Abschlussbericht

Final Report

Reaktorsicherheitsforschung – Vorhaben-Nr.: 1501642

Reactor Safety Research – Project No.: 1501642

Vorhabenstitel: Bestimmung von Charakteristiken langsamer bis schneller H2-CO-Verbrennung und Ableitung von Risikokriterien (KEK)

Project Title: Determination of characteristics of slow to fast H2-CO combustion and derivation of risk criteria (KEK)

Authoren / Authors: K. Planötscher, Prof. Dr.-Ing. A. Jocher

Organisation: Professur für Sustainable Future Mobility, Technische Universität München

Berichtsdatum / Date: 17.07.2025

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz
und nukleare Sicherheit

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit unter dem Förderkennzeichen 1501642 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Kurzbericht

In Unfallszenarien von Kernkraftwerken, die mit dem Verlust des Kühlmittels einhergehen, können durch chemische Reaktionen im Reaktordruckbehälter H_2 und CO entstehen. Wenn diese Brennstoffe dem Containment entweichen, sich mit der Luft des Reaktorgebäudes vermischen und so eine brennbare Mischung bilden, ist die strukturelle Integrität des Reaktorgebäudes potentiell gefährdet. Um die Risiken einer unkontrollierten Verbrennung abschätzen zu können, ist ein umfassendes Verständnis von H_2-CO-Luft Flammen erforderlich. Nach aktuellem Wissensstand werden die Ausbreitungsgeschwindigkeiten von H_2-CO-Luft Flammen zu Beginn und unter mageren Bedingungen jedoch systematisch unterschätzt. Ziel des Projekts war es deshalb die Flammengeschwindigkeiten und -beschleunigungen von H_2-CO-Luft-Flammen kurz nach der Zündung experimentell zu bestimmen und den Einfluss von intrinsischen Verbrennungsinstabilitäten auf die Flammenbeschleunigung zu untersuchen.

Die Experimente wurden in der GraVent-Anlage der Technischen Universität München durchgeführt. Die GraVent besitzt einen Querschnitt von 300 x 60 mm und ist durch ihren modularen Aufbau in ihrer Länge variabel. Zur Untersuchung magerer H_2-CO-Luft Flammen musste die Sensorik der GraVent-Anlage angepasst werden. So wurden sensitivere Ionisationssensoren zur Detektion von Flammenfronten konstruiert und in Reihe eingebaut, um die bei früheren Experimenten verwendeten weniger lichtempfindlichen Photodioden zu ersetzen. Dadurch konnten die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Flammenfronten in mageren H_2-CO-Luft Flammen gemessen werden. Die bei der Verbrennung entstehenden Drücke wurden durch dynamische Drucksensoren aufgenommen. Durch den Einsatz von OH-PLIF wurden detaillierte Informationen zur Struktur der Flammenfronten gewonnen, um u.a. den Einfluss von intrinsischen Verbrennungsinstabilitäten auf die Flammenbeschleunigung zu untersuchen. So stand zum Beispiel der Wrinkling-Faktor im Fokus, welcher ein Maß für die Vergrößerung der Flammenfrontoberfläche durch intrinsische Verbrennungsinstabilitäten darstellt. Untersucht wurden in den Experimenten Brennstoffmischungen mit 50/50 bzw. 75/25 H_2/CO Mischungen bei Konzentrationen zwischen 13 und 29,5 Vol.-% Brennstoff in Luft.

Die wesentlichen Ergebnisse der OH-PLIF Experimente zeigen eine signifikante Abhängigkeit der Flammenausbreitungsgeschwindigkeit und -beschleunigung von der Brennstoffzusammensetzung und -konzentration. Höhere Brennstoffkonzentrationen führten bei den untersuchten Mischungen auch zu höheren Geschwindigkeiten der Flammenspitze. Für die Beschleunigung der Flammenspitze gilt dies zunächst ebenfalls. Bei steigenden Brennstoffkonzentrationen bis zu 25 Vol.-% wurde stets auch eine Erhöhung der Beschleunigung der Flammenspitze beobachtet. Bei weiterer Erhöhung der Brennstoffkonzentration hin zur Stöchiometrie wurde in beiden untersuchten Mischungen jedoch eine Verringerung der Beschleunigung gemessen, was auf einen Trade-Off zwischen der Reaktivität der Brennstoffmischung und der Oberflächenvergrößerung durch intrinsische Instabilitäten hindeutet. Im Bezug auf die Brennstoffzusammensetzung wurde beobachtet, dass höhere H_2-Anteile im Brennstoff zu einer Erhöhung der Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Flammen führten. Dies lässt sich wahrscheinlich durch die erhöhte laminare Brenngeschwindigkeit der Brennstoffmischung durch die Zugabe von H_2, erklären. Ebenso konnte die Analyse der Flammentopologie die Bedeu-

tung kleinskaliger Strukturen in der Flammenfront zeigen. Die kleinskaligen Strukturen entstehen in der Regel durch intrinsische Verbrennungsinstabilitäten und können das Ausbreitungsverhalten der Flammenfront erheblich beeinflussen. Magere Gemische wiesen hierbei eine stärkere Faltung der Flammenfront auf als fette Gemische, was auf einen erhöhten Einfluss von intrinsischen Verbrennungsinstabilitäten auf magere Flammen hinweist.

Neben den OH-PLIF Experimenten sollte die Flammenbeschleunigung über eine Distanz von 6 m mittels Ionisationssensoren gemessen werden, was aufgrund verschiedener Faktoren nicht durchgeführt werden konnte. Ein wesentliches Problem bei den Experimenten stellte die unzureichende Sensitivität der konstruierten Ionisationssensoren dar, insbesondere bei der Detektion magerer Brennstoff-Luft-Mischungen. Zusätzliche Herausforderungen ergaben sich aus der ständigen Verschmutzung der Sensoren durch Verbrennungsprodukte. Zur Lösung dieser Probleme wurden verschiedene Ansätze skizziert, darunter die Neukonstruktion der Sensoren und der Gasversorgung oder die Nutzung von sensitiveren Photodioden.

Zusammenfassend wurde in diesem Projekt die Verbrennung von H_2-CO-Luft Mischungen untersucht. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Geschwindigkeit und die Beschleunigung der Flammenspitze gelegt. Zusätzlich wurde der Einfluss von intrinsischen Verbrennungsinstabilitäten auf die Vergrößerung der Flammenfront untersucht. Das Projekt erweiterte dabei das Wissen über H_2-CO-Luft Verbrennungen und stellte Daten zur Validierung von CFD Codes bereit. Dadurch leistete das Projekt einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Modellierung und Sicherheitsbewertung von H_2-CO-Luft Verbrennungen und unterstützt somit die Verbesserung der nukleare Sicherheit.

Abstract

In nuclear power plant accident scenarios that involve loss of coolant, H_2 and CO might be produced by chemical reactions in the reactor pressure vessel. If these flammable substances escape the containment, they might mix with the air of the reactor building and consequently form a flammable mixture, which potentially risks the structural integrity of the reactor building. In order to be able to assess the risks of uncontrolled combustion, a comprehensive understanding of H_2-CO-air combustion is required. According to the current state of knowledge, the initial propagation speeds of H_2-CO-air flames under lean conditions are systematically underestimated. Therefore, the aim of the project was to experimentally determine the flame speeds and accelerations of H_2-CO-air flames shortly after ignition. Additionally, the influence of intrinsic combustion instabilities on flame acceleration were to be investigated.

The experiments have been carried out in the GraVent test rig at Technical University of Munich (TUM). The GraVent has a cross section of 300 x 60 mm and is variable in length due to its modular construction. To investigate lean H_2-CO-air flames, the measurement technique of the GraVent had to be adapted. To do so, the installed photodiodes have been replaced by more sensitive ionisation sensors. The latter have been designed and installed and were able to detect speeds and accelerations of flame fronts for especially lean mixtures. The pressures resulting from combustion were recorded by dynamic pressure sensors. Additionally, by using OH-PLIF, detailed information about the structure of the flame fronts was obtained, among other things, to examine the influence of intrinsic combustion instabilities on the flame and to investigate flame acceleration further. For example, a focus was set on the wrinkling factor, which is a measure for the increase in flame front surface due to intrinsic combustion instabilities. The experiments examined fuel mixtures with 50/50 or 75/25 H_2/CO mixtures at concentrations between 13 and 29.5 vol.-% of fuel in air.

The main results of the OH-PLIF experiments show a significant dependence of the flame propagation speed and acceleration on the fuel composition and concentration. In the examined mixtures, higher fuel concentrations resulted in higher flame tip speeds. For the acceleration of the tip of the flame this also applies initially. With increasing fuel concentrations up to 25 vol.-%, an acceleration of the flame tip was also observed. With further increasing fuel concentration towards stoichiometry, it was observed for both mixtures that the acceleration value reduced. This observation suggests a trade-off between the reactivity of the fuel mixtures and the surface area expansion due to intrinsic instabilities. In relation to the fuel composition, it was observed that a higher concentration of H_2 in the fuel led to increased speeds and accelerations of the flame tips. This might be explained by the increased laminar burning rate of the fuel mixture when adding H_2. Besides, the analysis of the flame topology showed the important influence of the small scale structures on the flame front. Usually, the small scale structures arise due to intrinsic combustion instabilities and can heavily influence the propagation of the flame front. Leaner mixtures showed a stronger flame front folding, which suggests an increased influence of intrinsic instabilities on lean flames compared to rich ones.

In addition to the OH-PLIF experiments, the flame acceleration should have been measured over a distance of 6 m using ionization sensors. Unfortunately, this could not be carried out within the

framework of the project due to various factors. A major challenge in the experiments was the insufficient sensitivity of the constructed ionization sensors, especially when detecting lean fuel-air mixtures. Additional challenges arose from the constant contamination of the sensors by combustion products within the GraVent. To solve these problems, various approaches were discussed, including the redesign of the sensors and the gas supply or the use of more sensitive photodiodes.

In summary, this project investigated the combustion of H_2-CO-air mixtures. Particular attention was paid to the speed and acceleration of the flame tip. In addition, the influence of intrinsic combustion instabilities was examined for the enlargement of the flame front. The project expanded state-of-the-art knowledge on H_2-CO-air combustion and provided data to validate CFD codes. Therefore, the project contributed to the enhancement of modeling tools and the safety evaluation of H_2-CO-air combustion and in a broader scope to the improvement of nuclear safety.

