

Experimentelle und numerische Untersuchungen von Zünddurchschlägen

Franziska Seitz¹, Asghar Ghorbani², Detlev Markus², Robert Schießl¹, Ulrich Maas¹

¹ Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technische Thermodynamik, Karlsruhe

² Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Fachbereich 3.5 „Zünddurchschlagsprozesse“, Braunschweig

Als Teilprojekt der DFG-Forschergruppe FOR 1447 „Safety Relevant Ignition Processes“ wird in Zusammenarbeit mit dem Institut für Technische Thermodynamik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) die Zündung ruhender Brennstoff/Luft-Gemische durch heiße Freistrahlen erforscht. Ziel ist es zunächst, die vor der eigentlichen Zündung ablaufenden Mischungsprozesse bei Zünddurchschlägen zu untersuchen, da über die Mischungs- und Turbulenzvorgänge für diese Systeme bisher noch wenig bekannt ist. Im Rahmen dieser Untersuchung wird die zeitliche Entwicklung der Eindringtiefe und der maximalen radialen Ausdehnung von transienten Freistrahlen variabler Dichte zum einen experimentell, zum anderen numerisch unter Anwendung von PDF-Simulationen untersucht. Bei den Messverfahren handelt es sich um zeitaufgelöste, nicht-invasive laserdiagnostische Methoden. Um die Mischungsvorgänge von den bei einer Zündung durch heiße Freistrahlen auftretenden chemischen Reaktionen zu entkoppeln, werden zunächst nicht-reaktive Helium/Stickstoff-Freistrahlen untersucht. Vergleicht man die experimentell ermittelten Daten mit numerischen Berechnungen, ergeben sich gute Übereinstimmungen. Berechnungen der Eintrittsgeschwindigkeit ergaben Werte im Bereich von 300 m/s bis 400 m/s ($Ma < 0,6$). Des Weiteren wurde für Abstände größer als 9 bis 10 Düsendurchmesser ein asymptotisches Freistrahlsbreite-zu-Eindringtiefe-Verhältnis von näherungsweise 0,4 bestimmt. Bei größeren Abständen weisen die Freistrahlen eine selbstähnliche Struktur auf.

1 Einleitung

Um zu verhindern, dass elektrische Betriebsmittel innerhalb einer explosionsfähigen Atmosphäre zu einer potentiellen Zündquelle werden, muss sichergestellt sein, dass sie nach den in EN 60079-0 ff [1] festgesetzten Zündschutzarten geprüft sind. Bei der Zündschutzart Druckfeste Kapselung ist eine Zündung im Inneren des Betriebsmittels zulässig, ein Zünddurchschlag, also ein Flammendurchtritt durch enge Spalte in die unter Umständen explosionsfähige Umgebungsatmosphäre, muss jedoch verhindert werden.

Um dieses Schutzziel zu gewährleisten, wird eine potentielle Zündquelle von einem druckfesten Gehäuse umgeben. Unmittelbar nach der Zündung im Inneren des Gehäuses breitet sich die Flammenfront bei gleichzeitigem Anstieg des Druckes aus. Aufgrund des Druckanstieges dringt unverbranntes Gas durch bauartbedingte Spalte nach außen. Selbst wenn ein direkter Zünddurchschlag, also ein Fortschreiten der Verbrennung nach außen verhindert wird, besteht dennoch die Gefahr einer erneuten Zündung in der Übergangsschicht zwischen heißem Abgas und dem unverbrannten kühleren Umgebungsgas [2-4]. Bei Untersuchungen dieser Wiederzündungsvorgänge ist in den meisten Fällen die instationäre Anfangsphase eines sich ausbildenden heißen Abgasfreistrahls als besonders kritisch zu betrachten.

2 Zielsetzung

Obwohl in den letzten Jahren vermehrt experimentelle Untersuchungen an instationären heißen Freistrahlen durchgeführt wurden [4–6], sind die zu einer Zündung führenden Mechanismen noch immer nicht im Detail verstanden. Bis dato ist noch kein zuverlässiges Modell vorhanden, mit dessen Hilfe der Beginn des Zündvorganges infolge des Eindringens eines heißen Abgasstrahls in ein unverbranntes, ruhendes Umgebungsgasgemisch beschrieben und im besten Fall vorhergesagt werden kann. Ein Hauptproblem stellt die Komplexität der Interaktion von Turbulenz und chemischen Reaktionen dar. Um die Effekte der Mischung von denen der chemischen Reaktionen abgrenzen zu können, werden im Rahmen des vorliegenden Projektes nicht-reaktive transiente Helium/Stickstoff-Freistrahlen experimentell in einer optisch zugänglichen Einspritzkammer untersucht.

