



DeepL

Abonnieren Sie DeepL Pro, um größere Dateien zu übersetzen.

Weitere Informationen finden Sie unter www.DeepL.com/pro

Vergleich der Verbrennung von Ammoniak und Methan in einem Zündbrennstoff-Zweistoffgemisch

S. Wüthrich, P. Albrecht, P. Cartier, und K. Herrmann
*Institut für Wärme- und Fluidtechnik (ITFE),
Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW), Hochschule für Technik und Architektur
Klosterzelgstrasse 2, CH-CH-5210 Windisch, Schweiz*

Tagungsband - Rostocker Großmotorensymposium 2022

Prof. Dr.-Ing. Bert Buchholz

(Herausgeber) und 75 Co-Autoren

ISBN 978-3-941554-25-2



Die Zukunft der Großmotoren VII

7th Großmotorensymposium, Rostock 2022

Die Zukunft der Großmotoren

Technologiekonzepte und Kraftstoffoptionen - Wege zur sauberen Schifffahrt

mit 237 Abbildungen und 37 Tabellen



Universität
Rostock



Traditio et Innovatio

FVTR-Lehrbuchreihe

Die Zukunft der Großmotoren VII

1. Auflage

Rostock, September 2022

FVTR-Lehrbuchreihe

Herausgegeben von

© FVTR Forschungszentrum für Verbrennungsmotoren und Thermodynamik Rostock GmbH

Joachim-Jungius-Str. 9, D-18059 Rostock, Deutschland

Tel.: +49 381-4059650

Fax: +49 381-4059657

E-Mail: office@fvtr.de

Web: <https://fvtr.de/>

Vergleich der Verbrennung von Ammoniak und Methan in einem Zweistoffgemisch mit Pilotbrennstoffzündung

Silas Wüthrich, Patrick Albrecht, Patrick Cartier und Kai Herrmann

Institut für Wärme- und Fluidtechnik (ITFE)

Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) Klosterzelgstrasse 2, CH-5210 Windisch,

Schweiz

Abstrakt

Im Hinblick auf die Reduzierung der Treibhausgasemissionen ist der Übergang von fossilen Brennstoffen zu nachhaltigen Energieträgern eine Voraussetzung, um die globale Erwärmung in erträglichen Grenzen zu halten. Da Verbrennungsmotoren in einer Übergangsphase weiterhin eine Rolle in den globalen Energiestrategien spielen werden, insbesondere bei schwer zu elektrifizierenden Großmotorenanwendungen, kann die Verwendung von Ammoniak als Ersatzbrennstoff ein Ansatz zur Dekarbonisierung sein. Die Nutzung von Ammoniak als Ersatzbrennstoff kann ein Ansatz zur Dekarbonisierung sein, muss aber noch erforscht werden, da Zündkonzepte und Verbrennungseigenschaften im Hinblick auf einen zuverlässigen und effizienten Betrieb noch erhebliche Herausforderungen darstellen.

Die optische Triebwerksprüfanlage *Flex-OeCoS* wurde erfolgreich angepasst und ermöglicht Untersuchungen zur Verbrennung von Dodekan mit vorgemischtem Ammoniak und zwei Kraftstoffen. Sie bietet für Verbrennungsmotoren relevante Betriebsbedingungen wie Drücke, Temperaturen und Strömungsbedingungen (Turbulenz) sowie eine einstellbare Gemischzusammensetzung und Pilotkraftstoffeinspritzung. Es wurde eine thermodynamische Analyse der Wärmefreisetzung in Bezug auf die Zünd- und Verbrennungseigenschaften erstellt. Simultan angewandte Hochgeschwindigkeits-Schlieren/OH*-Chemilumineszenzmessungen ermöglichen die Untersuchung des Verbrennungsprozesses.

Die vorgemischte Verbrennung von Ammoniak mit zwei Brennstoffen wurde mit dem Verbrennungsprozess von Methan verglichen. Die Zündungsverzögerung, der Verbrennungsübergang und die turbulente Flammenausbreitung sowie die Wärmefreisetzung wurden unter Variation des Luft-Kraftstoff-Äquivalenzverhältnisses, des Beginns der Pilotkraftstoffeinspritzung und anderer Betriebsbedingungen untersucht. Unterschiedliche Gaseigenschaften (niedrigerer Heizwert, Luft-Kraftstoff-Verhältnis) zeigen eine deutlich geringere Reaktivität, die sich auf die Wärmefreisetzung und Flammenausbreitung auswirkt. Darüber hinaus besteht eine starke Abhängigkeit vom Luft-Kraftstoff-Äquivalenzverhältnis (Energiegehalt) und den Temperaturbedingungen in Bezug auf die Zündverzögerung, den Übergang in die Zweistoffverbrennung und die entsprechende Wärmefreisetzung. Die optischen Untersuchungen bestätigen die thermodynamische Analyse und fördern die Bewertung der Verdampfung des Pilotbrennstoffs, der Zündung, des Übergangs der Kombination und der Flammenausbreitung. Die Schlussfolgerungen geben einen Einblick in die thermo-chemischen Prozesse bei der Verbrennung von Ammoniak-Pilotbrennstoff, der mit zwei Brennstoffen gezündet wird.

1. Einführung

Das Ziel einer kohlenstoffneutralen Gesellschaft ist im Pariser Abkommen, einem rechtsverbindlichen internationalen Vertrag über den Klimawandel, festgeschrieben und zielt darauf ab, den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf deutlich unter 2°C über dem vorindustriellen Niveau zu halten und die Anstrengungen zur Begrenzung des Temperaturanstiegs auf 1,5°C zu verstärken [1]. Daher müssen im Laufe dieses Jahrhunderts sowohl der private als auch der industrielle Sektor ihre Treibhausgasemissionen auf Null reduzieren. Neben einer kontinuierlichen Verbesserung der Energieeffizienz durch technische und betriebliche Maßnahmen ist die Elektrifizierung auf der Basis erneuerbarer Energien der effizienteste Ansatz, um dieses Ziel zu erreichen. Andererseits ist die direkte Nutzung von Elektrizität aufgrund der begrenzten Energiedichte von Batterien bei bestimmten Anwendungen in den Industriesektoren nur begrenzt oder gar nicht möglich. Dies gilt insbesondere für die Schifffahrt, wo - abgesehen von bestimmten Nischenanwendungen wie Fähren oder Kurzstreckenseeverkehr - der Wechsel von fossilen zu erneuerbaren Kraftstoffen eine der vielversprechendsten Optionen für die Dekarbonisierung ist. Da große Verbrennungsmotoren weiterhin eine Rolle für den Schiffsantrieb spielen werden, ist der Übergang von fossilen Brennstoffen zu nachhaltigen Energieträgern eine der Notwendigkeiten, um die Treibhausgasemissionen zu reduzieren und die globale Erwärmung in tolerierbaren Grenzen zu halten. Nachhaltige Kraftstoffe können entweder durch Synthese auf der Basis erneuerbarer Energien oder durch die Verarbeitung von biologischen Abfällen und Rückständen gewonnen werden. Das Potenzial von Biokraftstoffen ist mengenmäßig begrenzt, während synthetische Kraftstoffe je nach Raffinierungsgrad mit einem Preisnachteil verbunden sind.

Es wurden verschiedene Technologiepfade für Verbrennungsmotoren und Kraftstoffsysteme für den künftigen Schiffsantrieb untersucht. Für die Substitution fossiler Brennstoffe wurden Ammoniak oder Methanol als mögliche Kandidaten für einen wirtschaftlich machbaren Weg zur Dekarbonisierung identifiziert [2]. Natürlich müssen diese Kraftstoffe mit erneuerbaren Energien hergestellt werden, und nur Ammoniak kann als CO₂-frei angesehen werden - da Methanol immer noch Kohlenstoff enthält, muss das für die Produktion benötigte CO₂ aus nichtfossilen Quellen stammen (direkte Luftabscheidung), um zumindest als kohlenstoffneutral zu gelten. Alle möglichen Optionen im Hinblick auf die Verwendung als postfossiler Brennstoff - einschließlich "grüner" Wasserstoff für bestimmte Anwendungen - haben Vor- und Nachteile in Bezug auf Anwendungsbereich, Handhabung, Effizienz, Kosten, Umweltrisiken usw. Insbesondere die Verwendung von Ammoniak hat in letzter Zeit zunehmend an Aufmerksamkeit gewonnen und wird von verschiedenen Interessengruppen als einer der vielversprechendsten künftigen Kraftstoffe angepriesen. In verschiedenen Studien wurde das Potenzial für den Einsatz in der Seeschifffahrt unter Kosten- und Produktionsgesichtspunkten untersucht [3-8]. Obwohl Ammoniak ein seit Jahrhunderten bekanntes Produkt ist, wurde es bisher hauptsächlich zur Herstellung von Düngemitteln verwendet und noch nicht in größerem Umfang als Kraftstoff eingesetzt. Im Hinblick auf zukünftige Motoren- und Kraftstoffsysteme werden bis 2050 verschiedene Übergangsphasen erwartet. Im laufenden Jahrzehnt wird der Anteil von verflüssigtem Erdgas (LNG) voraussichtlich noch zunehmen, bevor der gewünschte Übergang zu Methanol oder Ammoniak erfolgt. Auch wenn die Verwendung nachhaltiger Kraftstoffe, die durch die Synthese erneuerbarer Energien (Power-to-X oder Synfuels) oder durch die Verarbeitung geeigneter biologischer Abfälle und Reststoffe (Biokraftstoffe) hergestellt werden, obligatorisch ist, wird die Verwendung von LNG als Schiffs kraftstoff in einer Übergangsphase im nächsten Jahrzehnt und darüber hinaus wahrscheinlich noch gegeben sein.

Aktuelle Konzepte von Gasmotoren gelten als gute Grundlage für zukünftige Lösungen, die für den Betrieb mit solchen alternativen Kraftstoffen ausgelegt sind. Obwohl die Verwendung von Ammoniak als Kraftstoff für Verbrennungsmotoren nicht neu ist, stellt die Umwandlung, die einen vergleichbaren Wirkungsgrad und einen zuverlässigen Betrieb gewährleisten soll, gewisse Herausforderungen an die Zündkonzepte und Verbrennungseigenschaften. Eine Reihe von komplexen Prozessen wie Strömungsfeldbedingungen, Verdampfungs- und Vermischungseigenschaften, Zündung, Verbrennungsbeginn und Flammenbildung müssen dabei berücksichtigt werden. In dieser Arbeit wurde eine optisch zugängliche Versuchsanlage mit triebwerksrelevanten Betriebsbedingungen genutzt, um vorgemischte Pilotkraftstoffzündungen grundlegend zu untersuchen.

Methan vs. Ammoniak Dual-Fuel (DF) Verbrennung. Die Untersuchungen umfassen Ebenen typischer Betriebsbedingungen für Dual-Fuel-Motoren in der Schifffahrt mit Verdichtungstemperaturen um 800 K und Spitzendrücken bis 180 bar und darüber hinaus. Der Einfluss verschiedener Betriebsparameter, wie z.B. der Gemischzusammensetzung oder der Prozesstemperaturen und -drücke, wurde untersucht. Erste Einblicke in die thermo-chemischen Prozesse der Verbrennung in Bezug auf Zündverzögerung, Verbrennungsbeginn, Dual-Fuel-Verbrennungsübergang, turbulente Flammenausbreitung und Wärmefreisetzung sollen gegeben werden.

2. Versuchsaufbau, Testdurchführung und Auswertung

Der optisch zugängliche Prüfstand *Flex-OeCoS* ermöglicht die Untersuchung von vorgemischten, pilotgezündeten Dual-Fuel-Verbrennungsprozessen in einem Bereich von verbrennungsmotorisch relevanten Betriebsparametern [9]. Die Erfassung von kurbelwinkelaufgelösten Betriebszuständen in Form von präzisen Druck- und Temperaturmessungen (mittels Feindrahtthermoelementen an verschiedenen Stellen) sowie die Bestimmung des turbulenten Strömungsfeldes (mittels Hochgeschwindigkeits-PIV) ist etabliert [10]. Der anpassungsfähige Aufbau mit flexiblen Betriebsmodi wurde bereits für verschiedene Untersuchungen von Dual-Fuel-Verbrennungsprozessen eingesetzt [11-14].

2.1. Prüfeinrichtung Flex-OeCoS

Abbildung 1 zeigt das Funktionsprinzip des Flex-OeCoS-Prüfstandes: Ein Zylinder eines motorgetriebenen Motorblocks speist eine Gemischladung in eine optische Brennkammer ($\text{\O}60 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$), die durch rechteckige und runde Saphirfenster an jeder Seite einen maximalen optischen Zugang bietet. Zwei Einlassventile ($\text{\O}16 \text{ mm}$) befinden sich auf dem Arbeitszylinder, der mit einem Flachkolben ausgestattet ist. Zwei Auslassventile ($\text{\O}16 \text{ mm}$) befinden sich auf der Oberseite der Verbrennungskammer, wo eine zentrale Bohrung an der Oberseite die Montage einer Pilotkraftstoffeinspritzung, einer Zündkerze oder einer Vorkammer ermöglicht. Verschiedene Drucksensoren sind an unterschiedlichen Stellen eingebaut, und der gesamte Kopf ist thermisch konditioniert, um stabile Bedingungen während des aperiodischen Betriebs zu erreichen.

