

1 Einleitung und Motivation

Die fortschreitende Industrialisierung und Globalisierung haben große Verbesserungen für Menschen weltweit hinsichtlich der allgemeinen Gesundheit, der sicheren Versorgung mit Lebensmitteln und Produkten des täglichen Bedarfs sowie des Lebensstandards und der Lebenserwartung gebracht [1]. Diese messbare positive Entwicklung ist nur durch den Einsatz von zusätzlichen Energieträgern, meist durch Nutzung von fossilen Energievorkommen, möglich geworden. Als Folge der energetischen Nutzung der fossilen Energie ist seit längerer Zeit ein Anstieg der Konzentration von Gasen, die den Treibhauseffekt der Atmosphäre erhöhen, zu beobachten [2]. So hat sich die Konzentration von Kohlenstoffdioxid um 40 % erhöht und auch die Methan-Konzentration stieg um 150 %, verglichen mit dem Jahr 1750. Seit dem Abkommen von Kyoto im Jahr 1997 wird nach Wegen gesucht, um die weltweiten Emissionen von klimawirksamen Gasen zu begrenzen und zu reduzieren [3]. Im Jahr 2016 wurde das Abkommen von Paris geschlossen, welches weitreichende Zusagen von zahlreichen Staaten zur Senkung der Emissionen beinhaltet [4]. Die Ziele und Zeitpläne für dieses globale Vorhaben sind so weitreichend, dass jeder Lebens- und Arbeitsbereich von der Reduktion der Treibhausgasemissionen betroffen ist. Methan als Hauptbestandteil von fossilem Erdgas kommt dabei eine Schlüsselrolle zu [5]. Zunächst weist Methan mit einem Treibhausgaspotential (Greenhouse Warming Potential GWP gemäß IPCC für 100 Jahre) von 28 eine vielfach höhere Auswirkung auf den Treibhauseffekt auf als Kohlenstoffdioxid [2]. Wird jedoch Methan vollständig chemisch umgesetzt (z.B. bei der energetischen Nutzung durch Verbrennung), so können die entstehenden Kohlenstoffdioxid-Emissionen im Vergleich zu flüssigen Kohlenwasserstoffen um bis zu 25% gesenkt werden [6]. Folglich kann der Einsatz von Methan als Brückentechnologie zwischen der aktuellen Nutzung von flüssigen fossilen Kraftstoffen und der Erschließung neuer regenerativer Energien dienen [5]. Außerdem ist zu beachten, dass es zahlreiche Quellen für den Ausstoß von Methan gibt: Von Methan-Eisschollen in der Tiefsee [7] über Erdrisse in Gebieten mit Erdgasvorkommen [8] oder alten Kohleflözen [8] bis zu Mülldeponien [9] und Klärwerken [10] gibt es Emissionen von Methan. Können die Methanemissionen aus diesen Quellen genutzt und Methan zu Kohlenstoffdioxid und Wasser umgewandelt werden, so hat dies eine deutlich positive Auswirkung auf die gesamten Treibhausgasemissionen.

Erdgas oder Methan kann unter anderem in Gasturbinen, Brennstoffzellen, der chemischen Industrie oder Verbrennungsmotoren genutzt und umgewandelt werden. Aufgrund seiner vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten und im Vergleich zu Brennstoffzellen oder industriellen Prozessen geringen Anforderungen an die Reinheit des Kraftstoffs ist die Nutzung in Verbrennungsmotoren, in diesem Fall Gasmotoren, verbreitet. Neue Containerschiffe oder Kreuzfahrtschiffe werden mit Motoren für verflüssigtes Erdgas (Liquefied Natural Gas LNG) betrieben [11], [12]. Auch für den Einsatz im schweren Nutzfahr-