Mit Hilfe des zeitaufgelösten fokussierten Schattenverfahrens und des linsenbasierten Laser-Schlieren Verfahrens werden die Eindringtiefe und die maximale radiale Ausdehnung eines instationären Freistrahls variabler Dichte, der in ruhende Luft eingedüst wird, untersucht. Ergänzend werden numerische Simulationen basierend auf der Lösung der Transportgleichung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (Probability Density Function, PDF) einer identischen Freistrahkonfiguration durchgeführt.

Der Begriff variable Dichte wird in diesem Zusammenhang nach der Definition von Chassaing et al. [7] verwendet. Dabei werden Dichteunterschiede in einem sich bewegenden Fluid auf Temperaturschwankungen und/oder Konzentrationsänderungen oder auf Änderungen der molaren Masse zurückgeführt, während durch Druckänderungen herbeigeführte Dichteschwankungen vernachlässigt werden. Diese Strömungen werden als dynamische inkompressible Strömungen bezeichnet. Ist die Dichteänderung alleine auf Druckänderungen zurückzuführen, so ist die dynamische Inkompressibilität gleichbedeutend mit einer Strömung konstanter Dichte.

3 Experimentelle Herangehensweise

Über eine Einspritzvorrichtung bestehend aus einem FSI-Ventil (fuel stratified injection, geschichtete Direkteinspritzung) mit sechs Injektionsöffnungen wird das Gasgemisch dosiert. Das Testgefäß inklusive der Einspritzanordnung ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

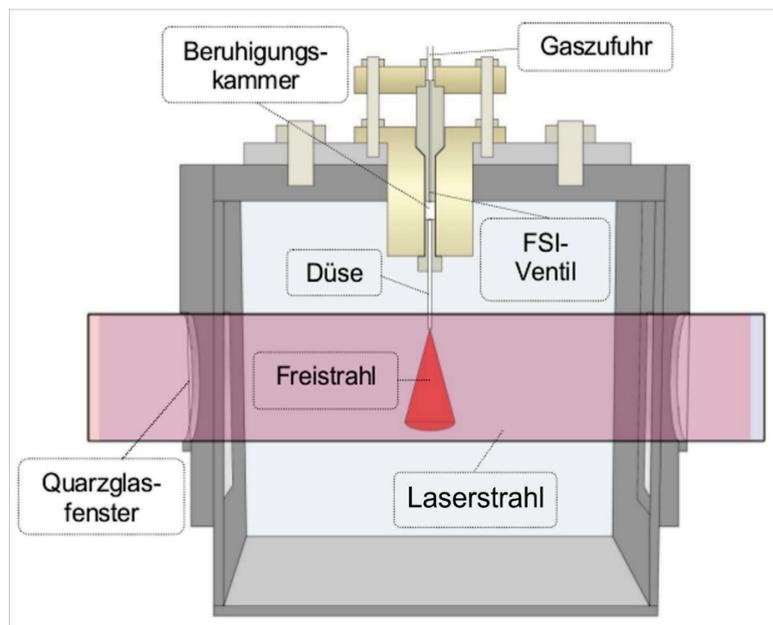


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Testgefäßes mit Injektionssystem

Nach Verlassen des FSI-Ventils expandiert das Gasgemisch in ein Beruhigungsvolumen und tritt anschließend in eine 70 mm lange Edelstahldüse mit einem Innendurchmesser D von einem Millimeter ein. Nachdem das Gasgemisch das Injektionssystem passiert hat, dringt der Freistrah in die Versuchskammer, welche an drei Seiten für die laserdiagnostischen Untersuchungen durch Quarzglasfenster optisch zugänglich ist, ein. An dieser Stelle kann der Gasdruck als weit unter dem Eingangsdruck $p_{\text{FSI-Ventil}}$ angesehen werden. Als Einströmdruck wird im Folgenden der Druck in der am FSI-Ventil anliegenden Gasleitung bezeichnet. Im Inneren des Gefäßes herrschen Normalbedingungen ($T \approx 293 \text{ K}$, $p \approx 1 \text{ bar}$). Da das Versuchsgefäß ein Volumen von 12 Litern aufweist, können Wand-einflüsse des Gefäßes auf die Freistrahlanordnung als vernachlässigbar betrachtet werden.

Die Dichte des Helium-/Stickstoffgemisches entspricht der Dichte eines heißen Abgasstrahls ($\rho = 0,31 \text{ kg/m}^3$) mit einer Temperatur von ungefähr 1000 K. Die Schallgeschwindigkeit des Gasgemisches wurde rechnerisch auf einen Wert von $c_{\text{He/N}_2}^* \approx 700 \text{ m/s}$ abgeschätzt.

Für die Untersuchung der maximalen Ausdehnung in radiale Richtung und der Eindringtiefe in Abhängigkeit der Zeit wurden das Laser-Schlieren-Verfahren (mit einer Punktblende, $d = 0,5 \text{ mm}$) und das fokussierte Schattenverfahren angewandt. Da beide Verfahren sehr gut übereinstimmende Resultate liefern, werden im Folgenden die Ergebnisse für die Eindringtiefe lediglich aus dem Schatten- und die Resultate der maximalen radialen Ausdehnung unter Verwendung des Schlieren Verfahrens dargestellt. Der verwendete Laser-Schlieren Aufbau ist in Abbildung 2 dargestellt. Für das Schattenverfahren wurde lediglich die Punktblende (roter Kasten) entfernt.