Eingehende Darstellung

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis I

Abbildungsverzeichnis III

Tabellenverzeichnis III

1 Zielsetzung 1

2 Stand von Wissenschaft und Technik sowie Vorarbeiten 2

3 Arbeitsprogramm 3

3.1 Anpassung der Anlage und der Messtechnik 4

3.2 Experimente zur Flammentopologie bei H_2-CO-Luft Mischungen 4

3.3 Aufarbeitung der Ergebnisse und Bereitstellung der Validierungsdaten 4

3.4 Experimente zur Untersuchung der Flammenbeschleunigung 4

4 Durchgeführte Arbeiten 5

4.1 Experimenteller Aufbau 5

4.1.1 Ablauf der Experimente 6

4.1.2 Experimente zur Flammentopologie 7

4.1.3 Experimente zur Untersuchung der Flammenbeschleunigung und zur Findung des σ-Kriteriums 8

4.2 Datenverarbeitung 8

4.2.1 Flammenfrontdetektion 8

4.2.2 Geschwindigkeits- und Beschleunigungsbestimmung aus OH-PLIF Daten . . . 9

4.2.3 Messung der Geschwindigkeit der Flammenspitze durch Ionisationssensoren . 10

5 Ergebnisse 10

5.1 OH-PLIF Experimente 10

5.1.1 Geschwindigkeit und Beschleunigung der Flammenspitze 11

5.1.2 Morphologie der Flammenfront 12

5.1.3 Wrinkling Faktor 14

5.2 Flammenbeschleunigungsexperimente mit konventionellen Messmethoden 16

6 Veröffentlichungen und geplante Veröffentlichungen 17

6.1 ISHPMIE 2024 17

6.2 Geplante weitere Veröffentlichungen 17

7 Zusammenfassung und Ausblick 18

Literatur 19

Abbildungsverzeichnis

1 Skizze der GraVent Anlage (GraVent) in der vollen Länge. 5

2 Druckverlauf in der GraVent während eines Experimentes. 6

3 Skizze des GraVent Aufbaus für die OH-PLIF Experimente. 7

4 Detektion der Flammenfront und Konstruktion der glatten Flammenfront. 9

5 Geschwindigkeiten der Flammenspitze von 100/0, 75/25 und 50/50 H_2-CO-Luft Mischungen. [1] 11

6 Beschleunigung der Flammenspitze von 75/25 und 50/50 H_2-CO-Luft Mischungen. . . 12

7 Detektion der Flammenfront und Konstruktion der glatten Flammenfront. 13

8 Ξ von 75/25 und 50/50 H_2-CO-Luft Mischungen unterschiedlicher Brennstoffkonzentrationen. 15

Tabellenverzeichnis

1 Standardabweichungen von a_{FT} in [$\mathrm{m\,s^{-1}}$] 12

1 Zielsetzung

Im Betrieb von Kernkraftwerken kann es unter bestimmten Umständen zu Ereignissen mit einem Verlust des Kühlmittels, sogenannt „loss of coolant accident (LOCA)“ kommen. Ein LOCA ist ein schwerwiegendes Ereignis, bei dem ein Bruch oder Leck im Kühlmittelkreislauf einen temporären Kühlmittelverlust hervorruft und dadurch die Funktion des Reaktorkühlsystems beeinträchtigt wird. Ohne eine effektive Kühlung steigt die Temperatur des Wassers im Reaktordruckbehälter (RDB) des Druckwasserreaktors auf Temperaturen von etwa 900 °C, was zur Verdampfung des restlichen Wassers im Kühlkreislauf führt. Dadurch können eine Reihe chemischer Reaktionen ablaufen, die die Sicherheit des Systems gefährden können. Ein zentrales Problem in solchen Szenarien ist die mögliche Bildung von Synthesegas, das hauptsächlich aus Wasserstoff (H_2) und Kohlenmonoxid (CO) besteht. Diese Bildung könnte folgendermaßen ablaufen: aufgrund der hohen Temperaturen in der „in-vessel“-Phase reagiert der Wasserdampf des Kühlkreislaufs im RDB mit den Brennstäben, die üblicherweise mit Zirkon ummantelt sind. Bei dieser exothermen Reaktion von H_2O und Zr werden große Mengen H_2 freigesetzt. Die Gleichung lässt sich wie folgt beschreiben:

$$\mathrm{Zr} + 2\,\mathrm{H_2O} \longrightarrow \mathrm{ZrO_2} + 2\,\mathrm{H_2} \tag{1}$$

Aufgrund der thermischen Belastung kann anschließend der RDB versagen, was den Beginn der „ex-vessel“-Phase definiert und zum Austreten der heißen Schmelze aus dem RDB führt. Dadurch reagiert die heiße Schmelze mit den Betonstrukturen unterhalb des RDB. In der jetzt ablaufenden „Molten-Core-Concrete Interaction“ entstehen neben weiterem H_2 große Mengen CO. Die Mischung aus H_2 und CO Gas kann anschließend aufgrund von Leckage und durch Überdruckventile in das Reaktorgebäude gelangen, in dem sich die Gasmischung mit der Luft des Reaktorgebäudes vereinigt. Das resultierende Synthesegasgemisch ist hochentzündlich und kann bei Zündung Explosionen verursachen, die die strukturelle Integrität des Containments gefährden. Um eine solche Kettenreaktion zu verhindern, stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Zum Beispiel kann durch den Einsatz von autokatalytischen Rekombinatoren der durch die chemischen Reaktionen entstehende Wasserstoff abgebaut werden, oder die Atmosphäre in den einzelnen Containments kann inertisiert werden, um eine Zündung des Synthesegases zu verhindern. Außerdem können Druckentlastungssysteme in die Kernkraftanlagen integriert werden, damit kritische Drucklasten auf die Gebäude vermieden werden und damit Unfallgase sicher aus dem Containment geleitet werden können. Nach den Erfahrungen mit dem Unfall im Kernkraftwerk Fukushima Daiichi muss allerdings resümiert werden, dass selbst diese Reihe von Sicherheitsmaßnahmen potentiell nicht ausreicht, um eine Gasexplosion zu verhindern. Damit bedeutet die Bildung der großen Mengen von H_2 und CO ein erhebliches Explosionsrisiko, wodurch die Verbrennungsvorgänge von H_2 und CO Teil der Sicherheitsanalyse von möglichen Unfallszenarien in Kernkraftwerken werden. Ein wichtiger Beitrag für die Sicherheitsanalyse von Unfallszenarien in Kernkraftwerken sind numerische Simulationen. Wegen der räumlichen Größe von Kernkraftanlagen ist man hier zur Diskretisierung der relevanten Volumina gezwungen. Um trotzdem möglichst genaue Vorhersagen mit vorhandenen Rechenzeitkapazitäten tätigen zu können, müssen kleinskalige Verbrennungsphänomene untersucht und modelliert werden.

Eine vollständige Auflösung dieser Phänomene ist mit momentanen Kapazitäten nicht durchführbar. In einem Vorgängerprojekt wurden zur Unterstützung der Modellbildung schon Experimente mit H_2-Luft Gemischen durchgeführt [2]. Die Modellierung für H_2-Luft Gemische ist bereits komplex, wird jedoch durch das zusätzliche CO im Brennstoff, welches z.B. bei „Molten-Core-Concrete Interaction“ entsteht, noch anspruchsvoller. Insbesondere der Einfluss intrinsischer Verbrennungsinstabilitäten wie der thermo-diffusiven (TD) oder der Landau-Darrieus (LD) Instabilität, welchen zu Beginn der Flammenbeschleunigung ein bedeutender Einfluss zukommt, sind ein nur schwer in Modellen abzubildender Parameter. Dies kann zu Fehleinschätzungen über das Ausbreitungsverhalten der H_2-CO-Luft Flammen führen, wodurch in der Praxis die Flammenbeschleunigung und die daraus resultierenden Drucklasten unterschätzt werden können. Um die bestehenden Verbrennungsmodelle zu verbessern, fehlen allerdings Flammenbeschleunigungsstudien, deren Daten zur Modellverbesserung verwendet werden können [3].

Die Untersuchung von Synthesegasexplosionen in LOCA-Szenarien ist daher von entscheidender Bedeutung für die Sicherheit von Kernkraftwerken. Die Ziele dieses Vorhabens waren die Bestimmung von Charakteristiken der langsamen bis schnellen Verbrennungen von mageren bis stöchiometrischen H_2-CO-Luft Gemischen, die Bereitstellung experimenteller Validierungsdaten zur Erstellung und Verbesserung von Verbrennungsmodellen sowie die Ableitung des Sigma-Kriteriums für den Übergang von langsamer zu schneller Verbrennung. Damit können effektive Präventions- und Kontrollmaßnahmen entwickelt werden, um das Risiko von Explosionen zu minimieren und den sicheren Betrieb von Kernkraftwerken auch in Unfallszenarien zu gewährleisten.

2 Stand von Wissenschaft und Technik sowie Vorarbeiten

CO spielt bei der sicherheitstechnischen Bewertung von Entflammbarkeitsgrenzen, Zündtemperaturen, Abbrandgeschwindigkeiten und Detonierbarkeit eine wichtige Rolle, z.B. NEA-Bericht [4]. Der allgemeine Mangel an Forschungsarbeiten zur Verbrennung von H_2-CO-Luft Gemischen erklärt sich aus der Tatsache, dass das „dual fuel“ System H_2-CO bisher kaum als Brennstoff verwendet wurde [4] und die Relevanz lange Zeit auf Prozessanlagen oder die nukleare Sicherheit beschränkt war. Die Vermessung der laminaren Flammengeschwindigkeiten durch Friedrich [5] bildet hierbei eine Ausnahme. Im nuklearen Bereich steht aufgrund der typischen Anlagengröße die Flammenbeschleunigung in großen Volumina im Fokus. Die Flammenbeschleunigung unter solchen Bedingungen wurde ausführlich für H_2-Luft [6] untersucht. Die erwähnten Studien haben gezeigt, dass die intrinsischen Flammeninstabilitäten zu einer Flammenfaltung führen können, die eine typische Selbstbeschleunigung der Flamme zur Folge hat. Unbegrenzte H_2-CO-Luft-Deflagrationen wurden von Cai et al. [7] untersucht, wo ein ähnlicher Flammenbeschleunigungseffekt aufgrund von Instabilitäten auftritt. Von Veser et al. [8] wurden magere H_2-CO-Luft Gemischen (10-15 vol.-%) in einem horizontalen Kanal bei einer gleichbleibenden Hinderniskonfiguration untersucht. Offene Fragen im Bereich der H_2-CO-Luft-Deflagrationen bleiben jedoch bestehen, vor allem hinsichtlich des Einflusses, den die Zugabe von CO auf TD- und LD-Instabilitäten hat [9]. Während der Projektlaufzeit haben Wehrmann und Kollegen [**?**] TD- und LD-Instabilitäten in H_2-CO-Luft Gemischen anhand von numerischen Simulationen eingehend untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Substitution von H_2 mit CO die TD Effekte

verstärkt, während das Zusetzen von CO zu H_2 zu einer Verminderung führt. Die genannten offenen Fragen werden in diesem Projekt aufbauend auf den bisherigen Arbeiten untersucht.

Die experimentelle und theoretische Forschung auf dem Gebiet der sicherheitsrelevanten Verbrennung hat an der TUM eine lange Tradition. Das Projekt 1501338 war der Ausgangspunkt für die Erforschung von FA und DDT von H_2-Luft-Gemischen. Hierfür wurde der GraVent-Prüfstand aufgebaut und experimentelle Untersuchungen zur DDT für homogene und vertikal geschichtete Gemische durchgeführt [10]. In einem weiteren Projekt 1501425 wurde ein laserbasiertes spektrographisches Verfahren (OH-PLIF) mit einer hohen Bildaufnahmefrequenz implementiert. Neben geschichteten und homogenen H_2-Luft-Gemischen wurden auch H_2-H_2O-Luft-Gemische untersucht [11]. Im Gegensatz zu den vorangegangenen Arbeiten befasste sich KEK-Projekt 1501485 mit langsamen Flammen in H_2-Luft-Gemischen, z.B. kurz nach der Zündung. Die Bestimmung der Flammentopologie mit Hilfe von OH-PLIF führte zur Ableitung eines semi-empirischen Verbrennungsmodells, das den Einfluss von intrinsischen Instabilitäten (TD und LD) auf die Flammenbeschleunigung im Frühstadium erfasst [12]. Das Projekt 1501545A untersucht den Einfluss von vertikalen Konzentrationsgradienten und Hindernisgeometrien auf schnelle Flammen und DDT in H_2-CO-Luftgemischen. Aufgrund der Fokussierung auf DDT wurde hierbei experimentell ein Brennstoffgehalt von 15-40 vol.-% abgedeckt. H_2-CO-Experimente zeigten, dass im Vergleich zu reinen H_2-Luft-Gemischen bei gleichem Brennstoffanteil höhere Spitzendrücke auftreten können [13]. Damit wurde die Bedeutung der Berücksichtigung von CO im Rahmen der Reaktorsicherheit weiter verdeutlicht. Parallel zu den experimentellen Bemühungen wurde im Projekt 1501338 an der TUM ein für den Reaktormaßstab anwendbarer CFD-Ansatz entwickelt [14]. Der Schwerpunkt der Arbeiten lag auf der DDT und der Auflösung von gasdynamischen Effekten, die für schnelle Flammen relevant sind. Die Anwendung des Solvers auf großräumige Probleme erfolgte im Projekt 1501425 [15], in dem die Flammenausbreitung als dünne Diskontinuität eingeführt wurde. Numerische Arbeiten im Projekt 1501545A [16] erweiterten das obige Framework auf H_2-CO-Luft-Gemische. Das CFD-Framework wurde im Rahmen des KEK-Projekts 1501573 auf langsame Flammenregime erweitert. Dabei wird der Einfluss der CO Zugabe auf die intrinsischen Instabilitäten langsamer Flammen aufgrund mangelnder Vergleichsexperimente im Brenngesetz nicht explizit berücksichtigt. Der Mangel sollte in diesem Vorhaben behoben werden. Das KEK-Projekt 1501573 diente daher als Andockstelle für das bearbeitete KEK-Projekt an eine laufende Forschungsaktivität der TUM sowie der Partnereinrichtung UniBW. Gleichwohl war eine klare Abgrenzung bisheriger Aktivitäten gegenüber dem jetzigen KEK-Projekt gegeben (Vorarbeiten: langsame Deflagration in H_2 und FA, DDT und Detonation in H_2-CO vs. Beantragt: langsame bis schnelle Deflagration in H_2-CO).

