medium in ihrem ursprünglichen Zustand unverändert lässt. Über geeignete Auswertemechanismen lassen sich damit Parameter wie Molenbruch, Temperaturverteilung, Mischungsbruch, usw. simultan und In Situ selbst in sehr heissen und aggressiven Zuständen erarbeiten.

In der vorliegenden Arbeit wurde eine turbulente pilotflammengestützte Freistrahlfamme mit Hilfe der Ramanspektroskopie laserdiagnostisch untersucht. Mit einem geeigneten und auf dieses Experiment abgestimmten Auswerteverfahren konnten Molenbrüche der Spezies (CO_2 , O_2 , CO , N_2 , CH_4 , H_2O und H_2) sowie deren Standardabweichung, Temperaturverteilung und Mischungsbruch ermittelt werden und mit Ergebnissen einer hybriden PDF-Simulation verglichen werden. In einem zweiten Schritt wurden in derselben Flammenkonfiguration Kraftstofftröpfchen (Ethanol) in die Flamme eingebracht und das modifizierte Brennverhalten rasterartig über die gesamte Flamme ramanspektroskopisch detektiert. In Bereichen, in denen sich der Einfluss des flüssigen Kraftstoffs am markantesten auswirkt, wurden im Vergleich zur reinen Gasflamme die deutlichsten Veränderungen in den Spezies CO_2 , O_2 und H_2O gefunden: Im Bereich des chemischen Gleichgewichts konnte in einer Höhe von 250 mm über dem Brennerkopf und einer radialen Verschiebung von 10 mm zur Mittelachse eine Zunahme des Molenbruchs für CO_2 detektiert werden. Der Molenbruch für CO_2 liegt mit einem Wert von 0.09 um 10 % über dem der turbulenten Flamme im Einphasenbetrieb (0.08), die Molenbrüche der Spezies H_2O und O_2 reduzieren sich auf 0.18 für H_2O um 5 % (von 0.19) und für O_2 auf 0.020 um 17 % (von 0.028) (vgl. Kap. 2.1). Die Temperatur liegt für die einphasige turbulente Flamme bei 2110 K und erhöht sich durch die Kraftstoffzufuhr mit 3 % auf 2170 K. Bezüglich CO und H_2 sind keine konkreten Aussagen möglich und werden wegen erschwelter Auswertbarkeit der Ramansignale nur bedingt betrachtet (siehe Kap. 3). In einer Vorversuchsreihe konnten die tropfenspezifischen Grössen wie Durchmesser und Abstand der Tröpfchen im Jet erarbeitet werden, die als Grundlage zu den Messungen der Tröpfchenparameter in der turbulenten Strömung dienten. Hierzu wurden über verschiedene Frequenzen die Beugungsspektren aufgenommen, aus welchen sich der Durchmesser sowie Tropfenabstand ermitteln liessen. Bei einer Frequenz von $f = 122 \text{ Hz}$ und einem Flüssigkeitsdruck von $p = 4 \text{ bar}$ beziffert sich der Tropfendurchmesser auf $103 \mu\text{m}$ und steht dem theoretischen Wert von $90.5 \mu\text{m}$

mit einer Abweichung von ca. 12% gegenüber. Mit denselben Betriebsparametern wurde der Tropfenjet in der turbulenten Freistrahlf Flamme im Zweiphasenbetrieb gearbeitet. Unter betriebsnahen Bedingungen (turbulente Tropfenumgebung) und denselben Betriebsparametern wie im Vorversuch konnte eine gute Übereinstimmung zwischen theoretischen und gemessenen Tropfengrößen gefunden werden [GK86, ARF91, RAF91].