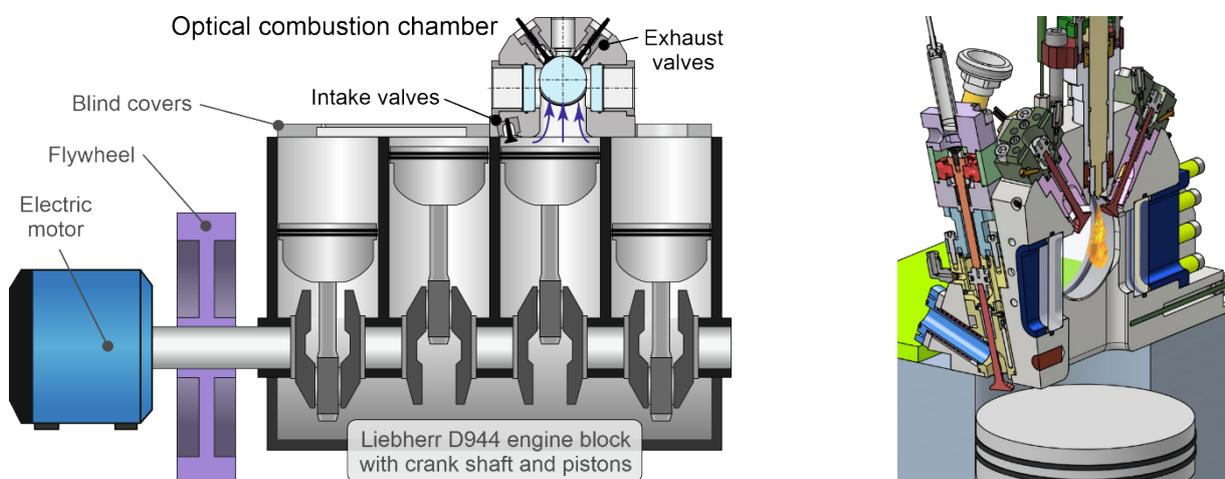


Abbildung 1: Konzept der Flex-OeCoS-Testanlage. (links) und Zylinderkopf des Arbeitszylinders mit optischer Brennkammer, Einlass-/Auslassventilen und zentrierter Pilotkraftstoffeinspritzung (rechts).

Der Flex-OeCoS-Prüfstand zeichnet sich durch einen anpassungsfähigen Betrieb unter verbrennungsmotorisch relevanten Bedingungen aus: Spitzendrücke von bis zu 240 bar (von boost-

einstellbarem Verdichtungsdruck p_c bis zu 130 bar), Gemischladetemperaturen T zwischen 700 - 1000 K durch Einlasskonditionierung und abstimmbare Strömung (Turbulenzgrade) in Abhängigkeit von der Motordrehzahl n von typischerweise 300 - 1000 U/min. Eine Übersicht über die relevanten Prüfstandsspezifika ist in Tabelle 1 enthalten.

Tabelle 1: Spezifikationen der Prüfeinrichtung und Parametereinstellungen.

Abmessungen, Betriebsparameter			Referenzwerte (Luftladung)		
Arbeitszylinderbohrung	Ø 130	[mm]	Ansaugladedruck p_b	2.65 / 4.4 / 5.8	[bar]
Länge des Hubs	150	[mm]	Kompressionsdruck p_c	70 / 100 / 130	[bar]
Länge der Pleuelstange	237.1	[mm]	Ansaugtemperatur T_{inn}	50 / 100	[°C]
Verdrängung (Arbeitszylinder)	1990	[cm] ³	Motordrehzahl n	600	[rpm]
Verdichtungsverhältnis	13.8	[-]	Turbulenzintensität u' [9]	3.6	[m/s]
Durchmesser/Höhe der optischen Brennkammer	Ø 60 / 20	[mm]			
Max. Flaschendruck	240	[bar]			
Motorleistung	200 / 1000	[Watt]			

Unabhängige pneumatische Einlass- und Auslassventilantriebe sorgen für hohe Variabilität. Darüber hinaus können die Einstellungen für die Voreinspritzung (Druck, Start und Dauer) sowie die Zusammensetzung des Gemischs durch Gaseinleitung in die Lufteinlassleitung in der Nähe des Einlassventils durch externe Versorgungseinheiten frei eingestellt werden.

2.2. Optischer Aufbau, Methodik und Nachbearbeitung

Wie in Abbildung 2 dargestellt, wurde die simultane Hochgeschwindigkeits-Schlieren-/OH*-Chemilumineszenz zur Untersuchung der Pilotkraftstoffeinspritzung und -verdampfung, der Zweistoffzündung, der turbulenten Flammenfrontentwicklung und der Verbrennungseigenschaften eingesetzt. Die Bildaufnahme wurde mit zwei Hochgeschwindigkeitskameras durchgeführt: Die Chemilumineszenz des OH*-Radikals als Indikator für die Entzündung wurde gleichzeitig mit dem Schlierensignal aufgenommen, das flüssige und verdampfte Phasen anzeigt. Die räumliche Auflösung wurde auf 60×60 mm (für die gesamte Brennkammer) eingestellt, um eine zeitliche Auflösung von 0,1 °CA, für die typische Motordrehzahl von $n = 600$ U/min, was zu einer Bildfrequenz von 36 kHz führt.

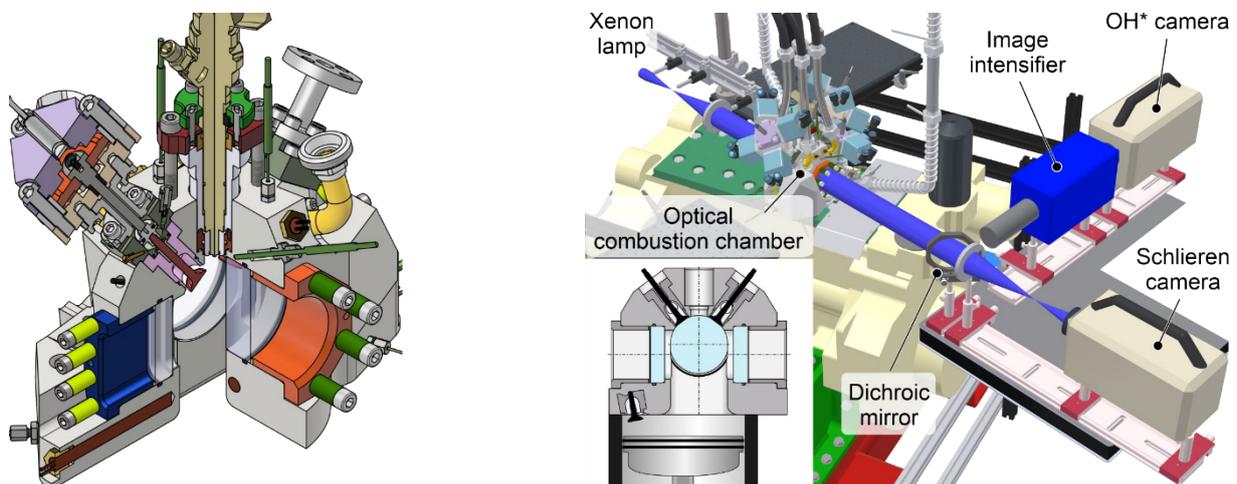


Abbildung 2: Optisch zugängliche Brennkammer (links) und Aufbau der gleichzeitig angewandten Schlieren- und OH*-Chemilumineszenz-Messverfahren (rechts).

Die Bestimmung des effektiven Injektionsbeginns SOI basiert auf der Schlieren-Sprühkontur. Aufgrund hoher Turbulenzen führt eine Detektion des Sprays/der Flamme mit einem Schwellenwert oft zu Fehlern. Daher basiert die Erkennung auf einer vordefinierten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, die von der Bildzone (Hintergrund, dichter Kern, Flamme) abhängt, um Pixelwerte einem bestimmten Ort zuzuordnen. Allerdings ist selbst bei höchsten Kamerabildraten eine systematische Erfassung jedes tatsächlichen Einspritzbeginns nicht möglich, da dieser aufgrund der inhärenten, leicht abweichenden hydraulischen Verzögerung des Injektors nicht exakt zeitlich bestimmt werden kann. Unter der realistischen Annahme, dass die Sprühfläche

zunächst linear ansteigt, wurde der effektive Einspritzbeginn aus den ausgewerteten Sprühflächenwerten extrapoliert.

Die OH*-Chemilumineszenz entspricht der Zündung und stellt ein integriertes Sichtliniensignal über das gesamte Messvolumen dar. Auch wenn andere Spezies (z.B. CO*), insbesondere unter mageren Bedingungen bei hohen Drücken, erheblich zum gesamten OH*-Signal bei fortschreitender Verbrennung beitragen können [15], erscheint die erste OH*-Chemilumineszenzemission zumindest gleichzeitig mit der Zündung [16]. Auch die Interferenz der Rußglut beeinträchtigt den Zündnachweis (noch) nicht [17]. Der Beginn der (Hochtemperatur-) Verbrennung wurde daher als das erste Auftreten von OH* bzw. das erste Bild mit einem "helleren Fleck" definiert [18]. Die automatische optische Zündverzögerungserkennung erwies sich als zuverlässig, auch im Vergleich zur entsprechenden Zündverzögerungserkennung aus der Wärmefreisetzungsanalyse.

2.3. Messverfahren und Analyse

Die Einstellungen in Tabelle 1 (Ansaugtemperatur T_{in} , Ladedruck/Kompressionsdruck p_b / p_c , Turbulenzintensität u') basieren auf reiner Luftverdichtung. Diese Werte sind als Referenzwerte für alle Untersuchungen mit Gas/Luft-Zündflamme angegeben, bei denen bestimmte Parameter, wie z. B. der effektive Verdichtungsdruck p_c und die Temperatur T_c , von den spezifischen Gas- bzw. Gemischladungseigenschaften abhängig sind.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Betriebseinstellungen der durchgeführten Messungen in Bezug auf die Ladebedingungen des Ammoniak/Luft- bzw. Methan/Luft-Gemisches, wie z. B. das Luft-Kraftstoff-Äquivalenzverhältnis λ und den Beginn der Pilotkraftstoffeinspritzung (SOI). Sie umfasst außerdem die Variation der Einstellungen für die Dodekan-Pilotkraftstoffeinspritzung (Bosch CRI-2-Magnetventil) durch eine Einlochdüse mit $\varnothing 103 \mu\text{m}$. Einspritzdruck, Einspritzbeginn und Einspritzdauer (basierend auf der anfänglich ermittelten Charakteristik der Einspritzrate in Abhängigkeit von der Einschaltzeit) können unabhängig voneinander über eine separate Kraftstoffversorgungseinheit eingestellt werden. Die hier vorgestellten Ergebnisse beziehen sich jedoch nur auf eine konstante Einspritzdauer (DOI), um eine davon unbeeinflusste Bewertung der anderen Betriebsparameter zu ermöglichen.

Tabelle 2: Messbetrieb und Einstellungen der Parameter für die Pilotkraftstoffeinspritzung.

NH3/Luft und CH4/Luft Gemischladung		Parameter für die Pilot-	
Luft-Kraftstoff-Äquivalenzverhältnis λ_{NH3}	2.0 / 1.75 / 1.5 / 1.25 / 1.0	Pilotkraftstoff	Dodekanes
Luft-Kraftstoff-Äquivalenzverhältnis λ_{CH4}	0,8 – 3,0 (in 0,1 Schritten)	Düsendurchmesser	$\varnothing 103$ (gemessen) [μm]
Beginn der Gasaufnahme	60 °CA vor dem Öffnen des Einlassventils	Einspritzdruck p_{inj}	1000 [bar]
Kompressionsdruck p_c	einstellungsabhängig → siehe Ergebnisse	Beginn der Einspritzung SOI-20 / -15 / -10 / -5 / 0 [°CA]	
Verdichtungstemperatur T_c	einstellungsabhängig → siehe Ergebnisse	Einschaltzeit ET	500 [μs]
		Dauer der Injektion DOI	523 [μs]

Der Beginn der Einspritzung, die Zündverzögerung (Ort), der Beginn der Verbrennung und die Flammenausbreitung wurden durch Nachbearbeitungsverfahren der gleichzeitig durchgeführten Schlieren- und OH*-Chemilumineszenzmessungen ausgewertet. Die Verbrennungswärmefreisetzungsrates wurde mit Hilfe eines internen thermodynamischen 2-Zonen-Modells analysiert, das die Dissoziation in der Verbrennungsgaszone berücksichtigt und Verluste durch Wandwärmeübertragung, Kolbenringdurchblasen und Spaltvolumen einbezieht [19]. Aufgrund des besonderen Aufbaus der Prüfanlage (optische Brennkammer vs. Arbeitszylinder) wurden

erhebliche Anstrengungen zur Erfassung des Präzisionsdrucks unternommen [20]. Die Wandwärmeverluste wurden mit einem angepassten Woschni-Ansatz (inklusive erweitertem Wärmeübergangskoeffizienten α_w basierend auf Strömungsmessungen) abgeschätzt, das Kolbenring-Blow-by gemessen und das Spaltvolumen zeichnerisch bestimmt. Da das Modell der Wandwärmeverluste jedoch durch charakteristische Konstanten angepasst werden musste, werden die Ergebnisse als scheinbare Wärmeabgaberate $aHRR$ bezeichnet.

Die Zündverzögerung lässt sich sowohl aus optischen Daten (OH*-Chemilumineszenz) als auch aus den berechneten Wärmefreisetzungsraten ableiten. Die für die Verbrennung verfügbare Gesamtenergie ist die Summe aus dem Energiegehalt des eingespritzten Pilotkraftstoffs und der in der vorgemischten Zylinderladung enthaltenen Energie. Wenn man davon ausgeht, dass der Energiegehalt des Zündstrahls vollständig freigesetzt wurde, bevor die Hauptladung zu brennen beginnt, lässt sich ein Schwellenwert für die Wärmefreisetzung festlegen, der den Beginn der vorgemischten Gemischkombination markiert. Diese Verzögerung zwischen der Zündung und dem Zeitpunkt, an dem die Wärmefreisetzung den Energiegehalt des eingespritzten Pilotkraftstoffs übersteigt, wird als *Übergangszeit* bezeichnet. Die Energie der vorgemischten Ladung, die sich im verdampfenden Kraftstoffnebel befindet und mit diesem zusammen verbrennt, wird bei dieser Definition nicht berücksichtigt. Je länger also die Zündverzögerung ist, desto größer ist die Menge der vorgemischten Ladung, die zusammen mit dem Pilotbrennstoff verbrennt, und desto mehr unterschätzt diese Übergangszeit die Zeit, die für die Verbrennung der gesamten verdampften Brennstoffsprühmenge erforderlich ist. Nichtsdestotrotz ist diese Zeit ein wichtiger Wert zur Charakterisierung der DF-Verbrennung und spiegelt die Reaktivität bei den Temperatur-/Druckbedingungen während der Entzündung wider.