3 Arbeitsprogramm

Alle Arbeiten wurden an der Professur für Sustainable Future Mobility der Technischen Universität München in Garching durchgeführt. Für die Experimente wurde die GraVent Anlage des Lehrstuhls für Thermodynamik verwendet, mit der bereits in der Vergangenheit eine Vielzahl an Flammenbeschleunigungsstudien sowohl für H_2-Luft, als auch für H_2-CO-Luft Brennstoffmischungen durchgeführt wurden [2, 17, 18, 19].

3.1 Anpassung der Anlage und der Messtechnik

Das vorhandene Messsystem der GraVent zur Positionsbestimmung der Flammenspitze bestand aus Photodioden und war auf H_2-Luft Flammen ausgelegt. Die nun untersuchten H_2-CO-Luft Flammen emittieren das bei der Verbrennung entstehende Licht allerdings in einem anderen Wellenlängenbereich als die H_2-Luft Flammen, die ursprünglich in der GraVent untersucht wurden. Besonders bei mageren H_2-CO-Luft Flammen war das von den Photodioden detektierte Signal sehr schwach, was einen Austausch der Photodioden hin zu Ionisationssensoren erforderlich machte. Die Ionisationssensoren mussten dafür konstruiert, getestet und in die vorhandenen Bohrungen der Photodioden montiert werden. Außerdem wurde die GraVent von 6 m Länge auf ein konventionelles Segment (KS) und ein optisches Segement (OS) mit insgesamt 1,6 m Länge verkürzt, analog zu einem Vorgängerprojekt [2]. Des Weiteren wurde ein Zündblock installiert, der es ermöglichte die Zündung im OS beobachten zu können und der die Länge der GraVent um weitere 0,3 m auf 1,3 m Gesamtlänge verkürzte. Durch die Verkürzung der Anlage kann bei der Simulation des Experiments stark an Rechenleistung gespart werden und die Funktionsweise der GraVent konnte mithilfe der Daten aus [2] validiert werden.

3.2 Experimente zur Flammentopologie bei H_2-CO-Luft Mischungen

Nach dem Umbau der GraVent wurden Experimente zur Untersuchung der Flammentopologie durchgeführt. Hierbei wurde das bei Katzy [2] verwendete OH-PLIF System verwendet, um die bereits vorhandenen Studien zu ergänzen, die schon konventionelle Messdaten sowie tiefenintegrierte Bilder des Flammenleuchtens bereitgestellt haben. Der Vorteil bei der Verwendung von OH-PLIF liegt in dem quasi-2-D Ausschnitt aus der Flammenfront, der es ermöglicht auch kleinskalige Strukturen in einer Flammenfront zu erkennen, die bei tiefenintegrierten Bildern vom Leuchten der restlichen Flamme überdeckt werden würden. Dabei wurden die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Spitze der Flammenfronten, Flammenfrontlängen sowie Wrinkling Faktoren von 50/50 und 75/25 H_2/CO Brennstoffmischungen bei Konzentrationen zwischen 10 Vol.-% und 29,5 Vol.-% bestimmt.

3.3 Aufarbeitung der Ergebnisse und Bereitstellung der Validierungsdaten

Die Experimente zur Flammentopologie wurden ausgewertet und die Ergebnisse veröffentlicht. Die Rohdaten wurden außerdem in der DDT Database des Lehrstuhls für Thermodynamik der Technischen Universität München öffentlich zugänglich gemacht [20]. Ein Vergleich der experimentellen quasi-2-D Daten mit hochaufgelösten 3-D Simulationen ist geplant, kann allerdings erst durchgeführt werden wenn die Simulationsdaten vorhanden sind.

3.4 Experimente zur Untersuchung der Flammenbeschleunigung

In einem weiteren Arbeitsschritt wurde die Flammenbeschleunigung im unblockierten Kanal bei Brennstoffkonzentrationen von unter 10 Vol.-% untersucht. Zu diesem Zweck wurde die GraVent auf eine Gesamtlänge von 6 m erweitert. Die neu hinzugefügten Segmente waren allesamt KSs, die mit

Drucksensoren und Ionisationssensoren ausgesattet waren. Die Brennstoffkonzentration ab der der Übergang von langsamen zu schnellen Flammen stattfindet, konnte so bestimmt werden.

4 Durchgeführte Arbeiten

4.1 Experimenteller Aufbau

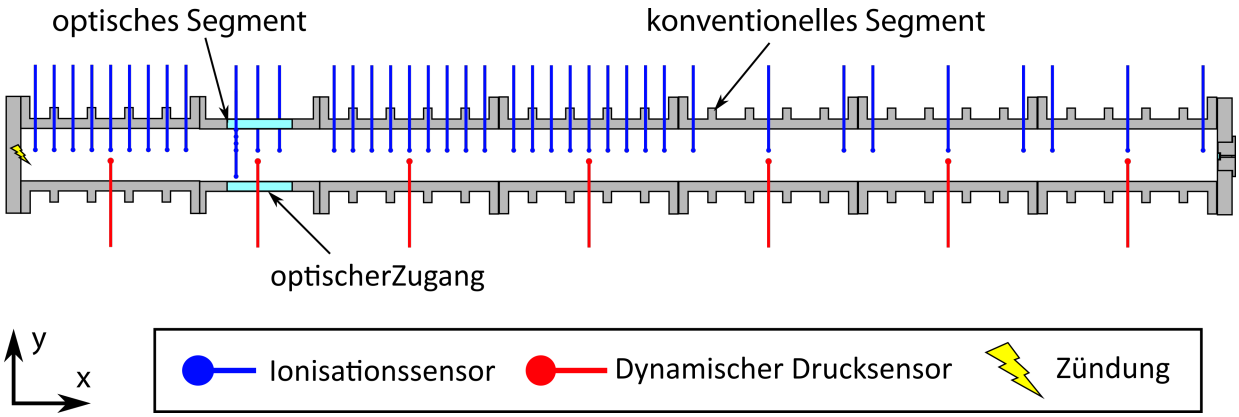

Abbildung 1: Skizze der GraVent in der vollen Länge.

Die GraVent ist ein modular aufgebauter Explosionskanal mit einem rechteckigen Querschnitt mit den Abmessungen 300 x 60 mm an der Technischen Universität München. Die GraVent setzt sich dabei je nach Aufbau aus bis zu 6 KSs mit einer Länge von jeweils 900 mm und einem OS mit 600 mm Länge zusammen, wie in Abbildung 1 gezeigt. Wird die GraVent in voller Länge aufgebaut, hat der Explosionskanal so eine Gesamtlänge von 6 m. Um die Flächen zwischen den einzelnen Segmenten der GraVent nach außen hin abzudichten wurde Silikon verwendet. Zur Abdichtung der Fenster des optischen Segmentes wurden Dichtungen aus Graphen eingebaut. Zur Aufnahme von konventionellen Messdaten sind in der GraVent Ionisationssensoren und dynamische Drucksensoren vom Typ Kistler 601 A verbaut. Die in Abbildung 1 blau dargestellten Ionisationssensoren dienen der Detektion der Flammenspitze und sind im vorderen Bereich der GraVent in einem Abstand von 100 mm innerhalb eines Segmentes positioniert. Dadurch ist es möglich die Position der Flammenspitze bis zu einer Länge von 3,3 m mit höher Auflösung zu bestimmen. Im hinteren Bereich der GraVent sind die Ionisationssensoren in einem Abstand von 300 mm montiert. Die Flamme bewegt sich hier schon mit sehr hohen Geschwindigkeiten, weshalb die Auflösung für die Bestimmung der Position verringert werden kann und so der Umfang an Messdaten verringert werden kann. Die in Abbildung 1 rot dargestellten dynamischen Drucksensoren sind in allen Segmenten mittig positioniert. Zusätzlich zu den konventionellen Messtechniken gewährt das OS auf einer Länge von 300 mm optischen Zugang, wodurch Verfahren wie Shadowgraphy und OH-PLIF angewendet werden können. Es besteht außerdem die Möglichkeit einen Zündblock so in die Anlage einzubauen, dass die Zündung in den Bereich des optischen Segmentes verschoben wird wodurch eine direkte Betrachtung von Zündphänomenen möglich wird. Optional können außerdem Hindernisse mit Blockierraten (BRs) in den Kanal eingefügt werden, um so den Einfluss von Turbulenz auf die Flammenausbreitung und -beschleunigung untersuchen zu können. Die Hindernisse werden mittels Senkkopfschrauben in Decke und Boden der

GraVent verankert. Durch die thermischen und mechanischen Belastungen während der Experimente werden die Gewinde der Schrauben jedoch so beansprucht, dass die Senkkopfschrauben sich im Material festfressen. Die einzige Möglichkeit die Schrauben anschließend entfernen zu können, um die GraVent warten zu können oder um Hindernisse zu tauschen, ist die Köpfe der Schrauben aufzubohren. Zu diesem Zwecke wurde eine Magnetkernbohrmaschine des Typs MAB 485N der Firma BDS Maschinen, als wichtige Position des zahlenmäßigen Nachweises angeschafft.

4.1.1 Ablauf der Experimente

Vor Beginn der Experimente wurden die benötigten Brennstoffmischungen im GraVent Labor hergestellt. Dafür wurde die Partialdruckmethode verwendet. Bei der Partialdruckmethode werden gasförmige Brennstoffmischungen durch das aufeinanderfolgende Einleiten von Gasen in einen evakuierten Behälter hergestellt. Dabei wird der gewünschte Partialdruck jedes Gases mit einem Manometer überwacht. Zunächst wurde eine 50 l Gasflasche evakuiert, um Luft oder andere Restgase zu entfernen. Die Gasflasche diente hierbei als Mischbehälter. Zuerst wurde H_2 bis zum gewünschten Druck in den Mischbehälter geleitet, bevor CO hinzugefügt wurde. Diese Reihenfolge erlaubt es, den größeren Impuls des CO für eine beschleunigte Durchmischung zu nutzen. Damit eine vollständige Durchmischung der Gase im Mischbehälter garantiert werden konnte, wurde mindestens 48 Stunden gewartet, bevor das Gasgemisch für Experimente verwendet wurde. Durch gaschromatische Messungen konnte im Vorgängerprojekt 1501545A ermittelt werden, dass man durch diese Methode Brennstoffmischungen mit einer Genauigkeit von 2 % herstellen kann.