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	10
2	Theoretische Grundlagen	13
2.1	Verbrennung	13
2.1.1	Turbulente Prozesse	14
2.1.2	Flamelet-Modell	17
2.2	Mathematische Modellierung turbulenter Prozesse	18
2.2.1	Statistische Modellierung	18
2.2.2	Methode der intrinsischen niedrig-dimensionalen Mannigfaltigkeiten (ILDm)	20
2.2.3	Hybrides Verfahren	20
2.3	Laser-Spektroskopie	21
2.3.1	Der Raman-Effekt	22
2.3.2	Raman-Streuintensität	25
2.3.3	Mie-Streuung	26
2.4	Tröpfchendynamik	28
2.4.1	Strahlzerfall	29
2.4.2	Generierung von Einzeltröpfchen	30
2.4.3	Verbrennung eines Zwei-Phasen-Systems	31
3	Turbulente pilotstabilisierte Vormischflamme	34
3.1	Experimenteller Aufbau und Durchführung	34
3.2	Datenerfassung und Auswertung	37
3.2.1	Kalibrierung	41
3.2.2	Flächenbestimmung von CO ₂ und O ₂	46
3.2.3	Laserenergie	49
3.2.4	Linearität der Kameraverstärkung	51
3.2.5	Binning	52
4	Turbulente Vormischflamme im Mehrphasenbetrieb	54
4.1	Die Generierung homogener monodisperser Tröpfchen	54
4.2	Experiment	56
4.3	Datenerfassung und Auswertung	57
5	Ergebnisse	59
5.1	Das Strömungsfeld	59
5.2	Pilotierte Freistrahlfamme im Einphasenbetrieb	62
5.2.1	Korrelation der Flächen	62
5.2.2	Molenbruch und Temperaturverteilung	66
5.2.3	Der Mischungsbruch	72
5.3	Pilotierte Freistrahlfamme im Mehrphasenbetrieb	77
5.3.1	Tröpfchengrößen	77
5.3.2	Molenbruch und Temperatur im Zwei-Phasen-Betrieb	81
5.4	Simulationsergebnisse	89

6 Fehlerrechnung	98
6.1 Fehler in der turbulenten Verbrennung	98
6.1.1 Kalibrierfehler	98
6.1.2 Fehler in der Bestimmung von Molenbruch und Temperatur .	100
6.2 Fehler in der Tröpfchengenerierung	101
7 Diskussion	103
8 Anhang	107
Literatur	109

Verwendete Symbole

x_i	Molenbruch der Spezies i	[-]
ρ	Dichte	[g cm ⁻³]
T	Temperatur	[K]
k	Boltzmann-Konstante	[J K ⁻¹]
ν	Frequenz	[Hz]
q	Elementarladung	[A s]
λ	Wellenlänge	[nm]
α	Polarisierbarkeit	[-]
I	Intensität	[-]
$\partial\sigma/\partial\Omega$	differentieller Wirkungsquerschnitt	[barn = 10 ⁻²⁴ cm ²]
R_G	ideale Gaskonstante	[J K ⁻¹ mol ⁻¹]
V	Volumen	[m ³]
p	Druck	[bar]
$\dot{V}$	Volumenstrom	[l min ⁻¹]
f	Brennweite	[m]
s_T	Tropfenabstand	[μm]
s_S	Abstand Tropfenstrahl zur Mattscheibe	[mm]
s_M	Abstand Laser-Durchstosspunkt zum Beugungsmaximum	[mm]
v_T	Tropfengeschwindigkeit	[m s ⁻¹]
Φ	Äquivalenzverhältnis	[-]
r	Radius	[m]
d_T	Tropfendurchmesser	[μm]
$\vec{\mu}$	Dipolmoment	[C m]
$\vec{E}$	Elektrischer Feldvektor	[V m ⁻¹]
t	Zeit	[s]
D	Diffusionskoeffizient eines Brennstoffs gegenüber Luft	[-]
E	Energie	[Joule]
h	Plancksches Wirkungsquantum	[J s]
Re	Reynoldssche Zahl	[-]
Re_t	Turbulente Reynoldssche Zahl	[-]
n_i	Teilchenzahl der Spezies i	[-]
m	Brechungsindex	[-]
$\Delta\Theta$	Beobachtungswinkel	[rad]
N	Ordnung der Hauptmaxima	[-]
u, v	Geschwindigkeitskomponenten	[m s ⁻¹]
ε	Abbildungseffizienz	[-]
A	Fläche	[cm ²]
S	Signalstärke	[-]
F	Mischungsbruch	[-]
Z_α	Massenbruch des Elements α	[-]
W_α	Atommasse des Elements α	[u]
Oh	Ohnesorge-Zahl	[-]
We	Weber-Zahl	[-]