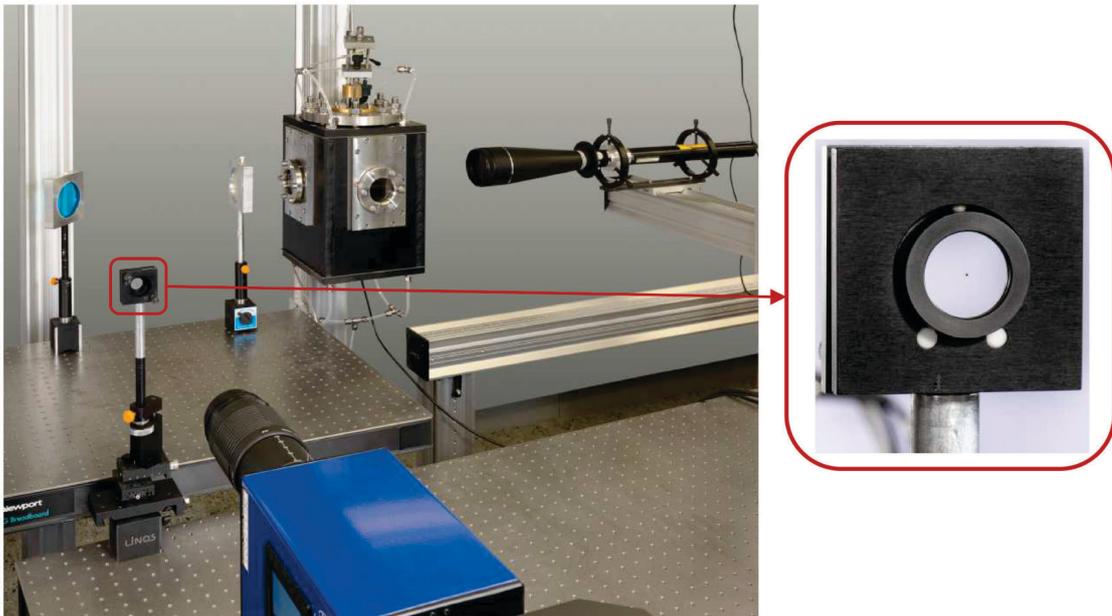


Abbildung 2: Linienbasierter Laser-Schlieren Aufbau mit ICCD Kamera

Sowohl dem Schlieren- als auch dem Schattenverfahren liegt das Prinzip der Brechungsindexunterschiede in Folge von Dichtegradienten zugrunde. Diese Dichtegradienten sind auf Temperaturänderungen von Hochgeschwindigkeitsströmungen zurückzuführen oder treten beim Mischen voneinander verschiedener Gasen auf. Somit ist ein Abbild des Freistrahls als ein entlang der Sichtlinie integriertes zweidimensionales Beugungsmuster zu erkennen [8].

Die Eindringtiefe und maximale radiale Ausdehnung der Freistrahlen können somit aus Einzelbildern bestimmt werden. Hierfür werden aufeinanderfolgende Bilder mit einer vier-Chip ICCD-Kamera (UltraSpeedStar4, LaVision) als Funktion der Zeit nach Austritt des

Freistrahls aus der Düse aufgenommen. Für ein und dieselbe Freistrahleindüsung können vier Bilder in Serie aufgenommen werden. Die Zeit zwischen diesen Bildern (t_{bf} = time between frames) kann im Bereich von Mikrosekunden variiert werden. Die gewählte t_{bf} beträgt für die ersten vier Zeitserien (bis $375 \mu\text{s}$ nach Austritt des Freistrahls aus der Düse) $25 \mu\text{s}$. Die t_{bf} der letzten aufgenommenen Zeitserie (beginnend bei $375 \mu\text{s}$) beträgt $50 \mu\text{s}$. Somit konnte ein Zeitbereich von insgesamt $550 \mu\text{s}$ untersucht werden. Zum Zeitpunkt des ersten aufgenommenen Bildes ist die Freistrahlfrente bereits etwa 2 Millimeter (2 Düsendurchmesser) aus der Düse ausgetreten. Es konnte beobachtet werden, dass selbst für spätere Zeitpunkte ($550 \mu\text{s}$) der Freistrahls immer noch transient war. Der Eingangsdruck $p_{\text{FSI-Ventil}}$ (Druck in der Gasleitung am Eintritt in das FSI-Ventil) variiert im Bereich von 30 bar bis hin zu 100 bar. Beim Eintritt in die Düse kann der Gasdruck p_{noz} in den ersten 1,5 ms als deutlich unter dem Eingangsdruck $p_{\text{FSI-Ventil}}$ angenommen werden, da der Eindüsvorgang instationär ist. Am Austritt der Düse kann das Gasgemisch als vollständig entspannt angesehen werden. Diese Annahme wird im Folgenden auch durch numerische Berechnungen bestätigt (siehe Abschnitt 5).