Aus den Schlierenmessungen kann eine *scheinbare Flammenausbreitungsgeschwindigkeit* s_{aFP} ermittelt werden, bzw. die Konturverschiebung, die die Flammenoberfläche darstellt. Die hier angewandte Methode besteht aus einer zweidimensionalen, räumlich gemittelten Auswertung der Reaktionszonenausdehnung auf der Grundlage der optischen Messungen. Sie löst das lokale Verhalten sehr gut auf (d.h. große Ausbreitungsgeschwindigkeiten), ist aber auch anfälliger für eine falsche Identifizierung der verbrannten Zonen, da sie immer noch eine gewisse Unsicherheit bei der Differenzierung der Brechungsindexvariation enthält. Darüber hinaus kann der Effekt der Flammenkompression und -expansion nicht für ausgeprägte Druckschwankungen korrigiert werden, und die ermittelte s_{aFP} beinhaltet immer den Effekt der expandierenden verbrannten Zone. So wirken sich höhere Druckverhältnisse stärker auf das resultierende s_{aFP} aus als niedrigere Luft-Kraftstoff-Äquivalenzverhältnisse. Der gewählte Ansatz kann jedoch (lokale) Transportphänomene berücksichtigen und führt zu einer exakten Aussage bezüglich der frühen Verbrennungsphase. Die Bezeichnung "scheinbar" soll darauf hinweisen, dass die analysierte Flammenausbreitungsgeschwindigkeit als qualitativer Wert zu interpretieren ist, der dennoch einen Vergleich innerhalb der Betriebsparametervariation ermöglicht.

Die Eigenschaften der verglichenen Brennstoffe (Ammoniak vs. Methan) und Dodekan als Pilotbrennstoff sind in Tabelle 3 dargestellt. Die geringe Flammengeschwindigkeit von Ammoniak führt zu einem langsameren Verbrennungsprozess, der die Verbrennungseffizienz verringern kann. Die hohe Selbstentzündungstemperatur und die enorme Verdampfungswärme erschweren die Flüssigkeitseinspritzung und die dieselähnliche Verbrennung mit Selbstzündung. Die hohe Mindestzündenergie bedeutet, dass es vergleichsweise schwieriger ist, ein Ammoniak-Luft-Gemisch sicher zu zünden. Die hohe Klopfestigkeit (*RON*) ermöglicht es, mit Ammoniak betriebene Motoren mit höheren Verdichtungsverhältnissen zu betreiben, was sich positiv auf die Effizienz auswirken kann. Obwohl Ammoniak einen viel geringeren Energiegehalt pro Masse hat als kohlenstoffbasierte Standardkraftstoffe, gleicht sein niedriges stöchiometrisches Luft-Kraftstoff-Verhältnis (*AFR*) dies in Bezug auf den Energiegehalt im Zylinder teilweise aus.

Tabelle 3: Eigenschaften von Ammoniak, Methan und dem Pilotbrennstoff n-Dodekan. Die Daten wurden nur zum Vergleich aus [21-26] entnommen.

	Lagerungsbedingungen	Dichte @ Lagerbedingungen [kg/m ³]	LHV @ Lagerungsbedingungen [MJ/kg] [GJ/m ³]	Entflammbarkeitsgrenzen in Luft [Vol-%]	Stoichiometrischer AFR (Masse) [-]	LHV pro Vol. @ Stöchiometrie (0,1 MPa, 373 K) [MJ/m ³]	Temperatur der Selbstzündung [K]	Mindestzündenergie [mJ]	Verdampfungswärme [kJ/kg]	LBV @ stoichiometrie (0,1 MPa, 300 K) [m/s]	RON [-]
Ammoniak _{NH₃} (flüssig)	1,1 MPa 300 K	600	18,8 MJ/kg 11,3 GJ/m ³	15 - 28	6.1 : 1	~ 2.23	930	8	1370	0.07	> 130
Methan _{CH₄} (komprimiert)	25 MPa 300 K	187	50 MJ/kg 9,4 GJ/m ³	5 - 15	17.3 : 1	~ 2.45	860	~ 0.21	-	0.38	120
n-Dodekan _{C₁₂H₂₆} (Diesel)	0,1 MPa 300 K	750	45 MJ/kg 33 GJ/m ³	0.6 - 7.5	~ 15 : 1	-	480	(Diesel ~0.23)	256	~ 0.8	-

3. Ergebnisse

Die vorgestellten Ergebnisse stammen zum Teil aus der weiteren Datenanalyse einer ersten Ammoniak-Messkampagne [14] und entsprechend durchgeführten zusätzlichen Messungen für den Methanfall. Es wird ein Einblick in die Verbrennung von Ammoniak und Methan mit zwei Brennstoffen gegeben, die durch einen Dodekan-Pilot ausgelöst wird, und zwar in Bezug auf die Zündverzögerung, den Beginn der Verbrennung, den Übergang zur Verbrennung mit zwei Brennstoffen, die Flammenausbreitung und die Wärmefreisetzung.

3.1. Veränderung des Luft-Kraftstoff-Äquivalenzverhältnisses λ

Abbildung 3 zeigt einen Vergleich der Druckentwicklung für Methan- und Ammoniakgemische mit einem Luft-Kraftstoff-Äquivalenzverhältnis $\lambda = 1,0 / 1,5 / 2,0$. Die Dodekan-Piloteinspritzung ($ET = 500 \mu s$) wurde in beiden Fällen bei $SOI = -10 \text{ }^\circ CA$ eingeleitet, was einer Verdichtungstemperatur von etwa 790 K entspricht [14]. Die Druckkurve stellt den gemittelten Wert von fünfundzwanzig Verbrennungszyklen super- durch die Standardabweichung (STD) auferlegt. In Bezug auf die Energie- bzw. Wärmefreisetzung sind zwei Aspekte zu berücksichtigen: Zum einen ist der spezifische Heizwert von Ammoniak im Vergleich zu Methan weniger als halb so groß (Tabelle 3, LHV : 18,8 MJ/kg vs. 50 MJ/kg). Andererseits benötigt Ammoniak für eine stöchiometrische Verbrennung weniger Luft (Tabelle 3, AFR : 6,1 vs. 17,3) als Methan. Letztlich führt die (konstante) Gemischfüllmenge in der Flex-OeCoS-Versuchsanlage während eines Versuchszyklus zu leicht unterschiedlichen Energiegehalten bei der Verbrennung von Ammoniak und Methan. So ist der Energiegehalt des Ammoniak-Luft-Gemischs bei einem Luft-Äquivalenzverhältnis von $\lambda = 1,0$ um 7,7 % niedriger als im Fall von Methan. Dementsprechend ist der Energiegehalt für $\lambda = 1,5$ und $\lambda = 2,0$ um 3,7 % bzw. 1,5 % niedriger.

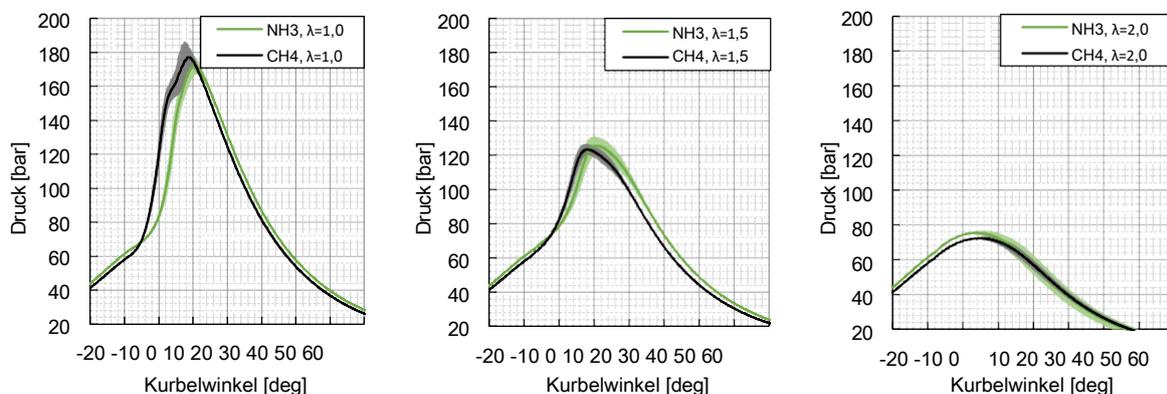


Abbildung 3: Flaschendruck der pilotgezündeten Ammoniak- vs. Methan-PF-Verbrennung (inkl. Standardabweichung) für $\lambda = 1,0 / 1,5 / 2,0$ bei Betriebsparametern $p_c = 70 \text{ bar}$, $T_m = 50 \text{ }^\circ C$, $SOI = -10 \text{ }^\circ CA$, $ET = 500 \mu s$.

Unter der Annahme identischer Verbrennungsumsatzraten hängen die Spitzendrücke nur von der Energiemenge und der Lage des Verbrennungszentrums ab. Bezogen auf den LHV bzw. AFR ist der Druckanstieg durch die Verbrennung, insbesondere bei niedrigen Luft-Kraftstoff-Äquivalenzverhältnissen, für Ammoniak erwartungsgemäß etwas geringer als für Methan. Die geringere Druckanstiegsrate von Ammoniak, bedingt durch seine geringere Reaktivität, verschiebt das Zentrum der Verbrennung nach hinten. Dennoch ist der erreichte Flaschendruck angesichts der niedrigen laminaren Flammengeschwindigkeit, die im Vergleich zu Methan eine viel langsamere Verbrennungsgeschwindigkeit impliziert, recht überraschend.

In Abbildung 4 sind die scheinbaren Wärmefreisetzungsraten $aHRR$ dargestellt. Auch hier steigen die

Wärmefreisetzungsraten aufgrund der höheren Reaktivität des Luft/Methan/Dodekan-Gemischs im Vergleich zu Ammoniak viel schneller an, aber die $aHRR$ -Spitzenwerte und ihre maximalen Gradienten sind recht ähnlich. Die Standardabweichung (in blasser Farbe dargestellt) ist bei der Verbrennung von Ammoniak sogar etwas geringer als bei Methan. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die geringere Reaktivität von Ammoniak bedeutet, dass weniger Brennstoff bei einer hohen Verbrennungsrate gezündet wird, was zu Brennkammerschwingungen führt. Diese sind im $aHRR$ leicht zu erkennen und treten vor allem bei

wenn die Verbrennungszone den Quetschspalt erreicht. Darüber hinaus ist bei Methan eine deutliche zweiphasige Wärmefreisetzung zu beobachten (bei Ammoniak weniger ausgeprägt), was auf die besondere Konstruktion des Prüfstands zurückzuführen ist: Die gekippte optische Brennkammer wird durch den Arbeitszylinder gespeist, wobei diese beiden zusammenhängenden Volumina einen gestuften Verbrennungsprozess bewirken. Die sich durch die optische Brennkammer ausbreitende Flamme kann sich durch die enge Verbindung in den Motorzylinder weiter ausbreiten und die Ladung im konstruktionsbedingt großen Quetschspaltbereich verbrennen. Dieser Effekt ist bei schneller Wärmefreisetzung ausgeprägter, da sich bei langsameren Prozessen die Verbrennung in der optischen Kammer und im Arbeitszylinder überlagert, was den gestuften Verbrennungsprozess weniger deutlich macht. Verbrennungsmotortypische Werte, die das Verbrennungsverhalten in späteren Verbrennungsphasen beschreiben (z.B. verbrannter Massenanteil bei 50% / 90%), sollten daher nicht mit den Messungen des *Flex-OeCoS* verglichen werden, das für die optische Untersuchung der Zündung, des Verbrennungsbeginns und des frühen Flammenausbreitungsprozesses optimiert wurde.

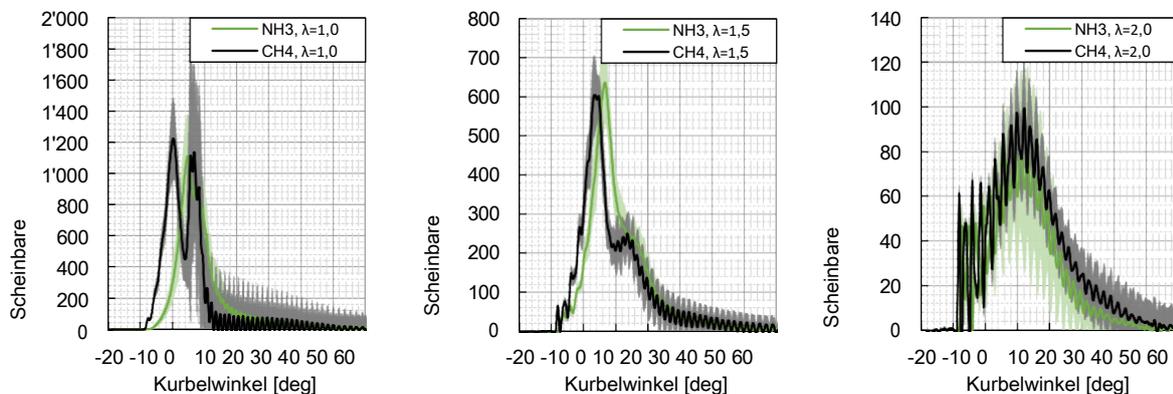
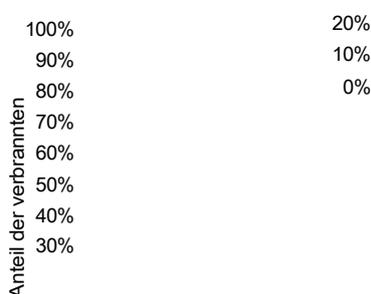


Abbildung 4: Scheinbare Wärmefreisetzungsraten (einschl. Standardabweichung, blasse Farbe) bei der Verbrennung von Ammoniak mit Pilotbrennstoff im Vergleich zum Methan-PF für $\lambda = 1,0 / 1,5 / 2,0$ bei Betriebsparametern $p_{pc} = 70 \text{ bar}$, $T_{in} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$, $SOI = -10 \text{ }^\circ\text{CA}$, $ET = 500 \text{ } \mu\text{s}$.