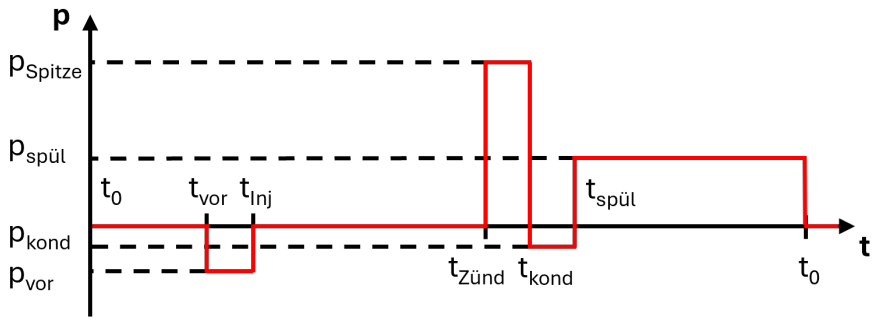

Abbildung 2: Druckverlauf in der GraVent während eines Experimentes.

Zur Verdeutlichung des experimentellen Ablaufs ist in Abbildung 2 der Druckverlauf in der GraVent während eines Experimentes dargestellt. Zu Beginn des Experimentes am Zeitpunkt t_0 ist die GraVent mit Luft bei Umgebungstemperatur und -druck gefüllt. Bei t_{vor} wird der Druck in der GraVent durch eine Vakuumpumpe auf ein Druckniveau unterhalb des Umgebungsdruckes abgesenkt. Zum Zeitpunkt t_{Inj} wird dann der Brennstoff in die Brennkammer injiziert. Die Wartezeit zwischen der Injektion des Brennstoffs und der Zündung zu $t_{zünd}$ wird als Diffusionszeit t_d bezeichnet und wird für die Durchmischung von Brennstoff und Luft benötigt. Für eine technisch vorgemischte Brennstoff-Luft-Mischung ist t_d = 60 s [13]. Damit das Experiment Gültigkeit besitzt, muss der Druck p_{nach} in der GraVent nach dem Ablauf von t_d mit einer Toleranz von $\Delta p = \pm$ 10 mbar wieder dem Umgebungsdruck entspre-

chen. Unter Verwendung von p_{vor}, p_{nach} und dem Umgebungsdruck p_∞ wird nach Gleichung 2 die Brennstoffkonzentration berechnet.

$$x_F = \frac{p_{vor} - p_{nach}}{p_\infty} \tag{2}$$

Nach dem Ablauf von t_d und der Bestimmung von p_{nach} erfolgt die Zündung zum Zeitpunkt $t_{Zünd}$, die den Start der 400 - 1000 ms langen Messung bei 225 kHz markiert. Der Druck steigt hier durch die Verbrennung erst stark an und sinkt dann, verursacht durch Kondensation von Wasser in der GraVent, bei t_{kond} unterhalb des Umgebungsdrucks. Um die GraVent wieder zum Ausgangszustand bei t_0 zu bringen, wird sie im Anschluss an jedes Experiment 4 Minuten lang bei einem Überdruck von ca. 500 mbar mit Druckluft durchspült.

4.1.2 Experimente zur Flammentopologie

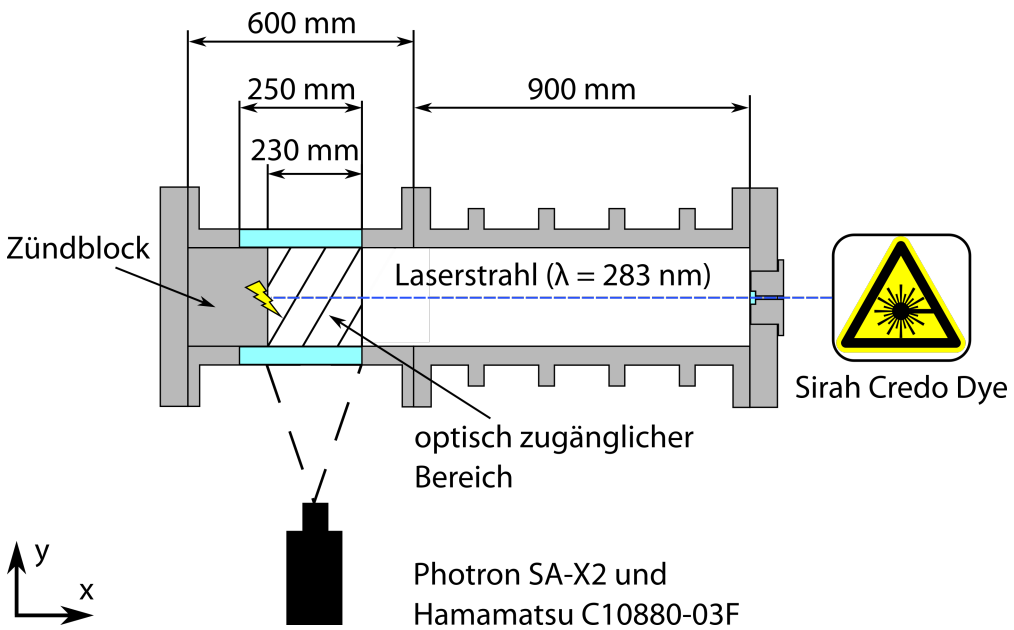

Abbildung 3: Skizze des GraVent Aufbaus für die OH-PLIF Experimente.

Im ersten Teil der experimentellen Untersuchungen wurde die GraVent aus dem OS mit eingebautem Zündblock an erster Stelle und einem KS aufgebaut. Die volle Kanallänge wird hierbei nicht benötigt, da zuerst die Beschleunigung der Flamme kurz nach der Zündung und die Topologie der Flammenfront in den ersten Phasen der Flammenbeschleunigung von Interesse sind. Durch die Verkürzung der GraVent wird das Volumen des Explosionskanals erheblich verringert, wodurch weniger Gas verbraucht wird und die Wartungsarbeiten reduziert werden. Außerdem wird der Simulationsaufwand für potentielle Simulationen der Experimente deutlich reduziert. Zur Messung der Geschwindigkeiten der Flammenspitze und für die Bestimmung der Länge der Flammenfront wurde OH-PLIF angewendet. Dazu wurde zur Anregung der OH Radikale ein gepulster Sirah Credo Dye Laser verwendet, der mit

einer Frequenz von 20 kHz und einer Wellenlänge von ca. 283 nm arbeitete. Die wurde hierbei immer wieder angepasst, weil Temperaturschwankungen im Labor die Austrittswellenlänge des Lasers beeinflussten und selbst minimale Änderungen von λ dazu führen können, dass die OH Radikale in der Flammenfront nicht angeregt werden. Die Aufnahme der Bilder erfolgt durch eine Photron SA-X2 in Verbindung mit einem Hamamatsu C10880-03F Bildverstärker, die ebenfalls bei einer Frequenz von 20 kHz operierten.

4.1.3 Experimente zur Untersuchung der Flammenbeschleunigung und zur Findung des σ-Kriteriums

Für die Experimente zur Untersuchung der Flammenbeschleunigung und zur Findung des σ-Kriteriums wurde die GraVent auf ihre volle Länge wie in Abbildung 1 dargestellt aufgebaut. Um die Position der Flammenspitze zu diskreten Zeitpunkten bestimmen zu können wurden Ionisationssensoren konstruiert und in die GraVent eingebaut. Die Ionisationssensoren bestanden aus einem Keramikstab mit zwei durchgängigen Löchern, die über den Umfang verteilt waren. Durch diese Löcher wurden Litzen gesteckt, auf die eine Spannung von 100 V zur Erzeugung des elektrischen Feldes der Ionisationssensoren aufgebracht wurden. Des weiteren waren die Ionisationssensoren mit einem Verstärker verbunden, welcher das Signal der Sensoren verstärkt hat und es im Anschluss an insgesamt vier Data Translation DT9836 Messkarten weitergeleitet hat. Diese Messkarten wurden mittels LabVIEW an einen PC angebunden, sodass die Daten der Ionisationssensoren ausgelesen werden konnten.

4.2 Datenverarbeitung

4.2.1 Flammenfrontdetektion

Im Folgenden wird die Nachbearbeitungsroutine für OH-PLIF-Bilder beschrieben, die ursprünglich von Katzy et al. [12] für H_2-Luft-Flammen entwickelt wurde und in dieser Arbeit weiterentwickelt wurde. Eine schematische Darstellung ist in Abbildung 4 zu sehen. Zunächst wird das rohe 8-Bit-Bild eines OH-PLIF Experimentes importiert. Aufgrund von möglichen Inhomogenitäten in der Verteilung des Laserlichts wurde eine Korrektur des vertikalen Laserlichtprofils durchgeführt (Abbildung 4a). Hierzu wird die mittlere Intensität jeder Zeile des Rohbildes berechnet. Anschließend wird der Kehrwert dieser mittleren Intensität mit der entsprechenden Zeile multipliziert, wodurch eine gleichmäßige Lichtintensität über die gesamte Kanalhöhe erreicht wird. Im nächsten Schritt (Abbildung 4b) werden die Bilder binarisiert, um die Anwendung binärer Kantenerkennungsalgorithmen zu ermöglichen. Dazu wird ein Schwellwert definiert: Pixel mit einem Wert unterhalb des Schwellwerts werden auf 0 gesetzt, während Pixel mit einem höheren Wert auf 255 gesetzt werden. Dies kann dazu führen, dass isolierte weiße Bereiche hoher Intensität entstehen, die nicht direkt mit der Flammenfront verbunden sind – sogenannte "weiße Inseln". Manche dieser weißen Inseln gehören zur Flammenfront und enthalten relevante Informationen über deren Struktur, während andere nicht Teil der Flammenfront sind und z. B. durch Rauschen entstehen. Im nächsten Schritt werden die weißen Inseln, die zur Flammenfront gehören, identifiziert (Abbildung 4c). Die relevanten Inseln werden an die nächstgelegene Stelle der Flammenfront angebunden, während die übrigen entfernt werden. Anschließend wird

die gefaltete Flammenfrontoberfläche A_{eff} mithilfe der MATLAB-Funktion *bwboundaries* bestimmt. Für die Berechnung des Wrinkling Faktors Ξ ist jedoch zusätzlich die glatte Flammenfrontoberfläche A_{smooth} erforderlich. Diese repräsentiert die Flammenfront, wie sie in aktuellen URANS-Simulationen modelliert wird, und wird durch Interpolation eines kubischen Splines basierend auf A_{eff} erzeugt (Abbildung 4d). Abschließend werden A_{eff} und A_{smooth} in das korrigierte Bild aus Abbildung 4a eingezeichnet, und die Analyseergebnisse werden für die weitere Nachbearbeitung gespeichert.

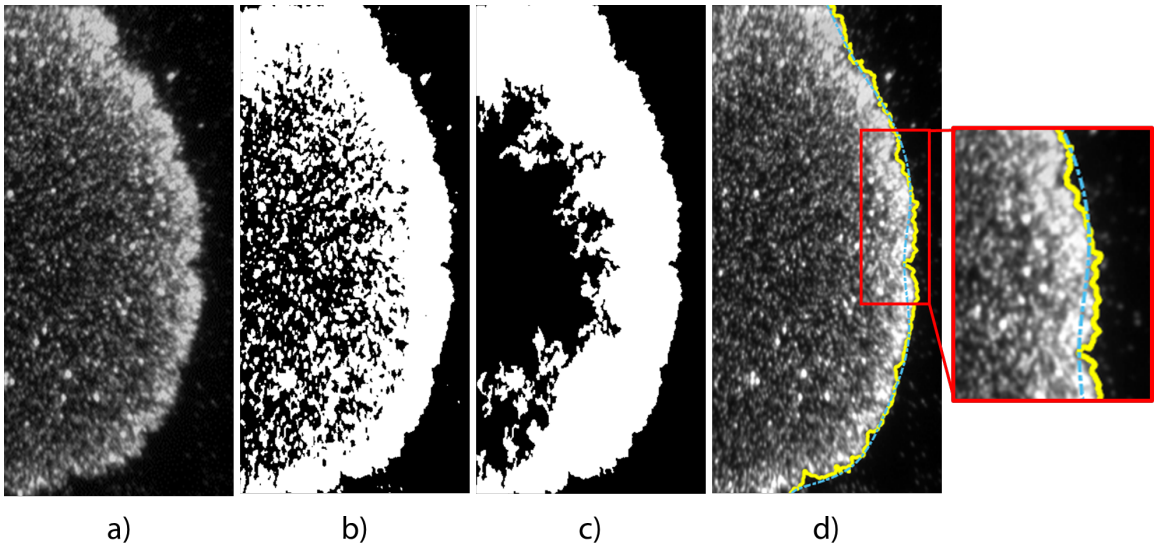

Abbildung 4: Detektion der Flammenfront und Konstruktion der glatten Flammenfront.