Um Informationen über statistische Schwankungen zwischen den einzelnen Freistrahleindüsvorgängen unter sonst nominell identischen Bedingungen zu erhalten, wurden für jede experimentelle Konfiguration und jeden der gewählten Zeitpunkte 50 Bilderserien aufgenommen. Für die Öffnungszeit des FSI-Ventils wurde eine Zeitspanne von 5 ms gewählt. Diese Zeitspanne hat sich als ausreichend lang erwiesen, um genügend Gas für die Erzeugung eines experimentell zugänglichen Freistrahls zur Verfügung zu stellen, ist andererseits noch kurz genug, um zu verhindern, dass sich aufeinanderfolgende Freistrahlen bei einer Wiederholungsrate von 1 Hz gegenseitig beeinflussen. Um die Daten der Eindringtiefe und der maximalen Breite der Freistrahlen zu extrahieren, wurde bei jedem Bild die jeweilige Freistrahlgrenze visuell ermittelt. In Abbildung 3 ist die Anfangsphase einer Freistrahlsreihe dargestellt, beginnend beim Zeitpunkt t_0 , bis hin zu turbulenten Freistrahlen $275 \mu\text{s}$ nach Aufnahme des ersten Bildes. Die Pfeile verdeutlichen die gewählten Positionen zur Ermittlung der maximalen Breite der Freistrahlen und ihre Eindringtiefe.

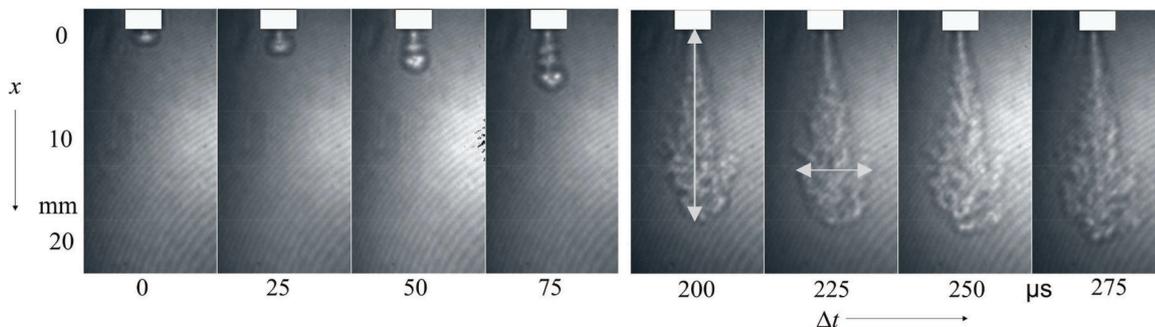


Abbildung 3: Freistrahlsbilder aufgenommen mit fokussiertem Schattenverfahren

4 Experimentelle Ergebnisse

Die Daten zur Ermittlung der Eindringtiefe wurden aus den Schattenbildern ermittelt. Die maximale Breite wurde aus den Laser-Schlieren-Bildern für Eingangsdrücke $p_{\text{FSI-Ventil}}$ (Druck in der Gasleitung am FSI-Ventil, nicht am Düseneintritt) von 70 bar und 90 bar bestimmt. Für jede Messserie und jeden Eingangsdruck, wurde der Zeitpunkt des ersten Bildes ermittelt, auf dem ein Freistrahls, deutlich sichtbar und von der Düse abgrenzbar war. Folglich kann der zeitliche Fehler im Bereich von $\pm 25 \mu\text{s}$ quantifiziert werden. Die dargestellten Zeiten beziehen sich auf den Zeitpunkt, zu dem erstmals ein Freistrahls deutlich erkennbar aus der Düse ausgetreten ist. Da die gemittelten Werte der Freistrahlsfrontpositionen des ersten aufgenommenen Bildes bei den verschiedenen Eingangsdrücken um weniger als 0,3 mm variieren, scheint diese Annahme gerechtfertigt zu sein. Abbildung 4 zeigt deutlich, dass die

Eindringtiefe Z_t/D (normiert auf den Düsendurchmesser) des Freistrahls für späte Zeitpunkte und mit steigendem Eingangsdruck ansteigt. Des Weiteren wird deutlich, dass selbst für späte Zeitpunkte nach Austritt aus der Düse der Freistrahls immer noch transient ist. Auch die Varianz der Bestimmung der Eindringtiefe für 50 Einzelbilder steigt mit zunehmendem Δt , dargestellt in Abbildung 4.