Die in Abbildung 5 dargestellten integrierten Verbrennungsraten bestätigen den früheren Start und die anfänglich schnellere Verbrennung von Methan im Vergleich zu Ammoniak. Im magersten Fall ($\lambda = 2$) lässt die langsame Verbrennungsgeschwindigkeit sowohl von Ammoniak als auch von Methan den größten Teil des Kraftstoffs unumgewandelt, wenn der laufende Expansionshub den Verbrennungsprozess beendet. Wie bereits erwähnt, wird die späte Verbrennungsphase durch die gestufte Verbrennung im *Flex-OeCoS* stark beeinflusst, so dass die maximalen Kraftstoffumwandlungsraten nicht mit den in konventionellen Motoren mit ungeteilten Brennkammern beobachteten Werten verglichen werden können. Außerdem sind die hier angegebenen maximalen Konversionsraten aus den scheinbaren Wärmefreisetzungsraten berechnet und sollten mit Vorsicht behandelt werden, da sie noch nicht durch entsprechende Abgasmessungen validiert werden können. Trotz der erwarteten niedrigeren Konversionsraten im Vergleich zu einer konventionellen Brennkammer liefert das *Flex-OeCoS* eine bemerkenswert hohe Konversionsrate bei $\lambda = 1,5$, was nicht nur für Methan, sondern auch für Ammoniak gilt.



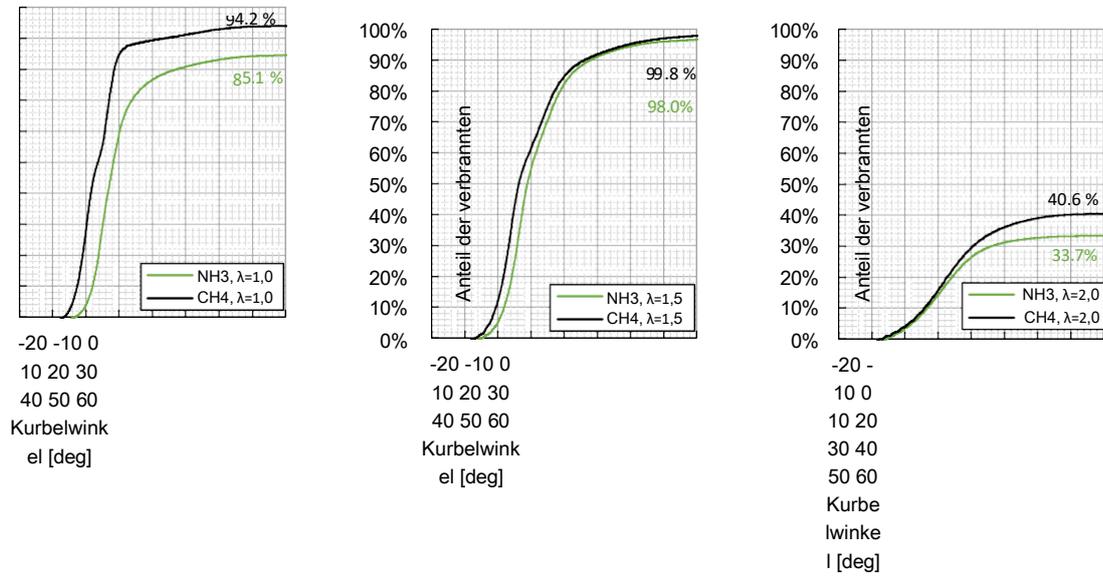


Abbildung 5: Integrierte Verbrennungsrate der mit Pilotbrennstoff gezündeten Ammoniak- vs. Methan-PF-Verbrennung für $\lambda = 1,0 / 1,5 / 2,0$ bei den Betriebsparametern $p_c = 70 \text{ bar}$, $\tau_{in} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$, $SOI = -10 \text{ }^\circ\text{CA}$, $ET = 500 \text{ } \mu\text{s}$.

Wie zuvor beschrieben, kann aus den Hochgeschwindigkeits-Schlierenmessungen eine scheinbare Flammenausbreitungsgeschwindigkeit s_{aFP} ermittelt werden. Die Ergebnisse in Form der λ -Variation sind in Abbildung 6 für beide Brennstofffälle dargestellt. Zu Beginn ist es schwierig, die frühe Flammenentwicklung vom verdampfenden Pilotspray zu unterscheiden. Nachdem sich die Verbrennung jedoch in die vorgemischte Charge ausgebreitet hat, sind die berechneten Werte recht stabil, insbesondere wenn sie durch die ersten nachgewiesenen OH*-Radikale unterstützt werden, die den Beginn der Verbrennung markieren. Wie erwartet, weist Methan in der frühen Phase der (vorgemischten) Verbrennung eine höhere scheinbare Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit s_{aFP} auf als Ammoniak. Im Folgenden findet eine Angleichung an eine äquivalente Größenordnung statt. Die Volumenänderung durch den laufenden Expansionshub hat einen Einfluss auf die scheinbare Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit. Aufgrund des schnellen Verbrennungsbeginns mit hohen Anfangswerten s_{aFP} ist dieser Effekt im Kompressionshub schwach ausgeprägt, kann aber im Expansionshub zu einer Überschätzung der geringen scheinbaren Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit führen. Dennoch ist er ein Hinweis auf die unterschiedliche Flammenausbreitung im Hinblick auf (lokale) Transportphänomene in der frühen Verbrennungsphase. Bei höheren Luft-Kraftstoff-Äquivalenzverhältnissen spiegelt sich die langsamere Verbrennung magerer Gemische nicht nur im abnehmenden s_{aFP} wider, sondern auch in seinem langsameren Rückgang zurück auf Null.

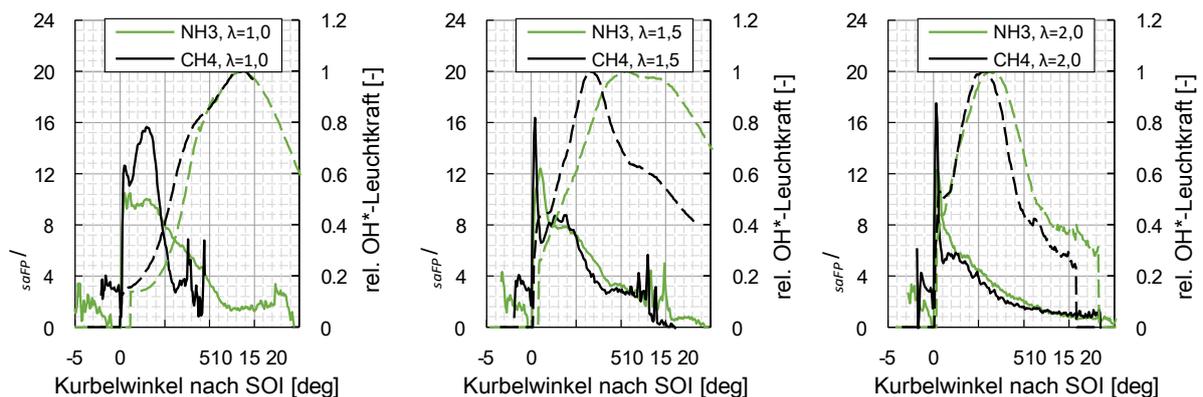
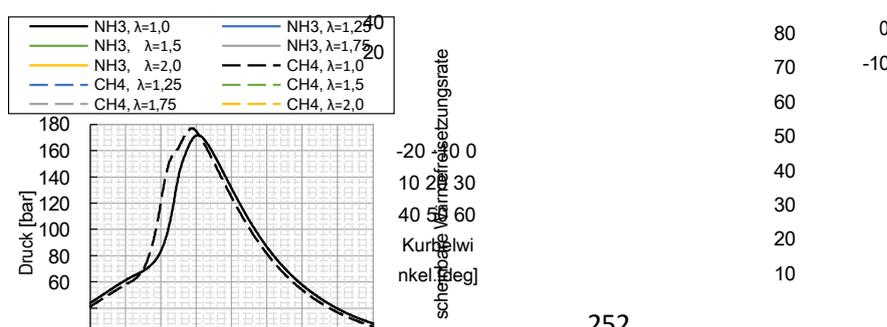


Abbildung 6: Scheinbare Flammengeschwindigkeit (durchgezogen) und normalisierte Leuchtkraft (gestrichelt) der OH*-Radikale bei der Verbrennung von Ammoniak im Vergleich zur Verbrennung von Methan-PF für $\lambda = 1,0 / 1,5 / 2,0$ bei den Betriebsparametern $p_c = 70 \text{ bar}$, $T_{im} = 50 \text{ °C}$, $SOI = -10 \text{ °CA}$, $ET = 500 \mu\text{s}$.

Ein Vergleich zwischen der Verbrennung von Ammoniak und Methan mit zwei Brennstoffen, die durch eine Dodekan-Piloteinleitung eingeleitet wird, ist in Abbildung 7 für einen größeren Bereich von Luft-Kraftstoff-Äquivalenzverhältnissen dargestellt. Sie gibt einen umfassenderen Einblick in die Zylinderdrücke, scheinbaren Wärmefreisetzungsraten und Verbrennungsraten. Die scheinbare Wärmefreisetzungsraten in der gezoomten Version zeigt die Wärmefreisetzung des Pilotbrennstoffs, die in Bezug auf die Brennstoffmenge 0,34 % - 0,93 % für Ammoniak ($\lambda = 1,0 - 2,0$) bzw. 1,02 % - 1,97 % Methan entspricht. In Bezug auf die Energiemenge bedeutet dies 0,81% - 2,22% für Ammoniak und 0,83% - 1,60% für Methan.



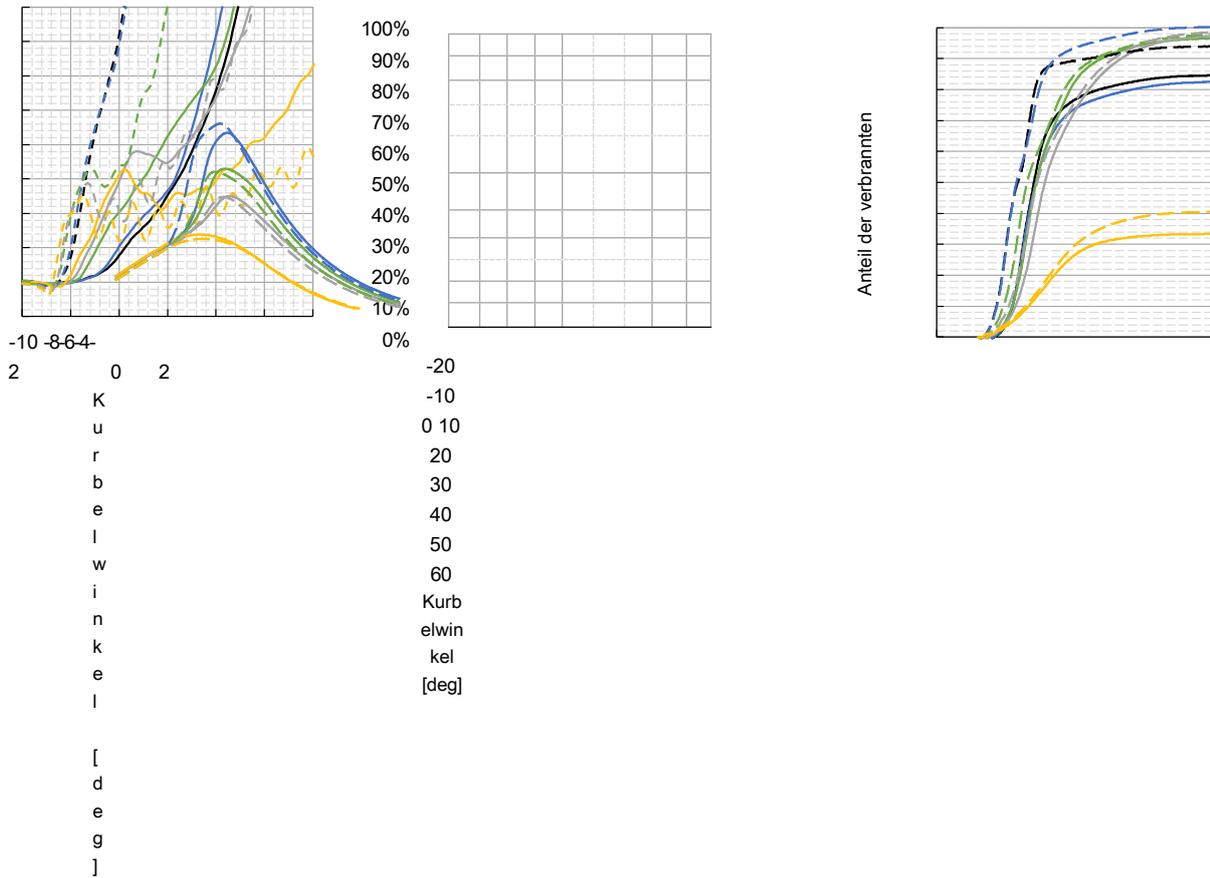


Abbildung 7: Zylinderdruck (links), gezoomte aHRR (Mitte) und integrierte Verbrennungsrate (rechts) der pilotgezündeten Ammoniak- vs. Methan-PF-Verbrennung für λ -Variationen zwischen 1,0 und 2,0 bei Betriebsparametern $p_c = 70 \text{ bar}$, $T_{in} = 50 \text{ °C}$, $SOI = -10 \text{ °CA}$, $ET = 500 \mu\text{s}$.