zeugbereich kommen Anwendungen mit Hochdruckeinblasung von LNG zum Einsatz [13]–[15]. Jedoch ist die Marktdurchdringung bisher gering. Mehrere Hersteller setzen in diesem Segment auf Motoren mit elektrischen Zündsystemen und komprimiertem Erdgas (Compressed Natural Gas CNG). Eine Studie [16], die die Emissionen im realen Fahrbetrieb auf der Straße von diesel- und erdgasangetriebenen Lastkraftwagen verglich, kam zum Ergebnis, dass die Modelle mit Erdgasbetrieb erhöhte Stickoxidemissionen aufwiesen und teilweise keinen deutlichen Vorteil hinsichtlich der entstehenden Kohlenstoffdioxid-Emissionen zeigten. Auch ist der Einsatz von LNG im Straßenverkehr herausfordernd [13]. Gerade bei Konzepten mit elektrischer Zündung führt der Betrieb mit stöchiometrischem Erdgas-Luftgemisch und katalytischer Abgasnachbehandlung zu Wirkungsgradverlusten im Vergleich zu konventionellen Antriebssträngen mit mageren Dieselmotoren. Dadurch können die Vorteile von Methan als Kraftstoff hinsichtlich der Treibhausgasemissionen nicht vollständig ausgespielt werden.

Dieser Sachverhalt stellt den Untersuchungsschwerpunkt der vorliegenden Arbeit dar: Können die vielversprechenden Erfahrungen bei erdgasbetriebenen Marinemotoren mit Dieselpiloteinspritzung auf schwere Nutzfahrzeugmotoren adaptiert werden? Ist es in dieser Motorgöße möglich, ein Brennverfahren mit homogenem Erdgas-Luftgemisch durch die Einspritzung einer geringen Menge Zündkraftstoff zu realisieren unter Einhaltung der immer höheren Anforderungen hinsichtlich Stickoxid- und Kohlenwasserstoffemissionen? Mögliche Anwendungsfelder der Technik sind dabei nicht auf den Bereich von On-Highway-Nutzfahrzeugmotoren beschränkt. Auch werden Verbrennungsmotoren dieser Hubraumklasse als Notstromaggregate und Blockheizkraftwerke sowie Antriebe für kleinere Schiffe genutzt. Gerade im Hinblick auf die Nutzung bestehender Quellen von Erdgas sind teils Aufstellungsorte weit entfernt von menschlicher Zivilisation zu verzeichnen. Hier könnte eine Technologie mit Zündeinspritzung Vorteile bieten, wenn dadurch die Wartungsintervalle verlängert werden können.

Hinsichtlich dieser Überlegungen wäre eine „chemische Zündkerze“ wünschenswert. Darunter kann eine Einspritzanlage verstanden werden, welche kleinste Energiemengen (und damit Kraftstoffmengen) zur Zündung des homogenen Kraftstoff-Luft-Gemischs in den Brennraum einbringt.

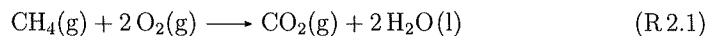
Um diesem Ziel näher zu kommen, werden in der vorliegenden Arbeit alle beteiligten Subsysteme der Einspritzung und des Brennraums analysiert und Optimierungsvorschläge erarbeitet. Beginnend mit einer Übersicht über publizierte Erkenntnisse zu Gasmotoren und Einspritzsystemen (Kapitel 2) werden der Versuchsträger und die verwendeten Analysemethoden in Kapitel 3 vorgestellt. Danach erfolgt eine numerische Berechnung der reaktionskinetischen Bedingungen bei Zündeinspritzungen bzw. der Zündstrahlverbrennung (Kapitel 4). Anhand einer eindimensionalen Simulation des gewählten Injektors werden Optimierungsvorschläge zur stabilen Einspritzung von Kleinstmengen kleiner als 1 mg dargelegt. In Kapitel 5 werden die Ergebnisse der optischen und thermodynamischen Untersuchungen an Druckkammer und Einzylindermotor beschrieben. Abschließend erfolgt in Kapitel 6 eine Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick auf mögliche weitere Ansätze für die Realisierung von Kleinstmengeneinspritzungen.

2 Ausgewählte Grundlagen der gasmotorischen Verbrennung

Mit der Verfügbarkeit von Leuchtgas begannen zu Beginn des 19. Jahrhunderts Entwicklungen für Hubkolbenmotoren mit innerer Verbrennung für stationäre Anwendungen. Jedoch erst im Jahre 1860 gelang es Etienne Lenoir einen funktionierenden Gasmotor mit elektrischer Zündung zu entwickeln [17]. Seit mehr als 150 Jahren wurden Weiterentwicklungen und Verbesserungen an diesem ersten Konzept eines Hubkolbenmotors mit innerer Verbrennung erfolgreich durchgeführt. Für die allgemeine Beschreibung eines Gasmotors, dessen Funktionsweise und Bauformen, sei daher auf [6], [18]–[20] verwiesen. Die vorliegende Arbeit befasst sich hauptsächlich mit der Analyse und Optimierung der Verbrennung und Zündung von Gasmotoren, weswegen im Folgenden ausgewählte Grundlagen zusammengefasst werden.