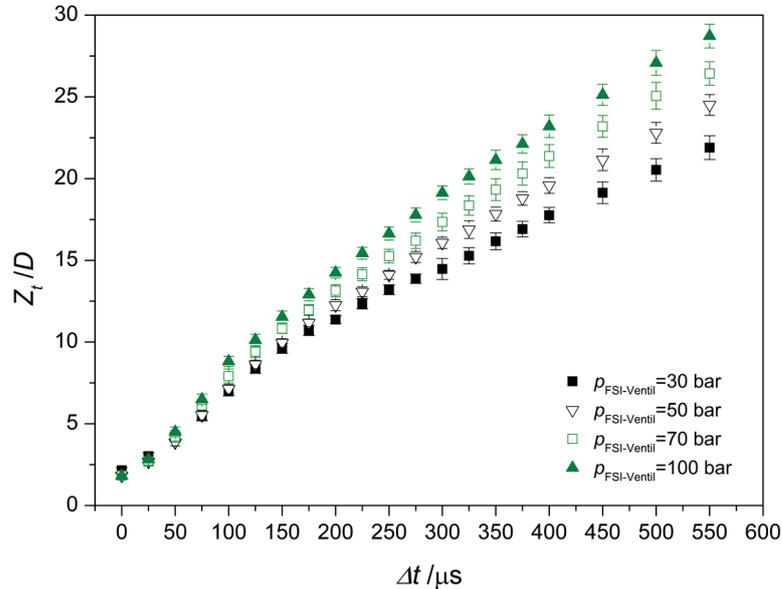


Abbildung 4: Normierte Eindringtiefe für unterschiedliche Eingangsdrücke als Funktion der Zeit (Schattenverfahren).

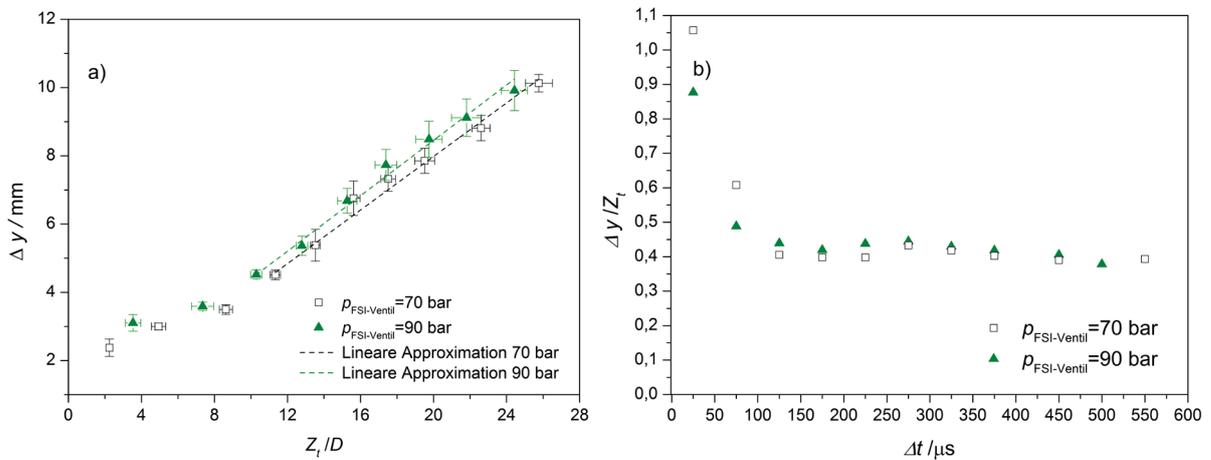


Abbildung 5: a) Maximale radiale Ausdehnung aufgetragen über die Eindringtiefe; b) Verhältnis maximale radiale Ausdehnung zu Eindringtiefe als Funktion der Zeit.

Abbildung 5a) zeigt die maximale radiale Ausdehnung Δy eines Freistrahls als Funktion seiner Eindringtiefe Z_t . Die maximale radiale Ausdehnung steigt bei Eindringtiefen größer als 9 bis 10 Düsendurchmessern linear mit steigender Eindringtiefe an. Die Ermittlung der Anpassungsgeraden mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate ergibt eine Steigung von $0,39 \pm 0,03$ für 70 bar Eingangsdruck und eine Steigung von $0,41 \pm 0,04$ für 90 bar.

In Abbildung 5b) ist das Verhältnis der maximalen radialen Ausdehnung zur Eindringtiefe als Funktion der Zeit graphisch dargestellt. Ab einem gewissen Abstand von der Düse strebt dieses Verhältnis gegen einen konstanten Wert. Dieser Abstand wird in der Literatur [9] als Übergangslänge (transition length) bezeichnet. Die Übergangslänge wird $150 \pm 25 \mu s$ nach dem ersten aufgenommenen Bild erreicht. Aus Abbildung 4 und 5 können Werte für die

Überganslängen von 9 bis 10 Düsendurchmesser sowohl für 70 als auch 90 bar bestimmt werden.