Die Zündverzögerung (ID) für verschiedene Luft-Kraftstoff-Äquivalenzverhältnisse λ ist aus den in Abbildung 4 bzw. Abbildung 7 gezeigten Kurven der scheinbaren Wärmefreisetzungsrate nur schwer genau zu erkennen. Daher wird sie in Abbildung 8 sowohl für die ID -Ermittlung durch die Berechnung der Wärmefreisetzungsrate als auch für die ID -Ermittlung durch die Analyse der optischen Messungen getrennt dargestellt. Die Zeit ist definiert ab dem effektiven (hydraulischen) Start der Pilot-Kraftstoffeinspritzung (SOI). Die aus der aHRR-Berechnung erhaltenen ID -Werte stimmen gut mit der Bildanalyse überein. Wie bei der Zweistoffverbrennung zu erwarten, nimmt die Zündverzögerung bei niedrigeren Luft-Kraftstoff-Äquivalenzverhältnissen λ zu und ist bei stöchiometrischen Bedingungen maximal. Im Fall von Ammoniak ist der verzögernde Einfluss auf die Zündung des Pilotbrennstoffs (ID -Gradient) jedoch viel ausgeprägter als bei der Zweistoffverbrennung von Methan. Dies ist auf den Unterschied zwischen der effektiven Temperatur im Zylinder zu Beginn der Verbrennung und der für die Zündung erforderlichen Temperatur zurückzuführen, die bei Methan aufgrund seiner niedrigeren Selbstzündungstemperatur wesentlich geringer ist. Außerdem führt die hohe Wärmekapazität von Ammoniak (die fast dreimal so hoch ist wie die von Luft) zu niedrigeren Verdichtungsendtemperaturen T_c bei höheren Kraftstoffanteilen, was die Zündungsverzögerung stark beeinflusst.

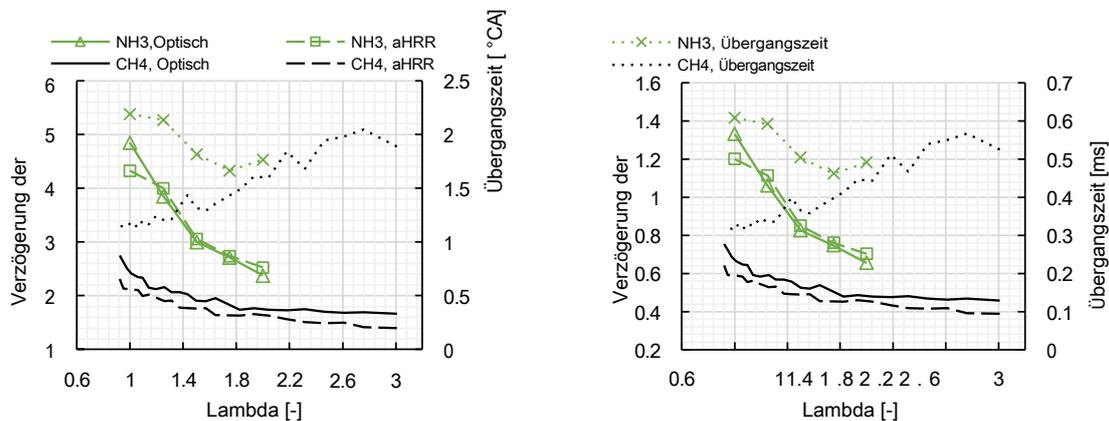


Abbildung 8: Zündverzögerung und Übergangszeit (CA-aufgelöst, links; zeitaufgelöst, rechts) der mit Pilotbrennstoff gezündeten Ammoniak- vs. Methan-PF-Verbrennung für λ -Variation bei Betriebsparametern $p_c = 70$ bar, $T_{in} = 50$ °C, $SOI = -10$ °CA, $ET = 500$ μ s.

Die in Abbildung 8 dargestellte *Übergangszeit* kann als die Zeit interpretiert werden, die von der Zündung bis zur Ausbreitung der Flamme aus dem Pilotbrennstoffspray in die vorgemischte Ladung benötigt wird. Längere Zündverzögerungen führen daher zu längeren Übergangszeiten, da das Sprühvolumen zum Zeitpunkt der Verbrennung größer ist. Eine geringere Reaktivität des Gemischs aufgrund einer niedrigeren Temperatur oder Brennstoffkonzentration erhöht ebenfalls die Übergangszeiten. Im Fall von Methan steigt die Übergangszeit monoton zu höheren Luft-Kraftstoff-Gleichgewichtsverhältnissen hin an - die verringerte Reaktivität hat einen größeren Einfluss als die kürzere Zündverzögerung. Bei Ammoniak hingegen überkompensiert die Verringerung des Zündverzugs zwischen $\lambda = 1$ und 1,5 die Verringerung der Gemischreaktivität, was zu sinkenden Übergangszeiten führt. Umgekehrt erhöht ein höherer Kraftstoffanteil bei niedrigerem λ die Übergangszeit aufgrund der niedrigeren Temperatur im Zylinder, die durch die höhere Wärmekapazität beeinflusst wird, die, wie erwähnt, die Reaktivität verringert. Es zeigt sich, dass sich der Trend einer höheren Übergangszeit bei niedrigerem λ bei mageren Gemischen $\lambda > 1,75$ umkehrt, wenn die durch den niedrigen Kraftstoffanteil bedingte Reaktivität die niedrigere Temperatur im Zylinder überwiegt und beide Kraftstoffe ein vergleichbares Verhalten zeigen.

In Abbildung 9 ist die Kurbelwinkelposition des 50%igen Massenverbrennungsanteils und der vollständig umgesetzten Kraftstoffmasse für die λ -Variation dargestellt. Wie bereits erwähnt,

können diese Werte für Vergleiche zwischen Experimenten im *Flex-OeCoS* verwendet werden, aber der gestufte Verbrennungsprozess verhindert Vergleiche mit entsprechenden Werten von kommerziellen Motoren. Wie erwartet, führt die schnellere Zündung bzw. der schnellere Start der Verbrennung bei Methan zu früheren MBF50-Positionen im Vergleich zu Ammoniak. Die verzögernde Wirkung fetterer Gemische $\lambda < 1,5$ führt zu einer Absenkung der Zylindertemperatur, wodurch sich die MBF50 zu späteren Positionen verschiebt.

Kurbelwinkeln. Dies ist bei Ammoniak weitaus ausgeprägter, aber auch bei Methan zu beobachten, was in Abbildung 9 anhand der Abflachung der Datenkurve zu den niedrigsten Luft-Kraftstoff-Äquivalenzverhältnissen erkennbar ist.

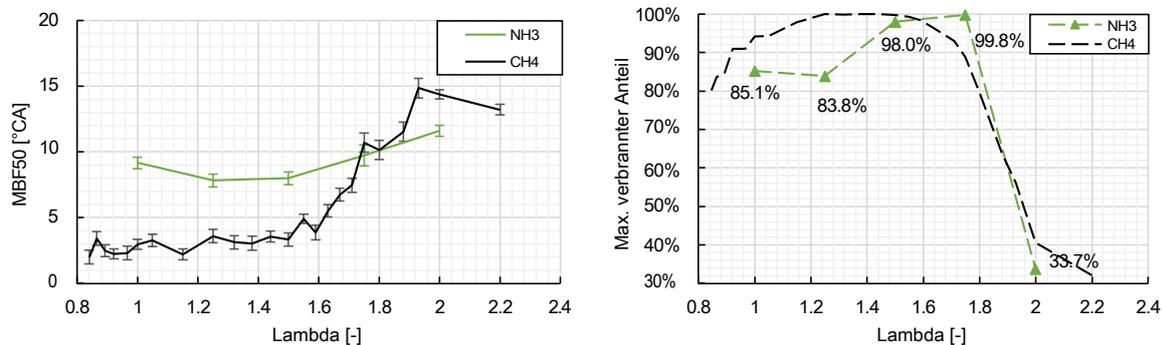


Abbildung 9: Massenverbrennungsanteil (MBF50, links) und max. verbrannter Anteil (rechts) der mit Pilotbrennstoff gezündeten Ammoniak- vs. Methan-PF-Verbrennung für λ -Variation bei Betriebsparametern $p_c = 70 \text{ bar}$, $\tau_{in} = 50 \text{ °C}$, $SOI = -10 \text{ °CA}$, $ET = 500 \mu\text{s}$.

Der in Abbildung 9 (rechts) dargestellte Gesamtverbrennungsanteil wurde hinsichtlich der Verbrennungsrate bereits in Abbildung 5 beschrieben und gibt einen Überblick über das Verhalten in einem breiten Bereich für beide Brennstoffe. Während Methan in einem weiten Bereich unterschiedlicher Luft-Kraftstoff-Äquivalenzverhältnisse eine insgesamt höhere Brennstoffumwandlungsrate aufweist, ergibt sich bei der Verbrennung von Ammoniak ein hohes Umwandlungsverhältnis zwischen $\lambda = 1,5$ und $1,75$. Dieser Luft-Kraftstoff-Bereich sollte im Rahmen von Folgeprojekten mit Hilfe von Abgasmessungen weiter untersucht werden, da ein Umwandlungsverhältnis von über 98 % im Hinblick auf die Anwendung in Verbrennungsmotoren sehr vielversprechend klingt.

Abbildung 10 zeigt die überlagerten Schlieren/OH*-Chemilumineszenz-Aufnahmen der Verbrennung von Ammoniak (oben) und Methan (unten) für die Variation des Äquivalenzverhältnisses von Luft und Kraftstoff. Die Bilder sind in $1,0 \text{ °CA}$ -Schritten von -9 °CA bis $+2 \text{ °CA}$ dargestellt. Deutlich zu erkennen ist die lange Zündverzögerung bei brennstoffreicheren Mischungen. Im stöchiometrischen Fall ($\lambda = 1,0$) von Ammoniak wird das Dodekan-Pilotspray vollständig verdampft

bis $-6,0 \text{ °CA}$, aber der erste Flammenkern ist erst 1 °CA später sichtbar. Im entsprechenden Fall für Methan erfolgt die Zündung lange bevor das Pilotspray vollständig verdampft ist. Das beobachtbare Merkmal

Das Verschwinden des Schlierensignals bei $-6,0 \text{ °CA}$ für Ammoniak wird auf die Zündung bzw. Wärmefreisetzung der ersten Stufe der Niedertemperaturverbrennung zurückgeführt, die die Brechungsindexänderung aufgrund der Gemischabkühlung durch die Kraftstoffverdampfung kompensiert. Die langen Zündverzögerungen für kraftstoffreiche Fälle von Ammoniak verschieben den Zündzeitpunkt und damit das Zentrum der Verbrennung nach unten in den Brennraum, weil der (verdampfte) Pilotkraftstoff, der sich mit der vorgemischten Ladung vermischt, durch den Impuls der Einspritzung noch nach unten transportiert wird. Somit beginnt die Verbrennung im unteren Motorzylinder frühzeitig, bevor der Kraftstoff im Brennraum verbraucht ist. In den in Abbildung 4 dargestellten scheinbaren Wärmefreisetzungsraten ist dies an der weit weniger ausgeprägten "gestuften Verbrennung" von Ammoniak im Vergleich zu Methan zu erkennen. Außerdem bewegt sich die Flammenfront aufgrund des niedrigeren Verbrennungsbeginns über eine längere Strecke gleichzeitig nach oben und nach unten in der Brennkammer. Daher wird die niedrigere relative Flammengeschwindigkeit durch synchrone Verbrennungsprozesse überwunden, was zu einer höheren oder gleichwertigen Wärmefreisetzungsrate im Vergleich zu Methan bei ähnlichem

Kurbelwinkel führt. Für brennstoffreiche Gemische mit $\lambda = 1$ und 1,25 bei Kurbelwinkelstellungen ab 0°CA für Ammoniak bzw. $-3,0^\circ\text{CA}$ für Methan sind transparente Zonen innerhalb der verbrannten Bereiche zu beobachten. Diese Zonen weisen sehr geringe Schwankungen des Brechungsindex auf (was Schlierensignale verursacht), ein Hinweis auf recht homogene, *heiße Zonen*, die sich über die gesamte Brennraumbreite zwischen den Fenstern erstrecken.