2.1 Gasmotorische Verbrennung

Gasmotoren nutzen meist kurzkettenige, gasförmige Kohlenwasserstoff-Gemische mit einem hohen Methan-Gehalt als Kraftstoff. Teilweise sind auch Wasserstoff, Sauerstoff, Kohlenstoffmonoxid oder Kohlenstoffdioxid in der Gaszusammensetzung enthalten [21], [22]. In Hubkolbenmotoren mit innerer Verbrennung wird im Hochdruckteil des Arbeitsprozesses die vollständige Verbrennung unter Freisetzung der chemischen Energie des Gases angestrebt. Unter Vernachlässigung von Begleitgasen kann die vollständige Reaktion beschrieben werden mit (R.2.1):



Diese exotherme Reaktion findet unter der Bildung von sichtbaren Flammen statt, welche je nach gewähltem Kraftstoff-Luft-Verhältnis Licht unterschiedlicher Wellenlängen emittieren können. Grundsätzlich kann ein Verbrennungsprozess hinsichtlich der Art der Kraftstoff-Luft-Mischung (vorgemischt und nicht-vorgemischt) und des vorliegenden Strömungsfeldes (laminar und turbulent) unterteilt werden [23]. Da die meisten Gasmotoren nach dem Otto-Prinzip gemischansaugend (vorgemischt) arbeiten, wird zunächst die vorgemischte Verbrennung beschrieben.

2.1.1 Vorgemischte Verbrennung

Zur Untersuchung der vorgemischten Verbrennung werden häufig Experimente mit Brennern in einem laminaren Strömungsfeld durchgeführt, bei denen Brennstoff und Luft vor Brenneraustritt vollständig vorgemischt vorliegen (z.B. Bunsenbrenner) [23], [24]. Durch Variation der Ausströmgeschwindigkeit kommt es zu einem instabilen, kurzzeitigen Schwebезustand der Flamme, bei dem die Ausströmgeschwindigkeit der laminaren Brenngeschwindigkeit entspricht [25]:

$$s_{l,u} = v_{u,n} \quad (2.1)$$

Die laminare Brenngeschwindigkeit ist dabei ein charakteristischer Stoffwert, welcher von den thermodynamischen Größen Druck p , Temperatur T , Verbrennungsluftverhältnis λ und der Abgasrückführate (AGR) abhängig ist. Neben der laminaren Brenngeschwindigkeit kann die vorgemischte, laminare Flamme anhand der Flammendicke δ_l beschrieben werden. In Abb. 2.1 ist der Konzentrationsverlauf einer CH_4 -Luft-Flamme unter motorischen Randbedingungen dargestellt. Die Reaktionszone oder Flammendicke δ_l , definiert zwischen den Punkten der maximalen Steigungsänderung (Maximum und Minimum der 2. Ableitung $\frac{\partial^2 T}{\partial s^2}$) des Temperaturverlaufs, weist dabei nur eine Dicke von ca. 0,5 μm auf, deutlich weniger als unter atmosphärischen Bedingungen.

Die dargestellte Temperatur in der Oxidationszone wird als adiabate Flammentemperatur bezeichnet. Die exotherme Reaktion erhöht dabei die Gastemperatur um mehr als 1200 K. Findet die Flammenausbreitung in einem geschlossenen System statt, so ergibt sich eine deutliche Dichteänderung. Das heiße Rauchgas weist eine deutliche Dichtereduktion bei konstantem Druck auf. Es findet daher eine Volumenänderung statt, welche die Flamme in einer Strömung mitbewegt. Mit der sogenannten Flammengeschwindigkeit $s_{f,l,u}$ kann unter Kenntnis der jeweiligen Dichten die laminare Brenngeschwindigkeit $s_{l,u}$ berechnet werden:

$$s_{l,u} = \frac{\rho_b}{\rho_u} s_{f,l,u} \quad (2.2)$$

Bei Ottomotoren werden jedoch deutlich höhere Umsatzraten und folglich höhere Brenngeschwindigkeiten gemessen. Durch Turbulenz kommt es zu einer Vergrößerung und Aufzaltung der Oxidationszone, welche den effektiven Kraftstoffumsatz deutlich steigert [27]. Hierbei können anhand der Turbulenzintensität im Verhältnis zur Brenngeschwindigkeit der Flamme unterschiedliche Auffaltungen (Ebene Flamme, Inselbildung, Flamelet) unterschieden werden [24]. Eine Abmagerung oder Erhöhung der AGR-Rate bewirken eine Reduzierung der laminaren Brenngeschwindigkeit und können somit bei gleichbleibender Turbulenzintensität zu einer stärkeren Auffaltung der Flamme führen [28]. In Kombination mit einem späten Verbrennungsbeginn kann dies im Hauptteil des Brennraums während der sinkenden Temperatur der Expansionsphase zu einem Flammenverlöschen

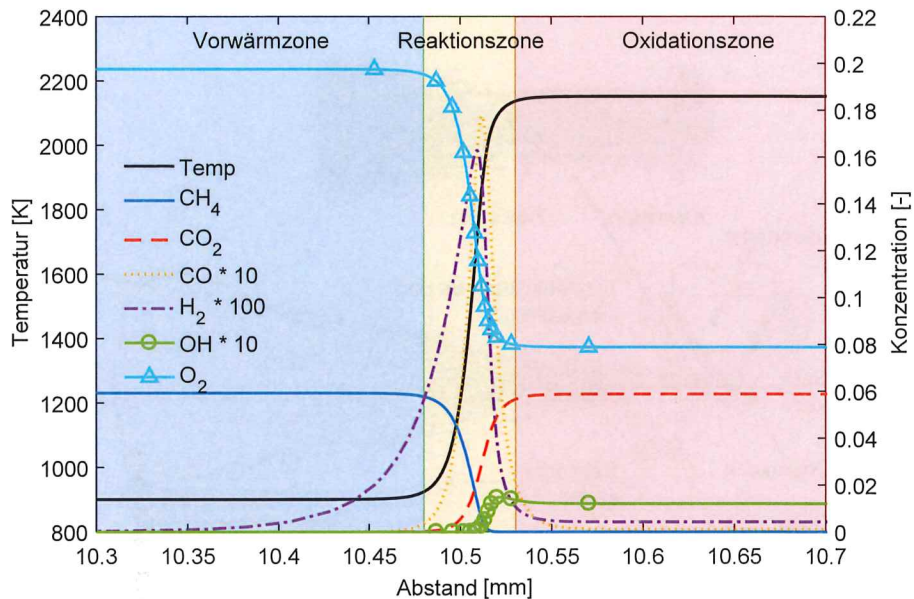


Abbildung 2.1: Berechnung des Verlaufs der Konzentrationen innerhalb einer vorgemischten, laminaren CH_4 -Luft-Flamme unter motorischen Randbedingungen, $T_u = 900K$, $p_u = 70 \text{ bar}$, $\Phi = 0.65$, GRI30 [26]

führen (auch als „bulk quenching“ bezeichnet). Auch in der Nähe von kalten Oberflächen (z.B. Brennraumwänden), engen Spalten (z.B. Feuersteg) kann der Effekt des „flame quenching“ oder der Flammenverlöschung auftreten. Da im Bereich der verlöschenden Flamme dennoch ein homogenes Kraftstoff-Luft-Gemisch vorhanden ist, stellt der Effekt des Quenchings eine Hauptursache für unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC) im Abgas bei vorgemischten Brennverfahren dar. Neben der Flammenverlöschung stellen Schmierölanlagerung und Verdampfung eine weitere Quelle der HC-Emissionen dar [27].