5 Vergleich mit numerischen Berechnungen

Zusätzlich zu den Experimenten wurden numerische Simulationen für einen instationären achsensymmetrischen inerten Helium/Stickstoff-Freistrahler durchgeführt, der bei Umgebungsbedingungen in ruhende Luft eintritt. Das Dichteverhältnis des Freistrahls zum Umgebungsgas (Luft) wurde, in Übereinstimmung mit dem Experiment, mit einem Wert von 0,26 angenommen. Um die turbulente Strömung zu modellieren, wird ein Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionsansatz (PDF) basierend auf einem kombinierten PDF-Modell [10,11] verwendet, welches mit Hilfe eines Monte-Carlo-Verfahrens gelöst wird. Dabei wird die Strömung durch ein Kollektiv an fiktiven Partikeln modelliert. Die Entwicklung der fiktiven Partikel ist bestimmt von einem stochastischen Differentialgleichungssystem. Für die Geschwindigkeitsentwicklung wird das vereinfachte Langevin-Modell (SLM) [10] verwendet. Dabei werden die in [12] beschriebenen Modellgleichungen und Konstanten verwendet.

Nach [9] ist die Freistrahleindringtiefe Z_t zum Zeitpunkt t proportional zur Quadratwurzel der Zeit nach Austreten des Freistrahls aus der Düse. Es gilt die nachfolgende Beziehung

$$Z_t = \Gamma \left(\frac{\dot{M}}{\rho_\alpha} \right)^{\frac{1}{4}} t^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

wobei \dot{M} die Impulsstromdichte am Düsenaustritt und ρ_α die Dichte des Umgebungsgases ist. Unter Annahme von Gleichung (1) wurde die Fortpflanzungsgeschwindigkeit am Düsenaustritt aus den experimentell ermittelten Daten der Eindringtiefe wie im Folgenden beschrieben abgeschätzt. Von den mit Hilfe des Schattenverfahrens ermittelten Daten wurde die Freistrahlfrotposition Z_t in Abhängigkeit der Zeit t bestimmt. Entsprechend [9] kann die Variable Γ in einem sich in der Anfangsphase befindenden Freistrahler als Konstante angenommen werden. Wie von Hill und Oulette in [9] vorgeschlagen, wurde der Wert dieser Konstante mit $3,0 \pm 0,1$ angenommen. Die Impulsstromdichte \dot{M} kann dann nach Gleichung (1) berechnet werden. Des Weiteren kann aus der Impulsstromdichte die Fortpflanzungsgeschwindigkeit am Düsenaustritt berechnet werden. Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse für die Bedingungen von zwei experimentellen Konfigurationen, 30 und 70 bar, mit den korrespondierenden mittleren Eintrittsgeschwindigkeiten von $U_j = 300$ m/s bzw. 400 m/s verglichen. Diese mittleren Eintrittsgeschwindigkeiten ergeben Machzahlen kleiner als 0,6. Die für die Simulationen verwendete Eingangsbedingung entspricht in Übereinstimmung mit der Literatur [5] einer Zylinderströmung für die Anfangsphase des Freistrahls vor Erreichen der stationären Phase. Die berechneten Eindringtiefen werden in Abbildung 6 mit den experimentellen Werten bei Eingangsdrücken von 30 und 70 bar verglichen.

Es kann eine gute Übereinstimmung der aus den experimentellen Daten erhaltenen Eindringtiefen mit den simulierten Ergebnissen festgestellt werden. Die Abweichungen, die sich für frühe Zeitpunkte in Abbildung 6 ergeben, sind möglicherweise darauf zurückzuführen, dass bei den Experimenten die Strömung in der Anfangsphase erst nach einiger Zeit ihre Maximalgeschwindigkeit erreicht, während bei den Simulationen eine stationäre Bedingung für den Impulsstrom am Düsenaustritt angenommen wird. Abbildung 7a) zeigt die normierte Eindringtiefe der Simulationsergebnisse und der experimentellen Daten in Abhängigkeit von der Quadratwurzel der Zeit. Es ist zu erkennen, dass die Steigung sowohl der berechneten Ergebnisse (gestrichelte Linien) als auch der experimentellen Daten (Symbole) sehr gut mit der erwarteten Steigung von 3 übereinstimmt. Des Weiteren weisen auch die experimentellen Daten (Symbole) eine konstante Steigung von 3 auf, die im Einklang mit der Literatur [9] steht.