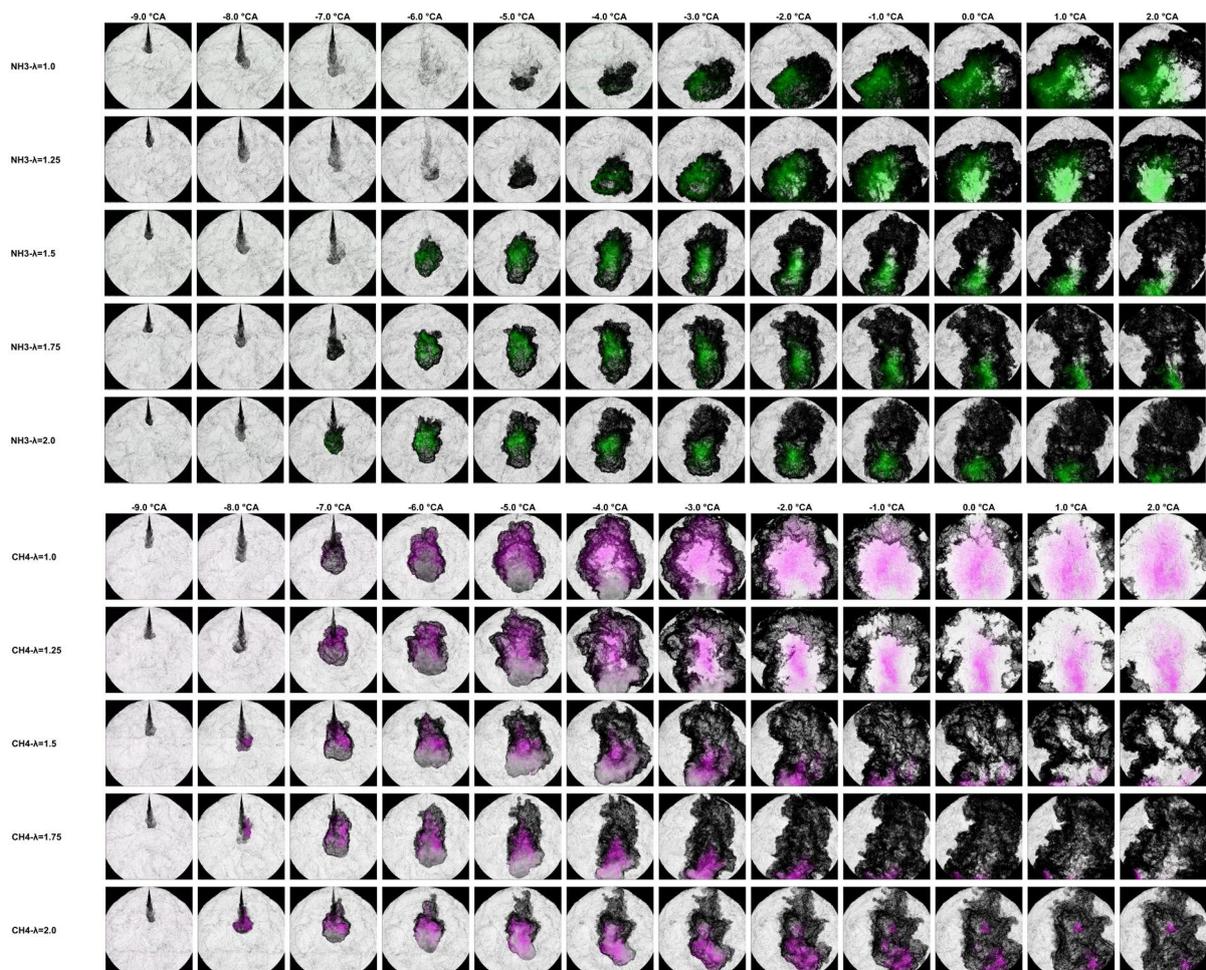


Abbildung 10: Überlagerte Bildsequenzen von gleichzeitig aufgenommenen Hochgeschwindigkeits-Schlieren-/OH*Chemilumineszenz-Aufnahmen der mit Pilotbrennstoff gezündeten Ammoniak- (oben) und Methan- (unten) DF-Verbrennung für verschiedene Luft-Brennstoff-Äquivalenzverhältnisse λ bei Betriebsparametern $p_c = 70 \text{ bar}$, $T_{in} = 50 \text{ °C}$, $SOI = -10 \text{ °CA}$ und $ET = 500 \mu\text{s}$.

3.2. Änderung des Beginns der Kraftstoff-Voreinspritzung (SOI)

Eine Variation der Pilotkraftstoffeinspritzung für ein Luft-Kraftstoff-Äquivalenzverhältnis von $\lambda = 1,0$ wurde in einem Bereich von $SOI = -20 \text{ °CA}$ bis $+5 \text{ °CA}$ durchgeführt. Dabei wurden die Referenzbedingungen wie Verdichtungsdruck ($p_c = 70 \text{ bar}$), Ansaugtemperatur ($T_{in} = 50 \text{ °C}$) und Betätigung der Pilotkraftstoffeinspritzung ($ET = 500 \mu\text{s}$) konstant gehalten. Die früheste und die späteste SOI waren je nach Kraftstofffall nicht geeignet: Bei Methan war der Fall $SOI = -20 \text{ °CA}$ wegen starker Klopferscheinungen nicht anwendbar; bei Ammoniak führte der sehr späte Zeitpunkt $SOI = +5 \text{ °CA}$ bei entsprechenden Temperaturen zu Fehlzündungen und hohem Ammoniakschlupf - und damit zum Abbruch des Experiments. Je nach Einspritzzeitpunkt wird der Pilotkraftstoff bei unterschiedlichen Druck- und Temperaturniveaus in die vorgemischte Ammoniak/Luft-Ladung eingebracht. Die entsprechenden Temperaturniveaus im Zylinder für verschiedene SOI wurden bereits eingehend untersucht und bestimmt

[14]. Dementsprechend wird bei $SOI = -20 \text{ °CA}$ der Pilotkraftstoff unter Druck in das Gemisch eingespritzt bzw.

Im oberen Totpunkt (OT) des Kolbens ergeben sich für das Gemisch Bedingungen von etwa $p \approx 70 \text{ bar}$ und $T \approx 820 \text{ K}$. Im Referenzfall $SOI = -10 \text{ °CA}$ ergeben sich Druck-/Temperaturbedingungen von etwa $p = 60 \text{ bar}$ und $T \approx 790 \text{ K}$. Insbesondere bei sehr frühen Piloteinspritzungen führt der fortlaufende Verdichtungshub zu einem erheblichen Anstieg der Druck- und Temperaturwerte während des

Kraftstoffmischprozesses bzw. zwischen *SOI* und Zündung.

Abbildung 11 zeigt die resultierenden Druckkurven für die verschiedenen SOI bei gegebenen Luft-Kraftstoff-Äquivalenzverhältnissen für beide Kraftstoffe, Ammoniak und Methan. Betrachtet man zunächst die SOI -Variation für den Methanfall (rechts), so ist die Verschiebung des Zündzeitpunkts deutlich erkennbar, was zu einer späteren Druckentwicklung führt. Die früheste Zündung bei $SOI = -20$ °CA wurde für Methan bei $\lambda = 1,0$ aus Sicherheitsgründen nicht durchgeführt, da die bei $SOI = -15$ °CA eingeleitete Verbrennung bereits bei Erreichen des Quetschspaltes in der Zylinderbohrung (ca. -1 °CA) ein klopfendes Verbrennungsverhalten zeigte. Die gesamte Verbrennung verlief mit nahezu konstant ansteigender CA -Verzögerung, was auf einen weitgehend linearen Verlauf der Zündverzögerung schließen lässt. Für den Ammoniak-Fall sind die Ergebnisse dagegen nicht so eindeutig und müssen daher im Detail diskutiert werden. Zum einen hat bei der letzten Pilotkrafteinspritzung $SOI = +5$ °CA keine Verbrennung stattgefunden, so dass der Versuch wegen Ammoniakschlupf abgebrochen werden musste. Andererseits hätte eine sehr frühe Pilotkraftstoffeinspritzung ($SOI = -20$ °CA) durchgeführt werden können, da Ammoniak bei diesen Betriebsbedingungen kein Klopfverhalten zeigte. So ist bei $SOI = -10 / -5 / 0$ °CA ein ähnliches Muster wie bei mir zu erkennen, und die Verbrennung wirkt direkt auf die spätere Pilotkraftstoffeinspritzung. Betrachtet man den Druckverlauf bei $SOI = -15$ °CA, so fällt auf, dass die Druckkurve nicht um den gleichen zeitlichen Betrag früher ansteigt. Es ist daher davon auszugehen, dass der Zündverzug bzw. die Übergangszeit bei dieser spezifischen Zylindertemperatur länger ist. Die überlagerte Standardabweichung für den Druckverlauf ist bereits etwas größer als für die anderen Betriebspunkte, was auf einen höheren Variationskoeffizienten (COV) für die Verbrennung zurückzuführen ist. Betrachtet man die früheste Pilotkraftstoffeinspritzung bei $SOI = -20$ °CA, so ist ein deutlich späterer durchschnittlicher Druckanstieg zu beobachten als für den Fall $SOI = -15$ °CA. Betrachtet man die Standardabweichung (schraffierte graue Fläche), so liegt offenbar alles zwischen Fehlzündung und Verbrennung im Vergleich zur Pilotkraftstoffeinspritzung bei $SOI = -15$ °CA. Dieses Verhalten wird in einem folgenden Abschnitt anhand der optischen Messergebnisse weiter diskutiert.

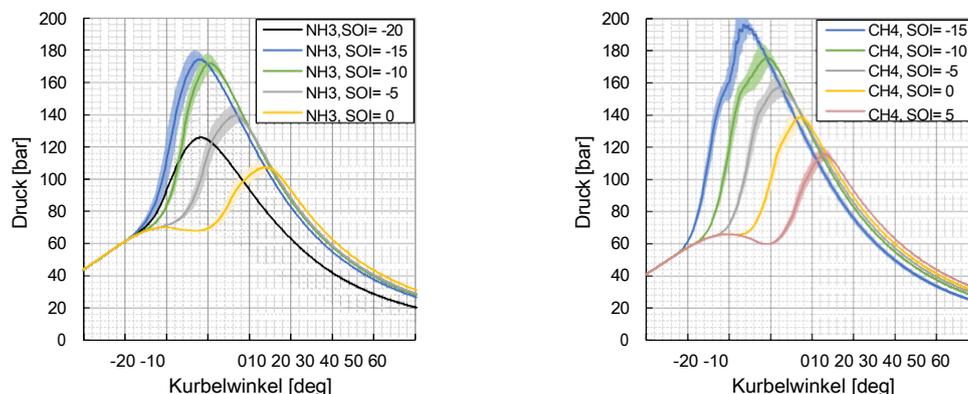


Abbildung 11: Flaschendruck von pilotgezündetem Ammoniak (links) vs. Methan (rechts) Peilverbrennung für die gegebene SOI -Variation (-20 bis 0 bzw. -15 bis 5) bei Betriebsparametern $\lambda = 1,0$, $p_c = 70$ bar, $T_{in} = 50$ °C, $ET = 500$ μ s.

Die in Abbildung 12 dargestellte scheinbare Wärmefreisetzungsrate wird in einem verschobenen (relativen) Kurbelwinkelformat dargestellt, wobei 0 °CA immer den Beginn der Einspritzung (SOI) markiert. Somit können die resultierenden Wärmefreisetzungsgradienten und ihre relative Position für jeden Betriebsprozesspunkt direkt verglichen werden.

Im Fall von Ammoniak (links) ist der erste Anstieg der $aHRR$ (bis zu etwa 40 J/deg) auf die Verbrennung des Dodekan-Pilotbrennstoffs zurückzuführen. Danach erfolgt im Allgemeinen ein langsamer, stetiger Anstieg der $aHRR$ der Hauptladung. Für den frühen Beginn der Einspritzung ($SOI = -15$ °CA) sowie für den OT ($SOI = 0$ °CA) ist der $aHRR$ -Gradient jedoch aufgrund der geringeren Reaktivität nicht so steil wie in den anderen Fällen ($SOI = -5 / -10$ °CA). Einerseits weist der Fall $SOI = -$

15 °CA aufgrund der niedrigeren Zylindertemperatur eine längere Zündverzögerung auf, aber danach, etwa 14 °CA nach *SOI*, steigt die *aHRR* mit einer vergleichbaren Steigung auf ein ähnliches Niveau wie im Fall *SOI* = -10 °CA. Der Fall der späten Pilot-Kraftstoffeinspritzung

$SOI = 0$ °CA leidet nicht unter einer hohen Zündverzögerung des Pilotkraftstoffs, da die Temperatur im Zylinder bei OT nahezu maximal ist, und zeigt daher einen frühen anfänglichen Anstieg der $aHRR$, der die Zündung des Pilotkraftstoffs markiert. Andererseits weist die $aHRR$ für die Hauptladung einen deutlich geringeren Gradienten auf, was sich durch zwei Aspekte erklären lässt: Erstens sinkt die Temperatur bereits nach dem *oberen Totpunkt*; zweitens (noch ausgeprägter) verringert die rasche Abnahme der Turbulenz im Zylinder die Geschwindigkeit der turbulenten Flamme und damit die Reaktionsgeschwindigkeit, was zu einer noch niedrigeren $aHRR$ bei später SOI führt.