4.2.2 Geschwindigkeits- und Beschleunigungsbestimmung aus OH-PLIF Daten

Bei den Experimenten zur Flammentopologie wurde die Geschwindigkeit der Flammenspitze sowie der Wrinkling Factor Ξ der Flammenfront bestimmt. Dazu musste zuerst die Flammenfront in den Bildern detektiert werden. Dies geschah in mehreren Schritten in MATLAB unter der Nutzung der Image Processing Toolbox. Danach wurde anhand der detektierten Flammenfront die Position der Flammenspitze bestimmt. Die Flammenspitze wurde hier als am weitesten von der Zündung entfernter Punkt der Flammenfront in x-Richtung definiert. Zur Berechnung der Geschwindigkeit der Flammenspitze v_{FT} wurde anschließend die Differenz der Positionen der Flammenfront von zwei zeitlich aufeinanderfolgenden Bildern mit der Frequenz des Kamerasetups von 20 kHz multipliziert (3).

$$v_{FT} = (x_{n+1} - x_n) \cdot f_{Kamera} \tag{3}$$

Zur Berechnung von Ξ war außerdem die Bestimmung einer glatten Flammenfront notwendig, welche die Länge der Flammenfront ohne den Einfluss von kleinskaliger Faltung der Flammenfront darstellt. Die Berechnung der glatten Flammenfront basiert auf der Bildung eines Splines durch mehrere konstruierte Stützpunkte und wurde detailliert von Katzy beschrieben [12]. Ξ stellt nun den Quotienten

aus der Länge der detektierten, gefalteten Flammenfront und der Länge der glatten Flammenfront dar (4).

$$\Xi = \frac{A_{eff}}{A_{smooth}} \tag{4}$$

4.2.3 Messung der Geschwindigkeit der Flammenspitze durch Ionisationssensoren

Die Geschwindigkeit der Flammenspitze wurde von in Reihe montierten Ionisationssensoren gemessen ($v_{FT,Io}$). Da die Ionisationssensoren jedoch nur bestimmen konnten, ob sich eine Flammenspitze zum Zeitpunkt t_n an der Position eines Ionisationssensors x_n befand oder nicht, wurde $v_{FT,Io}$ immer aus der Differenz der Positionen zweier aufeinanderfolgender Ionisationssensoren (x_n bzw. x_{n+1}) und der zeitlichen Differenz der Ankunft der Flammenspitze am jeweiligen Ionisationssensor (t_n bzw. t_{n+1}) durch Gleichung 5 bestimmt.

$$v_{FT,Io} = \frac{x_{n+1} - x_n}{t_{n+1} - t_n} \tag{5}$$

Dabei wurde angenommen, dass der Zeitpunkt t_n der Ankunft der Flammenspitze an der Position x_n durch ein Steigen der Flanke des Signals des Ionisationssensors an Position x_n um mindestens 0.1 V markiert wurde. Analog dazu wurden x_{n+1} und t_{n+1} bestimmt. Als Zeitpunkt für $v_{FT,Io}$ wurde der Mittelwert zwischen t_n und t_{n+1} definiert, während der Mittelwert zwischen x_n und x_{n+1} als Position für $v_{FT,Io}$ bestimmt wurde.

5 Ergebnisse

Zur Durchführung der in Kapitel 3 definierten Arbeitspakete wurden Brennstoffe der Zusammensetzungen 50/50 und 75/25 H_2/CO (Angaben in Vol.-%) bei Brennstoffkonzentrationen in Luft von 13, 15, 17,5, 20, 25 und 29,5 Vol.-% untersucht. Ergänzend muss hinzugefügt werden, dass die Experimente nicht bei den exakten Brennstoff-zu-Luft Konzentrationen durchgeführt wurden. Da die Brennstoffkonzentration mittels der Partialdruckmethode am Ende der Brennstoffeindüsung stattfindet, kann die Brennstoffkonzentration in der GraVent nicht vor dem Experiment exakt eingestellt werden. Abweichungen von der Zielkonzentration des Brennstoffs in der Luft von $x_F = 0.5$ Vol.-% wurden deswegen akzeptiert. Während der Durchführung des Vorhabens sind keine anderen Messdaten bzw. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen bekannt geworden.

5.1 OH-PLIF Experimente

Die OH-PLIF Experimente wurden in der in 3 beschriebenen Konfiguration durchgeführt und hatten das Ziel die Geschwindigkeit der Flammenausbreitung in Abhängigkeit der Brennstoffzusammensetzung und -konzentration zu messen. Des Weiteren wurde die Morphologie der Flammenfronten untersucht und der Wrinkling Faktor Ξ bestimmt.

5.1.1 Geschwindigkeit und Beschleunigung der Flammenspitze

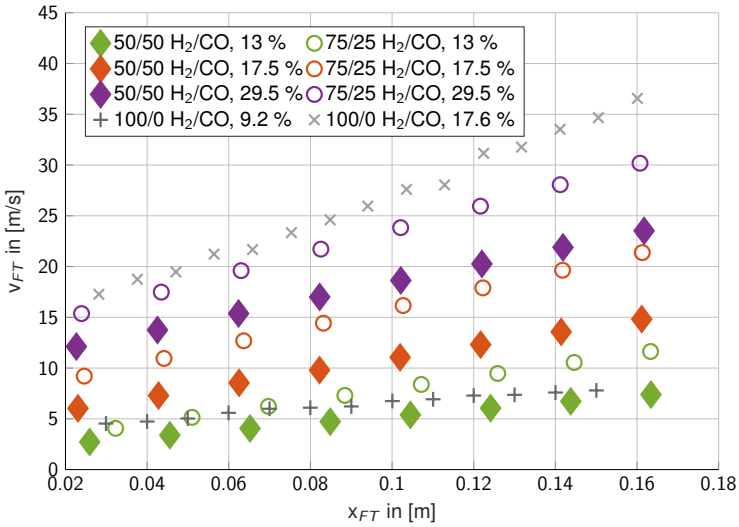

Abbildung 5: Geschwindigkeiten der Flammenspitze von 100/0, 75/25 und 50/50 H_2-CO-Luft Mischungen. [1]

Abbildung 5 zeigt die Geschwindigkeiten der Flammenspitze von verschiedenen Brennstoffzusammensetzungen und mit variierenden Brennstoff-Luft-Konzentrationen über die Position der Flammenspitze. Die experimentellen Daten für die 100/0 Brennstoffmischungen (grau) wurden von Peter Katzy aufgenommen [1]. Die Daten der H_2/CO Brennstoffe wurden von Kajetan Planötscher in diesem Projekt gemessen. Ausgefüllte Symbole stehen hierbei für 50/50 H_2/CO Gemische, wohingegen nicht gefüllte Symbole 75/25 H_2/CO Brennstoffmischungen markieren. Unabhängig von der Gemischzusammensetzung ist in Abbildung 5 ist eine starke Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Brennstoffkonzentration zu erkennen. Die Geschwindigkeit der Flammenspitze steigt hierbei mit einer höheren Brennstoffkonzentration immer weiter an. v_{FT} steigt im beobachteten Bereich nach der Zündung bei allen Brennstoffkonzentrationen und allen untersuchten Mischungen linear an. Der Anstieg von v_{FT} kann durch den Anstieg der laminaren Brenngeschwindigkeiten der untersuchten Brennstoffmischungen mit steigender Konzentration erklärt werden. Außerdem gilt für alle untersuchten Brennstoffkonzentrationen, dass 75/25 H_2/CO Brennstoffmischungen schneller sind als 50/50 H_2/CO Brennstoffmischungen bei gleicher Konzentration. Diese Erhöhung der Geschwindigkeit der Flammenspitze kann auf die Erhöhung der laminaren Brenngeschwindigkeit einer Mischung durch den steigenden H_2 Anteil erklärt werden.

Neben v_{FT} wurde außerdem die Beschleunigung der Flammenspitze a_{FT} im Hinblick auf Brennstoffzusammensetzung und Brennstoffkonzentration untersucht. Die a_{FT}s der untersuchten Brennstoffmischungen wurden dazu in Abbildung 6 über die Brennstoffkonzentration aufgetragen. Schwarze Symbole stehen für 50/50 H_2/CO Brennstoffmischungen und rote Symbole markieren 75/25 Brennstoffmischungen. Die Standardabweichung der Messwerte ist in Abbildung 6 durch Balken dargestellt und als Zahlenwert in Tabelle 1 eingetragen. Mit steigender Brennstoffkonzentration geht anfangs für beide Brennstoffmischungen eine Erhöhung von a_{FT} einher. Bei ca. 25 Vol.-% Brennstoffkonzentration erreichen beide Brennstoffmischungen ein Beschleunigungsmaximum. In der 50/50 H_2/CO

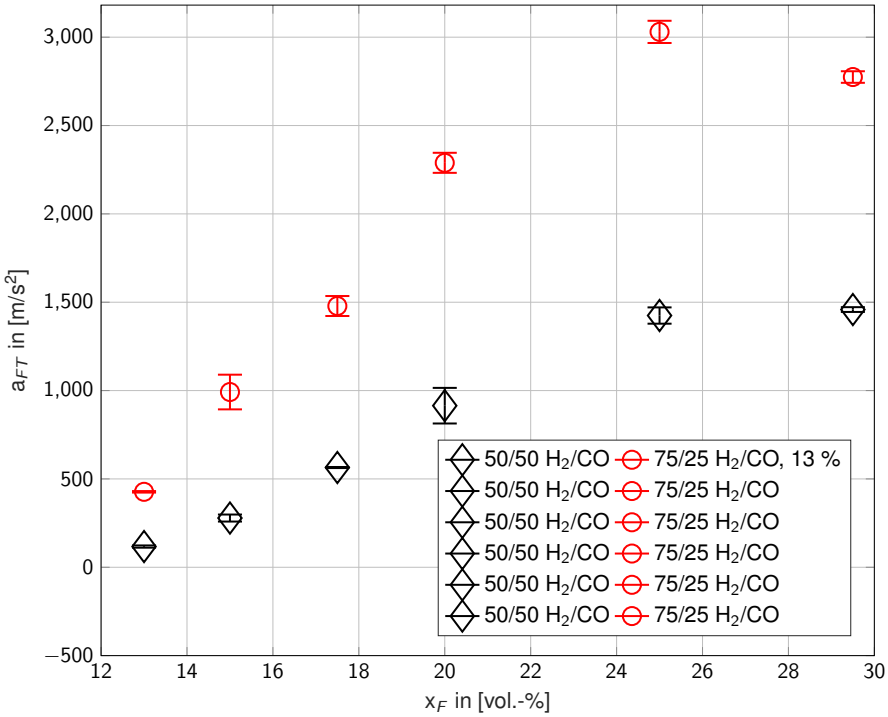

Abbildung 6: Beschleunigung der Flammenspitze von 75/25 und 50/50 H_2-CO-Luft Mischungen.