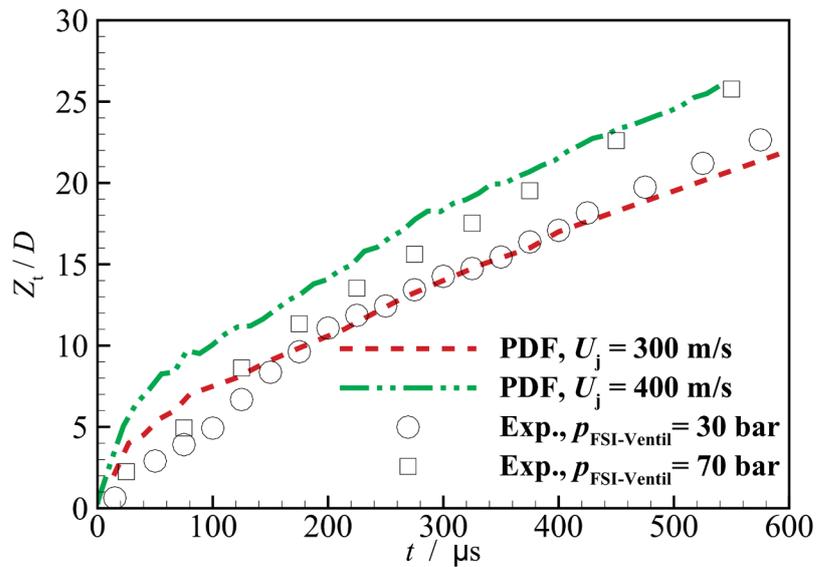


Abbildung 6: Vergleich Simulationsergebnisse mit den experimentellen Ergebnissen: Eindringtiefe aufgetragen über Zeit nach Aufnahme des ersten Bildes.

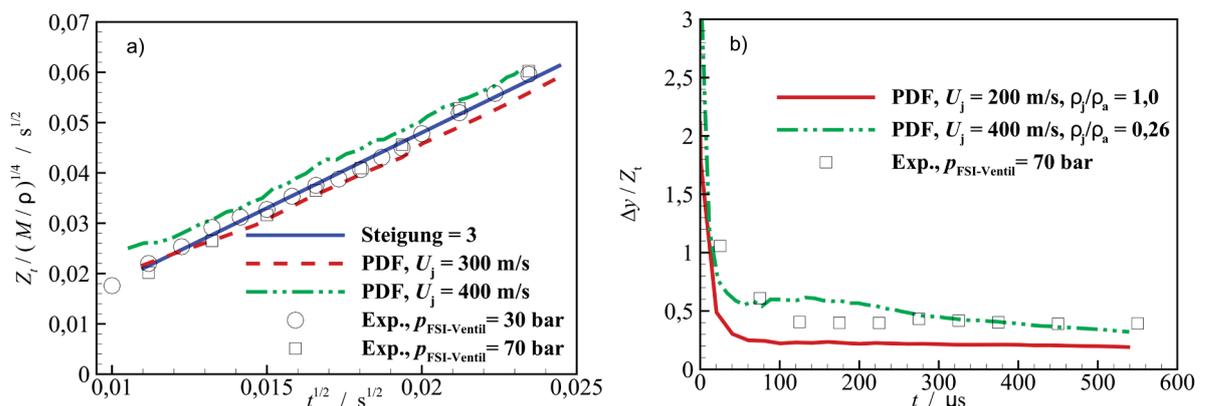


Abbildung 7: a) Normierte Eindringtiefe aufgetragen über die Quadratwurzel der Zeit; b) Verhältnis maximale Breite zu Eindringtiefe aufgetragen über die Zeit nach Austritt des Freistrahls aus der Düse.

Abbildung 7b) stellt die experimentellen Daten des Verhältnisses der maximalen radialen Ausdehnung zur Eindringtiefe des Freistrahls bei einem Eingangsdruck von 70 bar den berechneten Werten entsprechend einer Eintrittsgeschwindigkeit von $U_j = 400$ m/s gegenüber (gestrichelte Linie). Wiederum ist eine gute Übereinstimmung von numerischen und experimentellen Ergebnissen beobachtbar.

Vergleicht man die Simulationsergebnisse für Freistrahlen variabler Dichte (variable density) mit numerischen Berechnungen für Freistrahlen gleicher (uniform density) Dichte, ($\rho_j/\rho_a = 1$), bei als konstant gewählter Impulsstromdichte \dot{M} nähert sich das $\Delta y/Z_t$ -Verhältnis einem konstanten Wert von 0,20 an. Dieser Wert liegt innerhalb des bereits in der Literatur [9] für Freistrahlen konstanter Dichte beobachteten Bereiches von $0,25 \pm 0,05$. Der größere Wert für $\Delta y/Z_t$ bei Freistrahlen variabler Dichte von 0,4 ist darauf zurückzuführen, dass in Folge des Dichteunterschiedes ein Freistrahler geringerer Dichte eine größere radiale Ausdehnung bei kleinerer Eindringtiefe aufweist.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden Laser-Schlieren- und Schattenbilder von transienten Freistrahlen variabler Dichte aufgenommen. Ziel war hierbei, die Eindringtiefe und maximale radiale Ausdehnung der Freistrahlen in Abhängigkeit der Zeit und des Eingangsdrucks zu untersuchen. Aus den experimentell durchgeführten Untersuchungen wird deutlich, dass die normierte Eindringtiefe Z_t/D mit steigendem Eingangsdruck ansteigt.