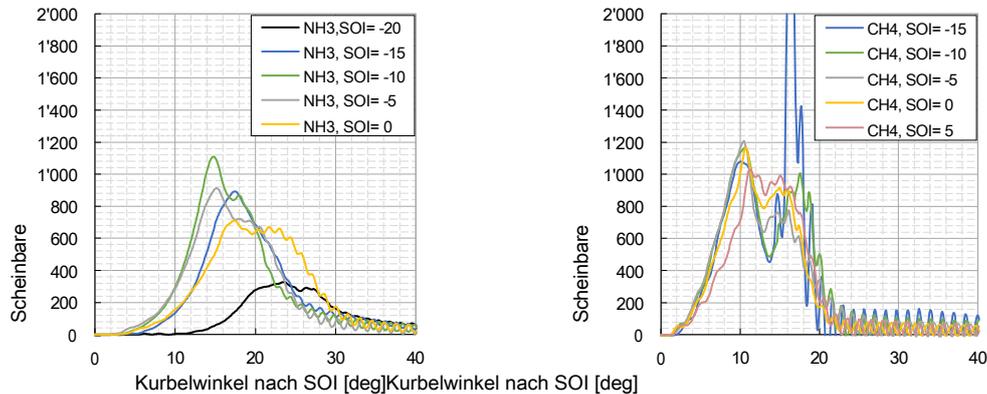
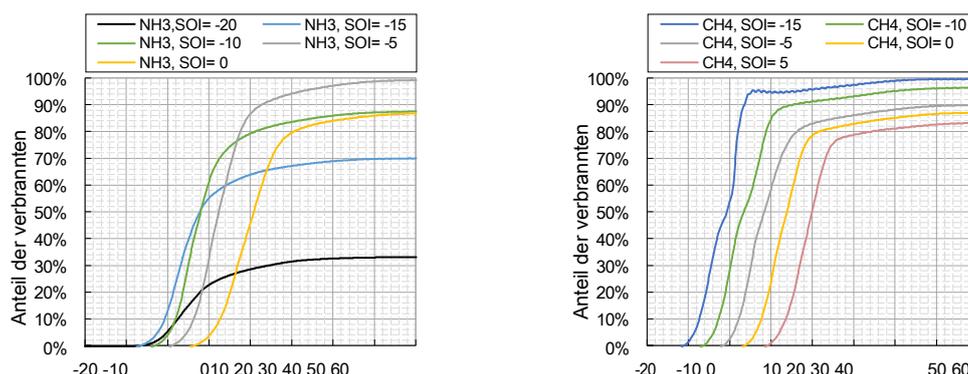


Abbildung 12: Scheinbare Wärmefreisetzungsrate der Verbrennung von Ammoniak (links) im Vergleich zu Methan (rechts) für die gegebene SOI -Variation (-20 bis 0 bzw. -15 bis 5) bei den Betriebsparametern $\lambda = 1,0$, $p_c = 70$ bar, $T_{in} = 50$ °C, $ET = 500$ μ s.

Für den Methanfall ist dieser Effekt auch in Abbildung 12 (rechts) zu erkennen, wenn man $SOI = -5$ °CA und $SOI = 5$ °CA vergleicht. Vernachlässigt man den Wärmeübergang an der Wand, so ist die Temperatur im Zylinder in beiden Fällen per Prozessdefinition nahezu gleich, so dass sich die frühe $aHRR$ ähnlich verhalten kann, während die abnehmende Turbulenz die Reaktionsgeschwindigkeit reduziert. Darüber hinaus führt der Dekompressionseffekt nach OT zu einer Senkung der Verbrennungstemperatur im Vergleich zu $SOI = -5$ °CA, aber dieser Effekt ist aufgrund der geringen Kolbenbewegung um OT herum eher für spätere Zeiten nach SOI ausgeprägt. Für den frühesten Beginn der Piloteinspritzung $SOI = -15$ °CA ist das scheinbare Klopfen, das im Bereich des Quetschspaltes auftrat, bei etwa 16 °CA aufgrund der enormen Wärmefreisetzung und der anschließenden Oszillation, die durch den schnellen Anstieg der Wärmefreisetzung verursacht wird, sehr gut erkennbar.

Die integrierte scheinbare Wärmefreisetzungsrate, nominiert durch den Gesamtenergiegehalt des Brennstoffs, die als integrierte Verbrennungsrate bezeichnet wird, ist in Abbildung 13 dargestellt. Diese spezifische Analyse gibt Aufschluss über die Kraftstoffumwandlungsrate in Bezug auf den Beginn der Pilotkraftstoffeinspritzung (SOI) und ihre Merkmale für beide Kraftstoffarten, Ammoniak und Methan.



Kurbelwinkel [deg]Kurbelwinkel [deg]

Abbildung 13: Integrierte Verbrennungsrate der Pilotbrennstoff-gezündeten Ammoniak- (links) vs. Methan- (rechts) Peilverbrennung für die gegebene SOI-Variation (-20 bis 0 bzw. -15 bis 5) bei Betriebsparametern $\lambda = 1,0$, $p_c = 70$ bar, $T_{in} = 50$ °C, $ET = 500$ μ s.

Dabei zeigt der Methanfall den erwarteten Verlauf der Kraftstoffumwandlungsrate sehr gut. Die in Abbildung 12 erkennbare, ausgeprägte gestufte Verbrennung, die zuvor im Rahmen der Variation des Luft-Kraftstoff-Gleichgewichtsverhältnisses diskutiert wurde, wird sehr gut dargestellt und verschwindet für spätere Starts der Pilotkraftstoffeinspritzung (*SOI*). Aufgrund der Expansion, die zu einer zunehmenden Squish-Höhe und damit zu geringeren Turbulenzen führt, ist die *aHRR* niedriger, wenn die Verbrennung den Squish-Spaltbereich erreicht. Spätere *SOI* führen zu einer geringeren Gesamtbrennstoffumwandlungsrate und damit zu einem hohen Methanschleupf. Bei Ammoniak weist die Kraftstoffumwandlungsrate bei einer bestimmten Motordrehzahl diesen monotonen Trend nicht auf. Vielmehr folgt die Kraftstoffumwandlungsrate den bereits beschriebenen Einflüssen, die zu einer geringeren Druckentwicklung oder einer geringeren *aHRR* und damit zu einem geringeren Wirkungsgrad führen.

Die scheinbare Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit s_{aFP} ist in Abbildung 14 dargestellt, wiederum kurbelwinkelverschoben in Bezug auf den Beginn der Verbrennung (*SOC*). Sie zeigt den allgemeinen Trend der *SOI*-Variation im Vergleich zur zuvor dargestellten Variation des Luft-Kraftstoff-Äquivalenzverhältnisses. Während der ersten Verbrennungsphase ergibt s_{aFP} für Ammoniak etwa 10 m/s, wie für $\lambda = 1$ erwartet, und etwa 14 - 16 m/s für Methan. Obwohl die scheinbare Flammenausbreitungsgeschwindigkeit durch den Expansionshub beeinflusst wird, ist die Abnahme von s_{aFP} für Methan ab drei Grad nach *SOI* in Bezug auf den Rückgang recht ähnlich. Die geringe Reaktivität von Ammoniak bei *SOI* = -20 °CA wird durch die Analyse der optischen Messungen bestätigt, die ein anfänglich niedriges s_{aFP} ergeben, und mit nur 8 m/s sehr spät im Prozess nie die volle Ausbreitungsgeschwindigkeit im Vergleich zu den anderen Fällen erreichen. Dieses niedrige s_{aFP} führt zu einer niedrigen Umwandlungsrate und damit zu einer niedrigen integrierten Brennrate.

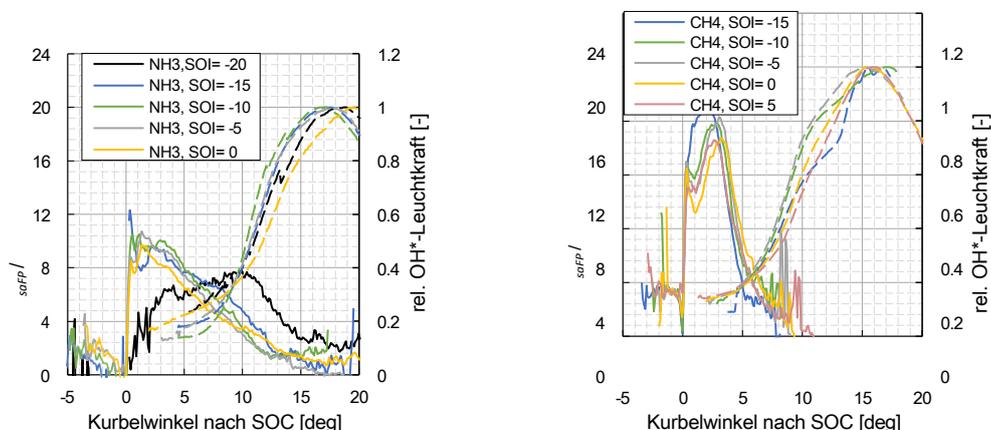


Abbildung 14: Scheinbare Flammenausbreitungsgeschwindigkeit (durchgezogen) und normierte Leuchtkraft (gestrichelt) der OH^* -Radikale von pilotgezündetem Ammoniak (links) vs. Methan (rechts) Peilverbrennung für gegebene *SOI*-Variation (-20 bis 0 bzw. -15 bis 5) bei Betriebsparametern $\lambda = 1,0$, $p_c = 70$ bar, $T_{in} = 50$ °C, $ET = 500$ μ s.

Wie aus Abbildung 15 hervorgeht, stimmen die aus der *aHRR*-Berechnung gewonnenen Zündverzögerungswerte wiederum (wie bei der Variation des Luft-Kraftstoff-Äquivalenzverhältnisses) gut mit denen der optischen Messanalyse überein - mit Ausnahme des *Methan-SOI* = 5 °CA-Falls, bei dem es zu einer Fehlinterpretation der *aHRR*-basierten *ID* von etwa 0,7 ms im Vergleich zur "optischen" Zündverzögerung mit 2,0 ms kam. Ammoniak ist aufgrund der relativ kälteren Ladungsbedingungen für die frühe *SOI* eher für eine Verzögerung der Zündzeit anfällig als Methan. Die Übergangszeit für Methan bleibt dabei über die gesamte *SOI*-Variation nahezu konstant oder zeigt sogar einen gegenläufigen Trend zu Ammoniak. Dies ist wahrscheinlich auf die Unterscheidung zwischen Zündverzögerung und Übergangszeit zurückzuführen, wobei die *ID*-bezogene Zeit langsam überschätzt und die Übergangszeit daher unterschätzt wurde. Dies könnte wahrscheinlich darauf zurückzuführen sein, dass der Schwellenwert für die integrierte *aHRR* leicht über dem Energiegehalt

des Pilotbrennstoffs liegt. Die Übergangszeit für Ammoniak bei frühem $SOI = -20\text{ }^{\circ}\text{CA}$ ist dabei mit $11,5\text{ }^{\circ}\text{CA}$ bzw. $3,2\text{ ms}$ sehr hoch und repräsentiert das bereits bekannte Verhalten einer Verbrennung, die unterhalb ihrer für die Flammenausbreitung erforderlichen Mindesttemperatur gezündet wird.

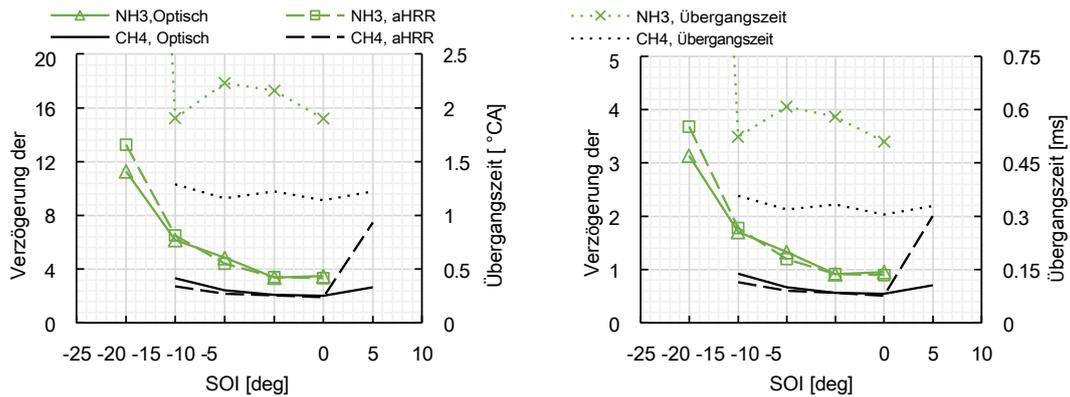


Abbildung 15: Zündverzögerung und Übergangszeit (CA-aufgelöst, links; zeitaufgelöst, rechts) der Pilotbrennstoff-gezündeten Ammoniak- vs. Methan-PF-Verbrennung für gegebene SOI-Variation (-20 bis 0 bzw. -15 bis 5) bei Betriebsparametern $\lambda = 1,0$, $\rho_c = 70 \text{ bar}$, $\tau_{In} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$, $ET = 500 \mu\text{s}$.

Die längere *ID* für Ammoniak kann nun in Form einer früheren *SOI* kompensiert werden, um den gleichen Verbrennungsbeginn (*SOC*) zu erreichen. Dabei können Zündverzögerung und Übergangszeit für den Ammoniak-Fall summiert und mit der Differenz zum entsprechenden *SOI* für den Methan-Fall addiert werden, um einen annähernd gleichen Verbrennungsbeginn zu erhalten - d.h. für einen gewünschten *SOI* bei $-10 \text{ }^\circ\text{CA}$ (Methan-Fall) muss das Ammoniak mindestens gezündet werden $3,3 \text{ }^\circ\text{CA}$ früher, um den gleichen *SOC* zu erreichen. Dies kann eine akzeptable Korrektur sein, wenn die Verbrennungsraten für beide Kraftstoffe nahezu gleich bleiben. Da die Zeit, die zum Erreichen der vollen Ladung benötigt wird, wichtig ist, um die korrekte Druckentwicklung zu erhalten, ist es möglich, die *MBF50* in Bezug auf die beiden verwendeten Kraftstoffe zu vergleichen, wie in Abbildung 16 dargestellt. Für den Fall *SOI* = $-10 \text{ }^\circ\text{CA}$ ist ein Unterschied von $4 \text{ }^\circ\text{CA}$ zu erkennen, was bedeutet, dass die Verbrennungsraten bei den gegebenen Betriebsbedingungen etwas niedriger ist. Um diesen Wert sollte die *SOI* früher eingestellt werden, um eine ähnliche Verbrennung bei Verwendung von Ammoniak anstelle von Methan zu erreichen. Die Gesamtbrennstoffumwandlungsrate, die als maximaler verbrannter Anteil in Abbildung 16 (rechts) angegeben wird, muss ebenfalls berücksichtigt werden. Die Kraftstoffumwandlungsrate sinkt bei Ammoniak erheblich, wenn nicht der optimale Beginn der Piloteinspritzung bei *SOI* = $-5 \text{ }^\circ\text{CA}$ verwendet wird. Folglich ist die Temperatur im Zylinder zu niedrig im Vergleich zu der Temperatur bei *OT*, wenn die Hauptladung verbrannt wird. Daher sollte ein früherer *SOI* möglich sein, indem die Verdichtungsverhältnisse angehoben wird.