Mischung stagniert a_{FT} im Anschluss, während a_{FT} bei einer stöchiometrischen Konzentration sogar leicht sinkt. Ein ähnliches Verhalten wurde bereits im Vorgängerprojekt 1501545A beobachtet, da hier die H_2-CO-Luft Flammen mit 25 Vol.-% Brennstoffkonzentration beim niedrigsten untersuchten Blockadeverhältnis (Blockage Ratio) die höchsten Endgeschwindigkeiten erreicht haben [21]. Es ist wahrscheinlich, dass die starke kinetische Kopplung zwischen H_2 und CO für die Verschiebung der maximalen Beschleunigung weg von der stöchiometrischen Konzentration hin zum mageren Bereich eine Rolle spielt [22]. Hinzu kommt der Einfluss von intrinsischen Verbrennungsinstabilitäten, die die Oberfläche der Flamme und damit letzten Endes die Beschleunigung der Flammenspitze vergrößern. Der Effekt intrinsischer Verbrennungsinstabilitäten tritt vor allem bei mageren Brennstoff-Luft-Mischungen zutage. Dadurch kommt es zu einen Trade-Off zwischen der Reaktivität der Brennstoffmischung und der Oberflächenvergrößerung durch intrinsische Instabilitäten, die die maximale a_{FT} potentiell weiter in den mageren Bereich verschieben.

Tabelle 1: Standardabweichungen von a_{FT} in [m s^{-1}]

x_F	13 Vol.-%	15 Vol.-%	17,5 Vol.-%	20 Vol.-%	25 Vol.-%	29,5 Vol.-%
50/50 H_2/CO	6,33	19,88	2,98	100,74	46,12	13,55
75/25 H_2/CO	4,31	98,16	56,53	56,73	62,85	32,70

5.1.2 Morphologie der Flammenfront

Die Auswirkung der intrinsischen Instabilitäten der Flammenfront wird in Abbildung 7 dargestellt. Die Abbildung zeigt Flammenfronten mit 50/50 (links) sowie 75/25 (rechts) H_2/CO Brennstoffmischungen bei verschiedenen Brennstoffkonzentrationen während ihrer Ausbreitung durch das OS der GraVent.

Die oberen Bilder zeigen Flammenfronten mit x_F = 13,0 Vol.-%, die mittleren Bilder mit x_F = 17,5 Vol.-% und die unteren Bilder Flammenfronten mit einer stöchiometrischen Konzentration von 29,5 Vol.-%. Zuerst wird auf die Flammen mit 50/50 H_2/CO Flammen eingegangen. Die stöchiometrische Flammenfront behält im gesamten OS eine gleichmäßige, bogenförmige Gestalt. Es treten zwar kleinskalige Falten auf der Oberfläche auf, die Gesamtkontur der Flammenfront bleibt jedoch stabil. Bei x_F = 17,5 Vol.-% zeigt die Flammenfront ebenfalls eine bogenförmige Gestalt, jedoch gibt es zwei auffällige Unterschiede im Vergleich zur stöchiometrischen Mischung: Die Flammenfront weist mehr Instabilitäten auf, und ab einer Entfernung von 6 cm zur Zündquelle ist eine Verschiebung der Flammenfront in positive z-Richtung erkennbar. Die 13,0 Vol.-% Flammenfront beginnt ebenfalls mit einer bogenförmigen Gestalt. Erste makroskopische Veränderungen treten jedoch auf, sobald die Flammenspitze eine Entfernung von 4 cm zur Zündquelle erreicht. Je weiter sich die magere Flamme im OS ausbreitet, desto unregelmäßiger wird ihre Form. Zwischen 6 und 8 cm Entfernung von der Zündquelle entstehen großflächige Falten, welche im weiteren Verlauf anwachsen und neue Falten auf den bereits existierenden Falten bilden. Außerdem beginnt die Flammenfront sich in Richtung der Decke der GraVent zu bewegen, vermutlich aufgrund von Auftriebseffekten. Dieser Effekt tritt bei der stöchiometrischen Flammenfront mit 29,5 Vol.-% nicht auf, da sie sich deutlich schneller ausbreitet als die magere Flammenfront und den FOV bereits verlassen hat, bevor der Auftriebseffekt wirksam werden konnte. Die Flammenfronten der 75/25 H_2/CO Brennstoffmischungen verhalten sich bei den untersuchten Konzentrationen sehr ähnlich zu den Flammenfronten der 50/50 H_2/CO Brennstoffmischungen. Bei höheren Konzentrationen sehen die Flammenfronten im untersuchten Bereich sehr regelmäßig aus und kleinskalige Faltung der Flammenfront durch intrinsische Instabilitäten spielt eine verminderte Rolle. Die Flammenfronten haben außerdem bei den gezeigten x_F > 13 Vol.-% ebenfalls bogenförmige Gestalt. Auch bei x_F = 13,0 Vol.-% sind Ähnlichkeiten zu den 50/50 H_2/CO

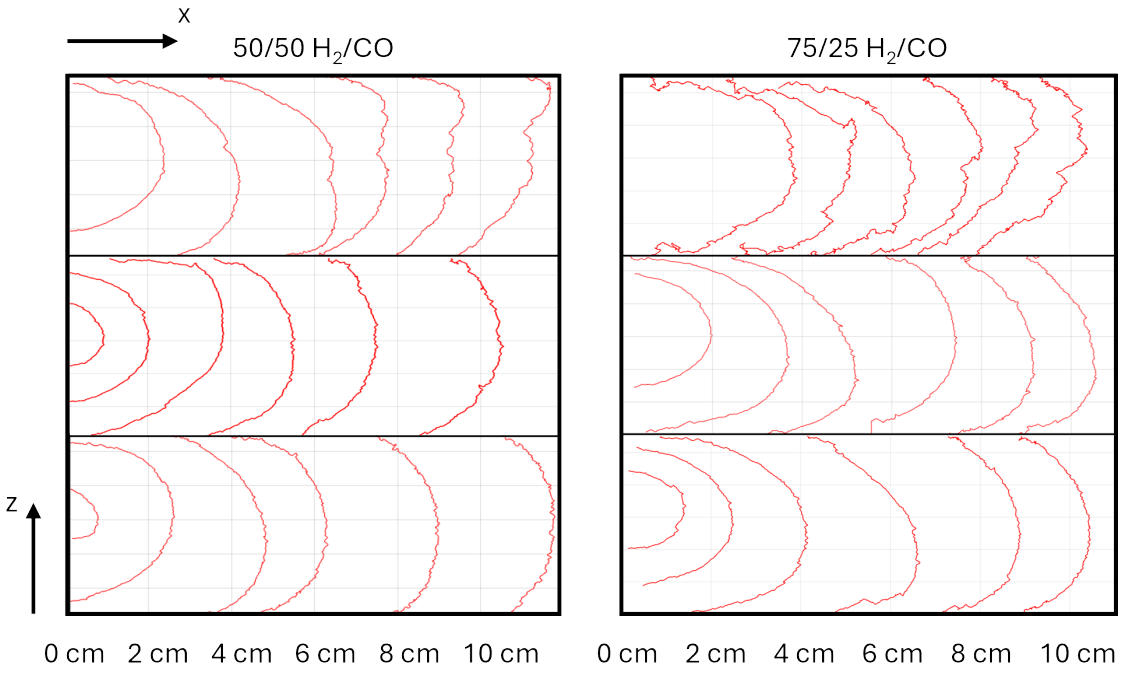

Abbildung 7: Detektion der Flammenfront und Konstruktion der glatten Flammenfront.

Brennstoffmischungen erkennbar. So ist eine Verschiebung der Flammenfront in positive z-Richtung auch bei den 75/25 Brennstoffmischungen erkennbar. Auch die 75/25 Brennstoffmischungen zeigen einen starken Einfluss der intrinsischen Verbrennungsinstabilitäten auf die Flammenfront. Die Front beginnt wieder bogenförmig, doch bereits zu Beginn der Flammenausbreitung ist ein starkes Falten der Flammenfront erkennbar, welches sich durch den gesamten sichtbaren Bereich zieht. Das Falten ist hierbei stärker als bei den 50/50 H_2/CO Brennstoffmischungen, weil die Lewis-Zahl der 75/25 H_2/CO Brennstoffmischung durch den höheren H_2-Anteil niedriger ist als bei den 50/50 H_2/CO Brennstoffmischungen. Ein weiterer Unterschied der 75/25 zu den 50/50 H_2/CO Brennstoffmischungen ist die Tatsache, dass einzelne größere Falten selten lange genug bestehen um anwachsen und weitere Falten bilden zu können. Das Ergebnis ist eine kleinskaligere Faltung der Flammenfront, bei der mehr Falten mit geringerer Größe auftreten. Ein ähnliches Verhalten der Flammenfront wurde bereits von Cheevers et al. [23] für CH_4-H_2-Luft-Flammen beobachtet. Cheevers et al. konnten die kleinskaligere Faltung der Flammenfront ohne sich vergrößernde makroskopische Falten für H_2-reichere Mischungen mit den durch das H_2 erhöhten laminaren Brenngeschwindigkeiten erklären. Die höheren Brenngeschwindigkeiten konsumieren kleinskalige Falten schneller als diese wachsen können. Dadurch entsteht zwar eine große Zahl kleinskaliger Falten, jedoch ist die Bildung von makroskopischen Falten nur schwer möglich.

5.1.3 Wrinkling Faktor

Der Wrinkling Faktor Ξ stellt wie beschrieben ein Maß für die Vergrößerung der Flammenfrontoberfläche durch kleinskalige Flammenfaltung dar. Zur Bestimmung von Ξ eignet sich das OH-PLIF Verfahren besonders, weil es die Auflösung von kleinskaligen Falten ermöglicht. Die im Folgenden dargestellten Diagramme sind das gemittelte Ergebnis von mindestens drei Experimenten pro untersuchter Brennstoffkonzentration und -zusammensetzung. Zu sehen sind in Abbildung 8 Versuchsreihen bei Konzentrationen von 13, 17,5 und 29,5 Vol.-% Brennstoff in Luft. Ausgefüllte Symbole markieren hierbei 50/50 H_2/CO, während Symbole ohne Füllung für 75/25 H_2/CO Brennstoffmischungen stehen.