Vergleicht man die experimentell ermittelten Eindringtiefen Z_t/D als Funktion der Zeit mit den im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführten PDF Simulationen unter der Annahme von mittleren Düsenaustrittsgeschwindigkeiten von 300 m/s und 400 m/s (berechnet nach Hill und Oulette [9]), stimmen die Ergebnisse gut überein. Für die Übergangslänge bis zum Erreichen einer selbstähnlichen Struktur des Freistrahls wurde für Eingangsdrücke von 70 und 90 bar ein Wertebereich von 9 bis 10 Düsendurchmessern bestimmt. Dieser Wert liegt im unteren Bereich der Werte, die von Hill et al. in [9] für Freistrahlen konstanter Dichte (uniform density) vorgeschlagen werden. Die erzeugten transienten Freistrahlen variabler Dichte nähern sich asymptotisch einer selbstähnlichen Struktur für einen $\Delta y/Z_t$ Wert von ca. 0,4 an. Die im Rahmen dieser Untersuchung ermittelten Werte sind geringfügig höher als der von Hill et al. in [9] vorgeschlagene Wert von $0,25 \pm 0,05$ für Freistrahlen konstanter Dichte.

Die im Rahmen dieser Untersuchung ermittelten Ergebnisse ermöglichen ein besseres Verständnis der Mischungsvorgänge in transienten Freistrahlen. Somit ist ein weiterer Schritt in Richtung der Entwicklung eines zuverlässigen numerischen Modells, das den Beginn des Zündvorgangs durch heiße Freistrahlen hinreichend gut beschreibt und vorhersagen kann, getan. Zukünftig werden PIV-Messungen (Particle imaging velocimetry) durchgeführt, um die Geschwindigkeiten in Bereichen fast unmittelbar am Austritt der Düse in Abhängigkeit unterschiedlicher Eingangsdrücke experimentell zu bestimmen und um somit weitere zuverlässige Eingangsdaten für PDF Simulationen zu erhalten.

Danksagung

Die Autoren möchten sich an dieser Stelle bei der DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) für die finanzielle Förderung dieses Projektes als Teilprojekt der Forschergruppe FOR 1447 „Physiochemical-based Models for the Prediction of safety-relevant Ignition Processes“ bedanken.

Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN 60079-0 (VDE 01701): Explosionsgefährdete Bereiche, 2013-04
- [2] U. Klausmeyer, M. Beyer, Enhancement of the safety of flameproof containments by clarifying the flame transmission phenomena, In: Proc. of the Int. Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions, Bergen, Norway (1996) 7.41–7.52
- [3] H. Steen, Handbuch des Explosionsschutzes, Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2000.
- [4] R. Sadanandan, Ignition by hot gas jets - A detailed investigation using 2D time resolved laser techniques and numerical simulations, Dissertation, Technische Universität Karlsruhe, 2007.
- [5] D. H. Lieberman, K. L. Parkin, J. E. Shepherd, Detonation initiation by a hot turbulent jet jet for use in pulse detonation engines, in: 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Indianapolis (2002) AIAA 2002-3909.
- [6] G. Fast et al, Combust. Flame 156 (2009) 200-213.
- [7] P. Chassaing, Variable Density Fluid Turbulence, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002.

- [8] G. S. Settles, Schlieren and Shadowgraph Techniques: visualizing phenomena in transparent media, Springer-Verlag, Germany, 2001.
- [9] P. G. Hill, P. Oulette, J. Fluids Eng. 121 (1999) 93-101.
- [10] S. Pope, Prog. Energy Combust. Sci. 11 (1985) 119.
- [11] P. R. Van Sooten, Jayesh, S. B. Pope, Phys. Fluids 10 (1998) 246-265.
- [12] A. Ghorbani, D. Markus, U. Maas, Application of a PDF method to variable-density jets, in: Proc. of the seventh international symposium on turbulence, heat and mass transfer, Palermo, Italy (2012).

Terms of Use

Any party may pass on this Work by electronic means and make it available for download under the terms and conditions of the Digital Peer Publishing License (DPPL) Version 3.0. The text of the license may be accessed and retrieved via Internet at <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0009-dppl-v3-en8>.

Beyond the conditions of the DPPL, the data which is contained in this catalog May only be used by any party for signal processing if the data is inserted into the source code of the program together with a reference to the catalog and if the program documentation (if available) also contains a reference to this catalog.

Exclusion of Liability

Deviating from paragraphs 12 and 13 of the DPPL Version 3.0, a comprehensive exclusion of liability applies. This states: This catalog is made available without any special or implied guarantee, which – among others – includes the implicit guarantee of the use of the catalog for a certain purpose. Under no circumstances is PTB responsible for any direct or indirect damage, independent of how it arose, through the use of the catalog. This also applies to damage due to errors of the catalog, which were already known at the occurrence of the damage.