2.1.2 Nicht-vorgemischte Verbrennung

Bei der nicht-vorgemischten Verbrennung wird der Kraftstoff direkt in eine Brennkammer eingespritzt oder eingeblasen. Im motorischen Kontext ist der Dieselmotor das verbreitetste Anwendungsbeispiel einer nicht-vorgemischten, turbulenten Verbrennung mit Selbstzündung [29]. Während bei vorgemischter Verbrennung oftmals eine homogene Verteilung von Kraftstoff und Luft vorliegt (und gewünscht ist), liegen bei nicht-vorgemischter Verbrennung Inhomogenitäten in der Kraftstoff-Luft-Verteilung vor. Diese werden durch die Art und Form der Kraftstoffeinbringung (z.B. Direktein-

spritzung, Vorkammereinspritzung) in den Brennraum beeinflusst [30].

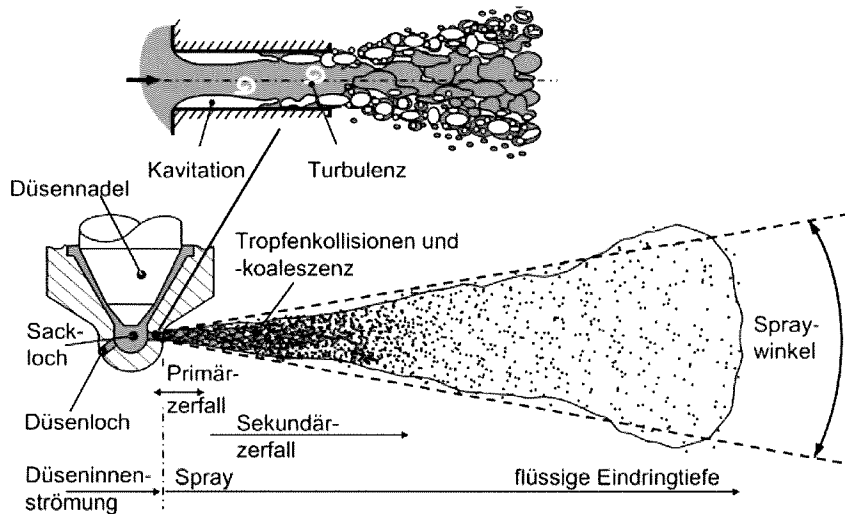


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der Düseninnenströmung und des Strahlaufbruchs aus [29], nach [30]

In Abbildung 2.2 wird ein schematischer Einspritzvorgang einer Diesel-Sacklochdüse in den Brennraum dargestellt. Der unter Hochdruck stehende Kraftstoff strömt dabei an der geöffneten Düsennadel vorbei, wird am Düsen Eintritt umgelenkt und strömt am Düsenaustritt aus (Düseninnenströmung). Hierbei können durch ein hydroerosives Verformen des Düsen Eintritts und eine nach innen öffnende Konizität des Düsenlochs die Turbulenz und das Auftreten von Kavitationen im Spritzloch beeinflusst werden [31], [32]. Der aus der Düse austretende Kraftstoff zerfällt in größere Tropfen oder längliche Ligamente; dieser Vorgang wird als Primärzerfall bezeichnet. Durch die Interaktion mit dem umgebenden Gas zerfallen die Tropfen des Sprays zu immer kleineren Tropfen (Sekundärzerfall) [33]. Außerdem kann es zu Kollisionen und Koagulation der Tropfen kommen. Der hohe Strahlimpuls der Einspritzung bewirkt eine Einzugströmung des umgebenden heißen Arbeitsgases in den Spray (Air-Entrainment) [29], [30]. Infolgedessen erhöht sich die Temperatur des Sprays nach Düsenaustritt und der Kraftstoff verdampft. Die Verdampfung ist dabei von der gebildeten Tröpfchenoberfläche, der Gastemperatur, den Kraftstoffeigenschaften und der eingezogenen Luftmasse abhängig [34], [35]. Diese Parameter können somit maßgeblich durch den Sprayimpuls und den Sprayzerfall beeinflusst werden [36]. Während des Hebens und Senkens der Düsennadel stellt der Ringspalt zwischen Nadel und Düse den geringsten Strömungsquerschnitt dar, man spricht von Nadel-sitzdrosselung. Hierdurch wird Turbulenz vor dem Düsen Eintritt erzeugt, welche zu Inhomogenitäten im Spraybild und einer geringeren Strahleindringtiefe führen können [37]. Für eine detaillierte Beschreibung der Schadstoff-Emissionen und ihrer Entstehung sei auf [27], [29], [36] verwiesen. Die jeweiligen Schadstoff- und Treibhausgasemissionen