Die 75/25 H_2/CO Brennstoffmischungen zeigen eine klare Abhängigkeit der Vergrößerung der Flammenfront durch kleinskalige Faltung. Je geringer die Brennstoffkonzentration, desto größer ist der Wrinkling Faktor. Der Verlauf des Wrinkling Faktors mit Abstand zur Zündung kann gut durch ein Polynom 3. Grades angenähert werden. Für alle drei dargestellten Brennstoffkonzentrationen steigt der Wrinkling Faktor zunächst stark an, bevor sich die Kurve ab ca. 6 cm Entfernung von der Zündung abflacht. Die 13 Vol.-% Mischung flacht dabei im Vergleich zu den 17,5 und 29,5 Vol.-% Mischungen am wenigsten ab. Die 17,5 Vol.-% Brennstoff-Luft-Mischung erreicht zwischen 6 und 13 cm Entfernung von der Zündung ein Plateau, bevor sie im Folgenden weiter ansteigt. Am stärksten von der Abflachung betroffen ist die stöchiometrische Brennstoff-Luft-Mischung. Hier steigt der Wrinkling Faktor bis ca. 8 cm Entfernung von der Zündung an, bis ein Umkehrpunkt erreicht wird. Zwischen 8 und 13 cm verringert sich der Wrinkling Faktor, um dann ab 13 cm wieder anzusteigen. Auch bei den dargestellten 50/50 H_2/CO Brennstoffmischungen ist eine Abhängigkeit der Oberflächenvergrößerung von der Brennstoffkonzentration erkennbar. Ebenso wie bei den 75/25 Mischungen neigt

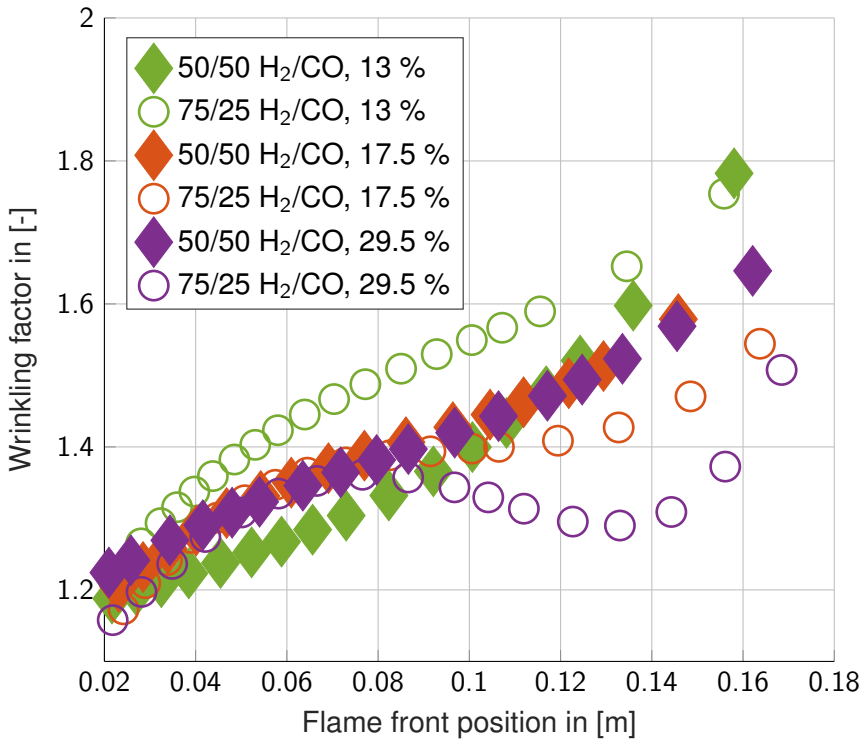

Abbildung 8: Ξ von 75/25 und 50/50 H_2-CO-Luft Mischungen unterschiedlicher Brennstoffkonzentrationen.

vor allem die 13 Vol.-% Mischung zu kleinskaliger Flammenfrontfaltung. Die 17,5 und 29,5 Vol.-% Brennstoff-Luft-Mischungen unterscheiden sich allerdings kaum erkennbar in ihrem Verlauf und in der Höhe des Wrinkling Faktors. Der Verlauf der untersuchten 50/50 H_2/CO Brennstoffmischungen weißt im Gegensatz zu den 75/25 H_2/CO Mischungen kein Abflachen der Kurve auf. Stattdessen steigt der Wrinkling Faktor der 50/50 H_2/CO Brennstoffmischungen im betrachteten Bereich stetig an. Der Anstieg des Wrinkling Faktor bedeutet eine Vergrößerung der Flammenfrontoberfläche durch kleinskalige Faltung. Diese Vergrößerung der Flammenfrontoberfläche kann durch intrinsische Verbrennungsinstabilitäten erklärt werden, insbesondere die Landau-Darrieus und die Thermodiffusive Instabilität [1] [24]. Beide Instabilitäten sind stark von der Lewis-Zahl abhängig. Je kleiner die Lewis-Zahl, desto stärker ist der Einfluss der intrinsischen Verbrennungsinstabilitäten. Die Lewis Zahl einer Gasmischung ist von der Brennstoffkonzentration abhängig [25]. Mit steigender Brennstoffkonzentration steigt auch die Lewis-Zahl der Brennstoff-Luft Mischungen und verringert so den Einfluss von intrinsischen Verbrennungsinstabilitäten. Das drückt sich in geringeren Wrinkling Faktoren aus und erklärt so die höheren Wrinkling Faktoren bei Mischungen mit geringerem Brennstoffanteil in Abbildung 8. Ein weiterer Einflussfaktor auf die Lewis-Zahl und damit auf die Anfälligkeit für intrinsische Verbrennungsinstabilitäten ist die Brennstoffzusammensetzung [25]. Bei der Mischung von H_2 mit CO verringert H_2 die Lewis-Zahl der Brennstoffmischung und macht die Brennstoff-Luft-Mischung auf diese Weise sensibler gegenüber intrinsischen Verbrennungsinstabilitäten. Das sollte letztlich zu einem höheren Wrinkling Faktor und damit einer stärkeren Vergrößerung der Flammenfrontoberfläche führen, wenn der H_2-Anteil in der Brennstoffmischung erhöht wird. Dies geht aus Abbildung 8 allerdings nur für die 13 Vol.-% Konzentrationen hervor, in denen intrinsische Verbrennungsinstabilitäten

aufgrund der mageren Brennstoff-Luft Mischung besonders dominant sind. Bei höheren Konzentrationen ist Ξ den 75/25 H_2/CO Mischungen weitgehend niedriger als bei 50/50 H_2/CO. Der Grund hierfür ist mutmaßlich der Einfluss des CO auf die laminare Brenngeschwindigkeit der Brennstoffmischung. Wie bereits in Kapitel 5.1.2 angesprochen führt eine höhere laminare Brenngeschwindigkeit einer Brennstoffmischung laut Cheevers et al. [23] zu einer Flammenfront mit kleinskaligeren Falten, weil Falten in der Flammenfront schneller konsumiert werden als sie wachsen können. Somit ist die Flammenfrontoberfläche A_{eff} bei Brennstoffmischungen mit höherer laminarer Brenngeschwindigkeit kleiner als bei Brennstoffmischungen mit höherer laminarer Brenngeschwindigkeit. Die geglättete Flammenfrontoberfläche A_{smooth} wird dadurch jedoch kaum beeinflusst. Nach Gleichung 4 muss Ξ deshalb für Brennstoffkonzentrationen sinken, bei denen intrinsische Verbrennungsinstabilitäten eine untergeordnete Rolle spielen.

5.2 Flammenbeschleunigungsexperimente mit konventionellen Messmethoden

Neben den Experimenten zur Flammentopologie und zur Flammenbeschleunigung kurz nach der Zündung wurden außerdem Flammenbeschleunigungsexperimente über größere Distanzen untersucht. Dafür wurde die GraVent auf ihre volle Länge von 6 m, bestehend aus 6 KSs und 1 OS, aufgebaut. Mittels Ionisationssensoren wurden dabei die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Flammenspitze gemessen, während simultan dynamische Drücke aufgenommen wurden. Die Messungen und die Auswertung der Messdaten konnte bis zum Projektende nicht abgeschlossen werden. Allerdings zeigten sich bei den Experimenten einige Probleme bei der Aufnahme der Messdaten, welche größere Änderungen im Messsystem unabdingbar erscheinen lassen. Es ist zum einen nicht möglich die Sensoren für Brennstoffkonzentrationen unterhalb von 11,5 Vol.-% zu verwenden. Das Signal der Flammenfront ist zu schwach, als dass es durch die eingebauten Ionisationssensoren zuverlässig detektiert werden könnte. Um das Problem zu beheben könnte die Vorspannung der Elektroden U erhöht werden.

$$E = \frac{U}{d} \tag{6}$$

Nach Gleichung 6 steigt die elektrische Feldstärke E damit, wenn der Abstand der Litzen der Ionisationssensoren beibehalten wird. Allerdings muss bei einer Spannungserhöhung die potentielle Gefahr eines Spannungsüberschlags berücksichtigt werden, wodurch d bei zu hohem U auch vergrößert werden müsste. Ein weiteres Problem stellt die Verschmutzung der Sensoren durch Verbrennungsprodukte und Ablösungen von den Wänden der GraVent dar. Durch die Verschmutzung fällt ein Großteil der Sensoren bereits nach einigen wenigen Experimenten aus. Um das Problem zu lösen, müssten die Sensoren und die Aufnahme der Sensoren neu konstruiert werden. Ziel wäre hierbei eine Konstruktion, die es erlaubt die Sensoren schnell und einfach zu reinigen. Dabei muss es möglich sein die Sensoren auch ohne Entfernung des Deckels eines Segments zu entfernen. Anschließend muss der Sensor wieder so in die Anlage eingebaut werden können, dass die Dichtigkeit der GraVent durch die Wartungsarbeiten nicht beeinträchtigt werden. Zusätzlich muss stark

auf die Montierbarkeit der Neukonstruktion der Ionisationssensoren geachtet werden. Beim aktuellen Aufbau der GraVent besteht hierbei die Schwierigkeit, dass die Gasversorgung direkt über die Deckel der Segmente verläuft. Bei einer Neukonstruktion der Ionisationssensoren muss deswegen darauf geachtet werden, dass die Sensoren ein- und ausgebaut werden können, ohne dass die Gasversorgung entfernt werden muss. Eine Anpassung der Gasversorgung für die einzelnen Segmente scheint deswegen ebenso notwendig zu sein. Eine andere Möglichkeit zur Lösung des Problems der Verschmutzung der Ionisationssensoren ist der Wechsel von Ionisationssensoren zurück zu Photodioden. Hierbei könnte auf die vorhandenen Bohrungen, in denen sich aktuell die Ionisationssensoren befinden, zurückgegriffen werden. Dabei müssten Photodioden ausgewählt werden, die besonders sensitiv auf das abgestrahlte Licht von mageren H_2-CO-Luft Mischungen reagieren.

6 Veröffentlichungen und geplante Veröffentlichungen

6.1 ISHPMIE 2024

Erste Ergebnisse des Vorhabens wurden beim International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE) 2024 in Neapel vorgestellt. Im Zuge dessen wurde ein Paper in den Proceedings of the 15th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions veröffentlicht. Das Paper wurde zusätzliche für die Special Issues des Journal of Loss Prevention in the Process Industries vorgeschlagen und eingereicht. Zum Zeitpunkt des Projektabschlusses befindet sich das Paper noch im Review. Das Paper behandelt die Untersuchung der von H_2-CO-Luft-Flammen mit dem OH-PLIF Verfahren. Da es bislang an ausreichenden Daten zur Flammentopologie bei der Zündung und den frühen Phasen der Flammenausbreitung in mageren H_2-CO-Luft-Gemischen mangelt, wurden Experimente mit einer 50/50 H_2/CO Brennstoffmischung und Brennstoff-Luft-Konzentrationen zwischen 13,0 Vol.-% und 29,5 Vol.-% durchgeführt. Für die Experimente wurde der GraVent-Explosionskanal der Technischen Universität München in der kurzen Konfiguration verwendet (Länge: 1300 mm, Querschnitt: 300 x 60 mm). Mittels OH-PLIF-Messungen wurden die Flammenfrontgeschwindigkeit, die Flammenbeschleunigung und die Länge der Flammenfront ermittelt. Durch die Analyse des Wrinkling Faktors wurde der Einfluss intrinsischer Instabilitäten auf die frühe Flammenbeschleunigung quantifiziert. Die optischen Daten umfassen sowohl die Zündung der Gasgemische als auch die frühen Phasen der Flammenausbreitung. Die Ergebnisse liefern neue Erkenntnisse zur Topologie von H_2-CO-Luft-Flammen unter mageren Bedingungen, verbessern das Verständnis der Flammenbeschleunigung von Synthesegas und erweitern bestehende experimentelle Daten mit Relevanz für großflächige Unfallszenarien in Kernkraftwerken.