l	charakteristische Länge	[m]
$\bar{\mu}$	molekulare Viskosität	[N s m ⁻²]
v'	Turbulenzintensität	[m s ⁻¹]
l_0	integrales Längenmass	[m]
R_l	turbulente Reynoldszahl	[-]
t_0	integrales Zeitmass	[s]
t_l	Zeit der chemischen Reaktion	[s]
l_l	Dicke der laminaren Flammenfront	[mm]
v_l	laminare Flammengeschwindigkeit	[m s ⁻¹]
Ka	Karlovitz-Zahl	[-]
t_k	Kolmogorov-Zeitskala	[s]
μ	kinematische Viskosität	[m ² s ⁻¹]
$\tilde{\varepsilon}$	Dissipationsgeschwindigkeit	[m ² s ⁻³]
v_t	turbulente Ausbreitungsgeschwindigkeit	[m s ⁻¹]
A_L	Fläche laminare Flammenfront	[cm ²]
A_T	Fläche turbulente Flammenfront	[cm ²]
m	Masse	[g]
ε	Dissipationsrate der turbulenten Energie	[m ² s ⁻³]
k	turbulente kinetische Energie	[m ² s ⁻²]

Verwendete Abkürzungen

Nd:YAG	Neodymium Yttrium - Aluminium - Granat
ICCD	Intensified Charge Coupled Device
PDF	Probability Density Function
CFD	Computational Fluid Dynamics
ILDm	Intrinsic Low Dimensional Manifold
CARS	Coherent Anti-Stokes Raman - Spektroskopie
LIF	Laserinduzierte Fluoreszenz
cw	continuous wave

1 Einleitung

Turbulente Verbrennungsprozesse werden vielfältig in der Technik eingesetzt. Sie dienen im allgemeinen zur Gewinnung von mechanischer oder elektrischer Energie und werden über die Freisetzung von thermischer Energie und geeigneten Technologien gewonnen (Abb. 1).

Die thermische Energie ist ein Produkt in Folge einer exothermen chemischen Reaktion und hängt im Betrag wesentlich von ihren Reaktanden, d.h. von Brennstoff und Oxidationsmittel, der Gasgemischzusammensetzung sowie von der Geometrie von Brennkammern und der Gasströmung ab (Kap. 2.1). Das Oxidationsmittel ist Sauerstoff, das in der Regel aus der Luft bezogen wird. Beim Brennstoff lässt sich in Bezug auf die physikalischen Eigenschaft in

- gasförmigen (Ein-Phasen-Verbrennung),
- flüssigen (Zwei-Phasen-Verbrennung) oder
- festem Brennstoff

unterscheiden. Die wichtigsten Technologien zur Energieumwandlung bei gasförmigen Brennstoffen sind beispielsweise die Gasturbinen und Düsentriebwerke. Ihr zugrundeliegender turbulenter Verbrennungsprozess entspricht der einer *nicht-vorgemischten Flamme*, d.h. Brennstoff und Oxidationsmittel vermischen sich erst am Ort der Verbrennung. Die Umsetzung nicht-vorgemischter Flammen erfolgt über Brenner, die auf den gewünschten Technologieprozess abgestimmt sind, um die maximale Verbrennungseffizienz zu erreichen. Beispiele hierfür sind Gegenstrom- und Drallflammen. Letztere werden in industriellen Kraftwerkskesseln und Industriedampferzeugern eingesetzt sowie im kleineren Massstab als Gebäudeheizungsbrenner. Nicht-vorgemischte Flammen werden nicht zuletzt aus sicherheitstechnischen Gründen gegenüber vorgemischten Flammen im technischen Einsatz bevorzugt. Bei der turbulenten *vorgemischten Flamme* dagegen werden Brennstoff und Oxidationsmittel vor dem Verbrennungsprozess in einem bestimmten Verhältnis zusammengeführt und nach Austritt aus dem Brenner entzündet. Die Stabilisierung einer turbulenten Vormischflamme erfolgt entweder über eine Rezirkulationszone, wie sie in den Arbeiten von [MBF⁺96, Ste02] angewandt wurden. Das zirkulierende heiße Gas im Innern des Flammenhalses versorgt das nachströmende Frischgasgemisch mit der notwendigen Energie, um die Flamme zu stabilisieren. Eine andere Methode zur Flammenstabilisierung erfolgt über eine Stütz- (Pilot-) Flamme. Sie umschließt den vorgemischten Hauptstrahljet und gewährleistet so einen stabilen Flammenverlauf. Die chemischen Reaktionen finden in der Flammenfront statt, die das Frischgas vom verbrannten Gas trennt. Vorgemischte Flammen haben den Vorteil, dass sie auf kleinstem Raum eine effektive Verbrennung gewährleisten und wegen ihrer sehr hohen Leistungsdichte meist hohturbulent eingesetzt werden [Bar97].