6.2 Geplante weitere Veröffentlichungen

Nach der Veröffentlichung in den Proceedings der ISHPMIE 2024 bieten die OH-PLIF Daten weitere Möglichkeiten für Veröffentlichungen. In einem weiteren Paper sollen die 50/50 H_2/CO Brennstoffmischungen unter Anderem bzgl. ihrer Flammenspitzengeschwindigkeiten und -beschleunigungen sowie im Hinblick auf die Länge der Flammenfronten miteinander verglichen werden. Die so gewonnenen Informationen werden das Verständnis über die Rolle der Brennstoffzusammensetzung von

H_2-CO-Luft Verbrennungen erweitern und auch als Datengrundlage zur Validierung von CFD-Codes zur Verfügung stehen. Des Weiteren wird die DDT Database des Lehrstuhls für Thermodynamik der TU München mit den neuen Daten vergrößert werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Zuge des Projektes 1501642 wurde eine große Zahl an Verbrennungsexperimenten mit mageren bis stöchiometrischen H_2-CO-Luft Mischungen durchgeführt. Spezielles Augenmerk wurde auf den Beginn der Flammenbeschleunigung kurz nach der Zündung, sowie den Einfluss von intrinsischen Verbrennungsinstabilitäten auf die Topologie und die Beschleunigung der Flammenfront gelegt. Die so gewonnenen Daten erweitern die DDT Database an der Technischen Universität München und vergrößern das Wissen über die Verbrennung von Synthesegas. Des Weiteren können die im Projekt 1501642 aufgenommenen Daten zur Validierung von CFD Codes verwendet werden. Im folgenden werden die durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse kurz zusammengefasst. Zu Beginn des Projektes wurde die GraVent angepasst, um den Herausforderungen des Projektes gerecht zu werden. Dazu wurde die GraVent zu Beginn auf 1 OS und 1 KS gekürzt. Außerdem wurden Ionisationssensoren konstruiert, welche in die GraVent eingebaut wurden. Durch die Ionisationssensoren sollte es möglich sein auch H_2-CO-Luft-Flammen bei Brennstoffkonzentrationen unterhalb der bereits im Vorgängerprojekt vermessenen 15 Vol.-% zu detektieren. Im Anschluss wurden Experimente zur Untersuchung der Flammentopologie durchgeführt. Hierbei wurden die Wrinkling Faktoren der Flammenfront, sowie die Geschwindigkeit und Beschleunigung der Flammenspitze gemessen. Dabei zeigt sich eine starke Abhängigkeit der Topologie von der Brennstoffkonzentration. Magere Mischungen neigen hier generell zu einer größeren Faltung der Flammenfront und wiesen so auf einen größeren Einfluss von intrinsischen Verbrennungsinstabilitäten hin als fettere Mischungen. Dies kann an größeren Wrinkling Faktoren und Flammenfrontlängen abgelesen werden. Des Weiteren ist die Topologie der Flammenfront in den untersuchten Mischungen beeinflusst durch die Zusammensetzung des Brennstoffs. Ein größerer H_2-Anteil führt dabei zu einer geringeren Faltung der Flammenfront und damit einer geringeren Flammenfrontoberfläche, obwohl Brennstoffmischungen mit größerem H_2-Anteil eine niedrigere Lewis-Zahl haben als Brennstoffmischungen mit niedrigerem H_2-Anteil. Aufgrund der höheren laminaren Brenngeschwindigkeit von H_2-reichen Brennstoffmischungen werden Falten auf der Flammenfront oft schneller konsumiert als sie wachsen können, weswegen H_2-reiche Mischungen teils geringere Wrinkling Faktoren aufweisen als H_2-arme Mischungen. Ebenso wie die Topologie sind die Geschwindigkeit und die Beschleunigung der Flammenfront abhängig von Brennstoffzusammensetzung und -konzentration. Höhere Brennstoffkonzentrationen führen dabei erwartungsgemäß ebenso zu höheren Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Flammenfront wie höhere H_2-Anteile in der Brennstoffmischung. Die maximalen Beschleunigungen der untersuchten Flammenfronten fanden sich allerdings nicht wie erwartet bei der stöchiometrischen Konzentration von 29,5 Vol.-%, sondern bei den untersuchten Brennstoffmischungen bereits bei einer Brennstoffkonzentration von 25 Vol.-%. Dies deutet auf einen Trade-Off zwischen intrinsischen Verbrennungsinstabilitäten und der Reaktivität der Gasmischung hin. Nach den Experimenten zur Flammentopologie sollte die Flammenbeschleunigung von mageren H_2-CO-Luft Mischungen näher untersucht werden. Zu diesem Zwecke

wurde die GraVent auf 1 OS und 6 KSs erweitert. Außerdem wurden die am Anfang des Projektes konstruierten Ionisationssensoren in die GraVent eingebaut. Hier zeigte sich jedoch, dass das Messsystem von Ionisationssensoren nicht wie erhofft funktionierte. Probleme entstanden hierbei durch die Verschmutzung der Sensoren und eine zu geringe Sensitivität, wodurch die Flammenfronten der untersuchten Brennstoffzusammensetzungen mit Konzentrationen unterhalb von 11,5 Vol.-% nicht detektiert werden konnten. Für zukünftige Projekte sollte weiter die Flammenbeschleunigung magerer H_2-CO-Luft Mischungen im Vordergrund stehen. Neben der unblockierten GraVent sollten Experimente mit verschiedenen BRs durchgeführt werden, um den Einfluss von Hindernissen auf die Flammenausbreitung quantifizieren zu können. Zu diesem Zweck muss die GraVent weiter angepasst werden. Insbesondere müssen Lösungen für die Probleme der Ionisationssensoren gefunden werden. Ansätze können hierbei eine Neukonstruktion der Ionisationssensoren und der Gasversorgung sein, die ein regelmäßiges Säubern der Ionisationssensoren ermöglichen sollte. Außerdem muss die Sensitivität der Ionisationssensoren verbessert werden. Eine andere Möglichkeit wäre eine Rückkehr zu Photodioden anstatt Ionisationssensoren. Hierfür müssten vermutlich keine größeren Änderungen an der GraVent vorgenommen werden. Allerdings muss hier auf die Sensitivität der Photodioden im Bezug auf die emittierten Wellenlängen der untersuchten Flammenfronten geachtet werden.

Literatur

[1] Katzy, P., Hasslberger, J., Boeck, L.R. and Sattelmayer, T., The effect of intrinsic instabilities on effective flame speeds in under-resolved simulations of lean hydrogen–air flames. Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science 3 (2017), 041015.

[2] Katzy, P. and Sattelmayer, T., Entwicklung und Validierung eines effizienten Modellierungskonzeptes für die Wasserstoffverbrennung mit hohem Luftüberschuss; Development and validation of a concept for lean hydrogen-air combustion : Abschlussbericht: Final Report: Reaktorsicherheitsforschung: Reactor Safety Research (2018).

[3] Gupta, S. and Langer, G., Experimental research on hydrogen deflagration in multi-compartment geometry and application to nuclear reactor conditions. Nuclear Engineering and Design 343 (2019), 103–137.

[4] Kumar, R., Koroll, G., Heitsch, M. and Studer, E., Carbon monoxide-hydrogen combustion characteristics in severe accident containment conditions. Technical report, NEA/CSNI, Final Report. Nuclear Energy Agency Committee on the Safety of Nuclear Installations (2000).

[5] Friedrich, A., Necker, G., Veser, A., Grune, J., Kuznetsov, M. and Jordan, T., Experiments on the combustion behaviour of hydrogen-carbon monoxide-air mixtures. Technical report, 8th International Conference on Hydrogen Safety (ICHS), Adelaide, Australia (2019).

[6] Grune, J., Sempert, K., Kuznetsov, M. and Jordan, T., Experimental investigation of unconfined spherical and cylindrical flame propagation in hydrogen-air mixtures. International Journal of Hydrogen Energy 46(23) (2021), 12487–12496.

[7] Cai, X., Wang, J., Zhao, H. and Huang, Z., Flame morphology and self-acceleration of syngas spherically expanding flames. International Journal of Hydrogen Energy 43(36) (2018), 17531–17541.

[8] Veser, A., Stern, G. and Grune, J., CO-H2-air combustion tests in den FZK - 7 m - tube. Technical report, Institut für Kern- und Energietechnik (2002).

[9] Xie, Y., Wang, X., Wang, J. and Huang, Z., Explosion behavior predictions of syngas/air mixtures with dilutions at elevated pressures: Explosion and intrinsic flame instability parameters. Fuel 255 (2019), 115724.

[10] Vollmer, K., Ettner, F. and Sattelmayer, T., Deflagration-to-detonation transition in hydrogen-air mixtures with concentration gradients. Combustion Science and Technology 184 (2012), 1903–1925.

[11] Boeck, L. and Kink, A., O.D.H.J.S.T., Influence of water mist on flame acceleration, DDT and detonation in H2-air mixtures. International Journal of Hydrogen Energy 40(21) (2015), 6995–7004.

[12] Katzy, P., Combustion model for the computation of flame propagation in lean hydrogen-air mixtures at low turbulence. Ph.D. thesis, Technische Universität München (2021).

[13] Heilbronn, D., Barfuss, C. and Sattelmayer, T., Deflagration-to-detonation transition in H2-CO-air mixtures in a partially obstructed channel. International Journal of Hydrogen Energy 46 (2021), 12372–12383.

[14] Ettner, F., Vollmer, G. and Sattelmayer, T., Numerical simulation of the deflagration-to-detonation transition in inhomogeneous mixtures. Journal of Combustion (2014).

[15] Hasslberger, J., Katzy, P., Boeck, L. and Sattelmayer, T., Computational fluid dynamics simulation of deflagration-to-detonation transition in a full-scale Konvoi-type pressurized water reactor. Juornal of Nuclear Engineering and Radiation Science 3 (2017), 041014.

[16] Barfuß, C., Heilbronn, D. and Sattelmayer, T., Simulation of deflagration-to-detonation transition of lean H2-CO-air mixtures in obstructed channels. Technical report, 12th International Conference on Hydrogen Safety (2019).

[17] TUM, Einfluss von Mischungsgradienten und seitlichem Massenverlust auf die Flammenbeschleunigung und die Detonation in Kanälen : Abschlussbericht ; Reaktorsicherheitsforschungsvorhaben. Technical report, Lehrstuhl für Thermodynamik (2011).

[18] Böck, L.R., Haßlberger, J. and Sattelmayer, T., Experimentelle und numerische Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Mischungsgradienten und Wassereinspritzung auf die Flammenausbreitung: Abschlussbericht (2015).

[19] Barfuß, C., Heilbronn, D., Sattelmayer, T. *et al.*, Verbundvorhaben: Entwicklung von Verbrennungsmodellen und Kriterien für H2-CO-Luft-Schichten bei partiellem Einschluss. Technical report, Lehrstuhl für Thermodynamik (2022).

[20] Boeck, L.R., Katzy, P., Hasslberger, J., Kink, A. and Sattelmayer, T., The gravent DDT database. Shock Waves 26 (2016), 683–685.

[21] Heilbronn, D., Barfuss, C. and Sattelmayer, T., Influence of geometry on flame acceleration and DDT in H_2-CO-air mixtures in a partially obstructed channel. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 71 (2021), 104493.

[22] Bouvet, N., Halter, F., Chauveau, C. and Yoon, Y., On the effective lewis number formulations for lean hydrogen/hydrocarbon/air mixtures. International Journal of Hydrogen Energy 38 (2013), 5949–5960.

[23] Cheevers, K., Yang, H., Kia, S., Bauwens, C.R.L. and Radulescu, M., Influence of flame instabilities and hydrodynamic coupling on flame acceleration in methane-hydrogen fuel blends. Proceedings of the 15th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE 2024) (2024), 534–545.

[24] Landau, L., On the theory of slow combustion. In: Dynamics of Curved Fronts, Pelcé, P., Ed. Academic Press, San Diego (1988) 403–411.

[25] Lapalme, D., Lemaire, R. and Seers, P., Assessment of the method for calculating the Lewis number of H2/CO/CH4 mixtures and comparison with experimental results. International Journal of Hydrogen Energy 42 (2017), 8314–8328.