Verbrennung von Stoffen als Lieferant von
Thermischer Energie

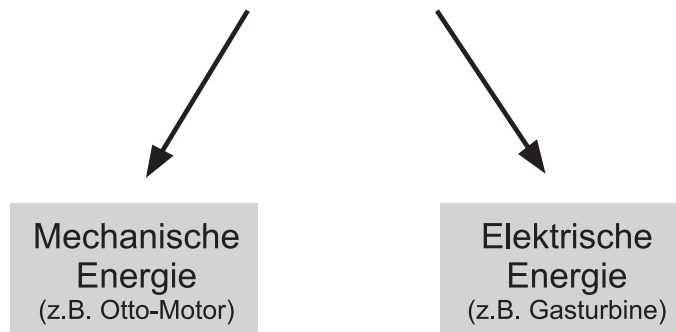


Abb. 1: Schematische Darstellung der Energiegewinnung über die Verbrennung.

Mit flüssigem Brennstoff werden Energieumwandlungsmodelle verwendet, wie man sie bei der motorischen Verbrennung wiederfindet. Am Beispiel des Otto-Motors wird das Zwei-Phasen-System von flüssigem Kraftstoff und Luft in der Ansaugphase möglichst homogen vermischt, das nach der Kompression entzündet wird. Ein hoher homogener Vermischungsgrad wird unter Berücksichtigung strömungsmechanischer Effekte durch die Oberflächengeometrie des Kolbens erreicht, um eine möglichst vollständige Verbrennung anzustreben.

Um ein eindringlicheres Verständnis von der turbulenten Verbrennung zu bekommen, werden Verbrennungsmechanismen aus dem industriell-angewandten Bereich nachempfunden und im labor-technisch angepassten Massstab experimentell untersucht. In der vorliegenden Arbeit wird deshalb die turbulente Verbrennung an einer vorgemischten Freistrahlf Flamme, die durch eine laminare Pilotflamme gestützt wird, durchgeführt. Vormischflammen eignen sich wegen ihrer experimentellen Zugänglichkeit für experimentelle Untersuchungen vorzüglich. Die Realisierung der Freistrahlf Flamme erfolgt über einen Brennerkopf, der an die bestehende Brennervorrichtung angepasst und den Anforderungen entsprechend konzipiert wurde. Das Gasgemisch der Hauptflamme ist eine Kombination aus Erdgas (CH_4) und Luft (N_2 und O_2) mit einem Äquivalenzverhältnis von $\Phi_{\text{FF}} = 0.95$, die die zur Zündung notwendige thermische Energie von einer umgebenden Pilotflamme ($\Phi_{\text{Pilot}} = 1.15$) bezieht. Gasgemischzusammensetzungen und Volumenströme von Pilot- und Hauptflamme sind so aufeinander abgestimmt, dass eine stabile Flammenkonfiguration unter labortechnischen Bedingungen gewährleistet ist.

Mit der Zuführung von Kraftstoff in Form von Tröpfchen in einer Tropfenkette wird die turbulente Freistrahlf Flamme um einen weiteren Phasen-Freiheitsgrad erweitert. Der zugeführte flüssige Kraftstoff erweitert die bisherige Konfiguration zu einem Zwei-Phasen-System. Die durch den Kraftstoff Ethanol hervorgerufenen geänderte Produktbildung soll sich im Vergleich zur turbulenten Freistrahlf Flamme in Ein-Phasen-Betrieb in Regionen, die sich durch heisse Temperaturen auszeichnen, manifestieren. Beide Flammenkonfigurationen wurden mit dem Messverfahren,