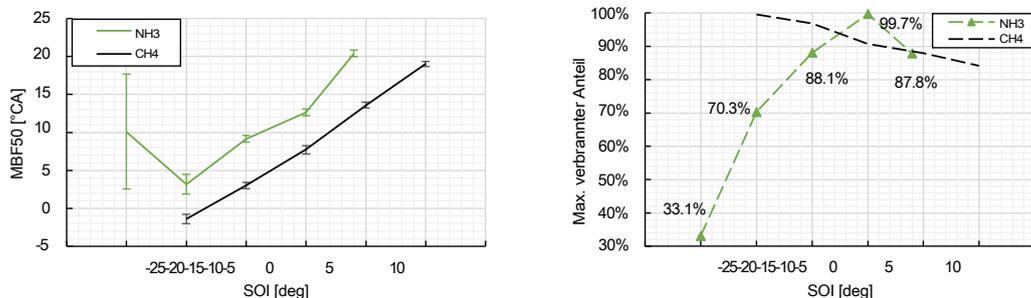


Abbildung 16: Massenverbrennungsanteil (MBF 50%, links) und max. verbrannter Anteil (rechts) der Pilotbrennstoff-Zündung von Ammoniak vs. Methan-PF-Kombination für gegebene *SOI*-Variation (-20 bis 0 bzw. -15 bis 5) bei Betriebsparametern $\lambda = 1,0$, $\rho_c = 70 \text{ bar}$, $\tau_{In} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$, $ET = 500 \mu\text{s}$.

Abbildung 17 zeigt die überlagerten Schlieren/ OH^* -Chemilumineszenz-Aufnahmen der Verbrennung von Ammoniak (oben) und Methan (unten) bei entsprechender *SOI*-Variation. Die Bilder sind auf einer relativen Zeitachse in Schritten von $1,0 \text{ }^\circ\text{CA}$ von $0,3 \text{ }^\circ\text{CA}$ bis $11,3 \text{ }^\circ\text{CA}$ dargestellt. Für den Ammoniak-Fall ist zu beachten, dass der früheste Beginn der Piloteinspritzung bei *SOI* = $-20 \text{ }^\circ\text{CA}$ die

breiteste Mittelung umfasst, da der *COV* (siehe oben) aus einem breiten Band resultiert, das von nahezu Fehlzündung bis zu sehr schneller Verbrennung reicht. Die aus der Bildsequenz des in Abbildung 17 dargestellten Zyklus erkennbare Zündverzögerung liegt am nächsten, aber immer noch unter dem durchschnittlichen *ID*-Wert. Die optisch interpretierbare Zündverzögerungsvariation für

Ammoniak ist viel höher als bei Methan, wo er im Allgemeinen innerhalb von 1,0 °CA liegt. Die Zündung des Pilotbrennstoffs erfolgt bei Ammoniak später, während die Verdampfung des Pilotbrennstoffs bei einem frühen $SOI = -15/-20$ °CA vollständig abgeschlossen ist, bevor die Verbrennung einsetzt. Da für beide Brennstoffe derselbe Pilotbrennstoff verwendet wurde, muss die Wechselwirkung zwischen Dodekan und Hauptladung der entscheidende Faktor sein. Aufgrund der höheren Wärmekapazität von Ammoniak führt die Ladung zu niedrigeren Temperaturen im Zylinder während der Verdichtung, was eine längere Zündverzögerung zur Folge hat. Außerdem steht aufgrund der hohen Aktivierungsenergie des Ammoniaks, die für die Dissoziation und den Beginn der Verbrennung erforderlich ist, weniger Energie für die Selbstzündung des Pilotkraftstoffs zur Verfügung. Diese komplexen Prozesse der Verdampfung des Pilotkraftstoffs, des Ladungseintrags und der Vermischung in Verbindung mit chemischen Reaktionen sollten jedoch mit Hilfe fortschrittlicher optischer Diagnoseverfahren weiter untersucht werden.

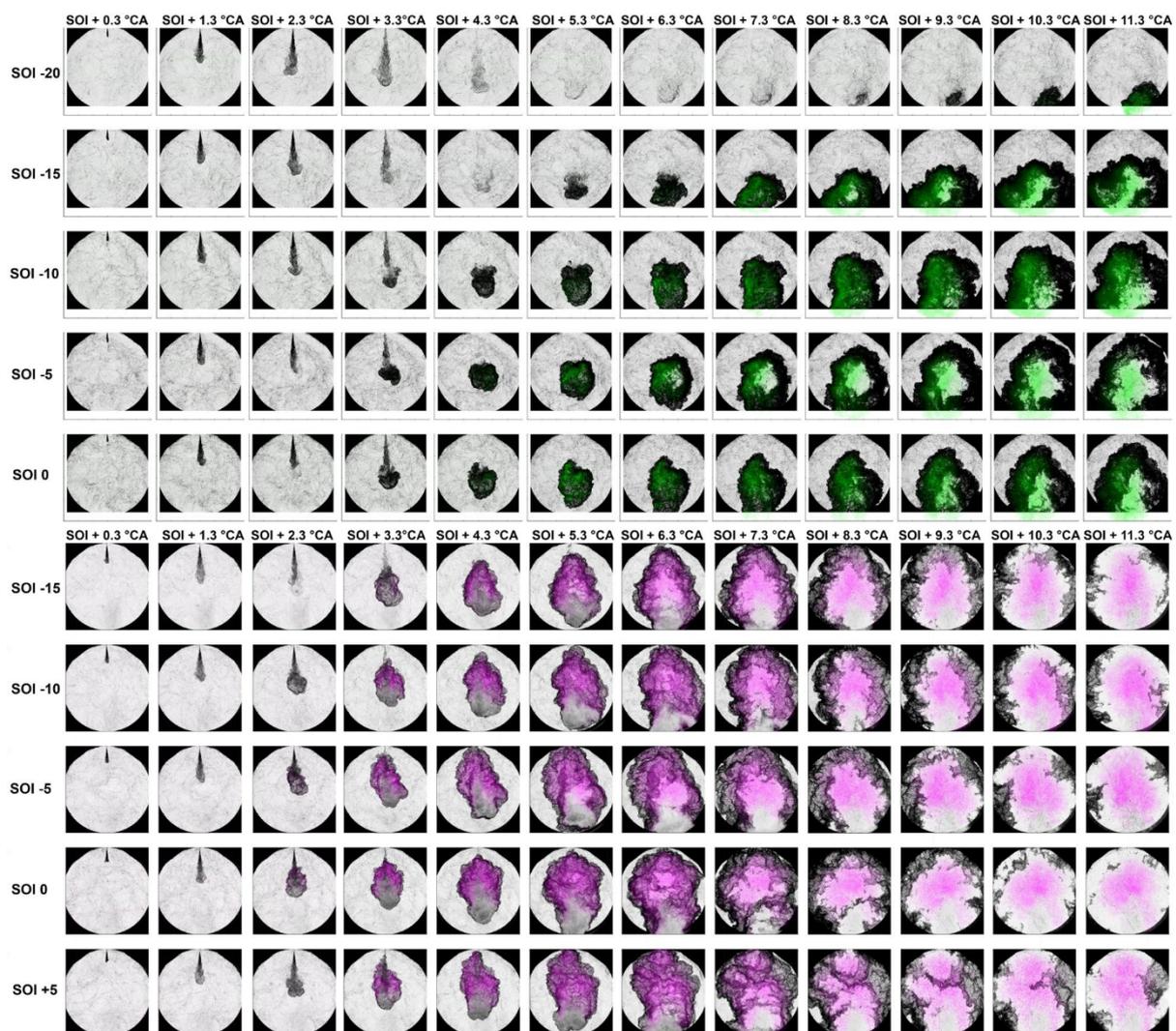


Abbildung 17: Überlagerte Bildsequenzen von gleichzeitig aufgenommenen Hochgeschwindigkeits-Schlieren-/OH*Chemilumineszenz-Aufnahmen der Pilotbrennstoff-gezündeten Ammoniak- (oben) und Methan- (unten) DF-Verbrennung für verschiedene SOI bei den Betriebsparametern $\lambda = 1$, $p_c = 70$ bar, $\tau_{in} = 50$ °C, $SOI = -10$ °CA und $ET = 500$ μ s.

Die für die Veränderung des Luft-Kraftstoff-Äquivalenzverhältnisses diskutierten heißen Zonen, die bei Methan leicht zu erkennen sind und in den späteren Verbrennungsphasen den größten Teil der Fläche einnehmen, sind bei der Ammoniakverbrennung weniger ausgeprägt, aber ein hoher Flächenanteil der heißen Zonen steht für eine heiße Verbrennung und damit für eine hohe Umwandlungsrate. Die "weiß-grauen" Bereiche im Pilotbrennstoff der Methan-Bildsequenzen sind

ein Hinweis auf Rußbildung an der Sprühspitze aufgrund der Interferenz der OH*-Chemolumineszenz mit der Rußglut. Ihr Fehlen im Fall von Ammoniak während der Verbrennung des Pilotbrennstoffs unterstreicht das Fehlen von Rußbildung.

4. Schlussfolgerungen

Die vorgemischte Ammoniak-Dual-Fuel-Verbrennung, initiiert durch einen Dodekan-Pilotbrennstoff, konnte an der optisch zugänglichen Versuchsanlage *Flex-OeCoS* erfolgreich durchgeführt werden. Es wurde eine Variation des Luft-Kraftstoff-Äquivalenzverhältnisses λ sowie des Einspritzbeginns (*SOI*) durchgeführt. Die Charakteristik des Ammoniakverbrennungsprozesses wird mit einer analogen Methan-Zweibrennstoff-Verbrennung unter gleichen Betriebsbedingungen verglichen. Die bekannten Randbedingungen ermöglichen eine präzise Erfassung von Druck und Temperatur, um eine thermodynamische Analyse im Hinblick auf die Zündverzögerung, die Dual-Fuel-Übergangszeit, die Wärmefreisetzung und verbrennungsmotorbezogene Ergebnisse wie den Anteil der verbrannten Masse zu ermöglichen. Darüber hinaus erlaubt die optische Zugänglichkeit des *Flex-OeCoS* simultane Schlieren/ OH^* -Chemilumineszenz-Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der entsprechenden Kombinationsprozesse, auf deren Basis eine optisch analysierte Zündverzögerung sowie eine scheinbare Flammenfortschrittsgeschwindigkeit bestimmt werden kann. Darüber hinaus können auch qualitative Aussagen über den räumlichen Verbrennungsbeginn bzw. die Rußbildung im Brennraum getroffen werden.

Die Variation des Luft-Kraftstoff-Äquivalenzverhältnisses zwischen $\lambda = 1,0$ und $\lambda = 2,0$ gibt einen tieferen Einblick in die λ -abhängige verbrannte Kraftstoffmenge, die im Bereich von $\lambda = 1,5$ und $\lambda = 1,8$ für die gegebenen Betriebsbedingungen der Testanlage ideal ist. Der Ammoniakschlupf dürfte gering sein, da die Brennstoffumwandlungsrate auf der Grundlage von aHRR-Berechnungen zwischen 98,0 % und 99,8 % hoch ist. Da jedoch Abgasmessungen (derzeit) noch nicht möglich (aber geplant) sind, kann dieses Ergebnis noch nicht endgültig bestätigt werden. Die für Ammoniak ermittelte Zündverzögerung ist generell höher, z.B. 0,82 ms gegenüber 0,49 ms für Methan bei $\lambda = 1,5$, und sollte im Hinblick auf die Kraftstoffanwendung in einem Verbrennungsmotor berücksichtigt werden. Die Übergangszeit, die auf der Selbstzündung des Pilotkraftstoffs und dem Beginn der Verbrennung der vorgemischten Ladung basiert, wird stärker durch die höhere Wärmekapazität von Ammoniak bei gegebenen Betriebsbedingungen beeinflusst. Daher ist sie bei einem niedrigeren Luft-Kraftstoff-Äquivalenzverhältnis länger, z. B. 0,5 ms im Vergleich zu 0,35 ms für Methan bei $\lambda = 1,5$. Die geringe Menge an Pilotbrennstoff (im Verhältnis zum Gesamtenergiegehalt) von 0,81 % - 2,22 % für Ammoniak bzw. 0,83 % - 1,60 % für Methan scheint im Bereich von $\lambda = 1,0$ bis $\lambda = 2,0$ ausreichend zu sein, um bei der speziellen Brennkammerkonstruktion der *Flex-OeCoS*-Versuchsanlage eine zuverlässige Zündquelle zu bieten.

Die aus den optischen Hochgeschwindigkeitsaufzeichnungen ermittelte scheinbare turbulente Flammenausbreitungsgeschwindigkeit s_{aFP} (bei einer mittleren Turbulenzintensität u' von 3,6 m/s vor *OT*) kann für $\lambda = 1,0$ in der frühen Flammenausbreitungsphase mit etwa 10 m/s im Vergleich zu Methan mit etwa 14 m/s angegeben werden. Für $\lambda = 1,5$ liegt das untersuchte s_{aFP} für beide Brennstoffe bei etwa 8 m/s und stellt somit eine ähnliche Wärmefreisetzungsrates dar.

Die Variation des Einspritzbeginns (*SOI*) liefert über die direkte Kopplung an die Gasinnentemperatur entsprechende Informationen über Zündverzug, Übergangszeit und Verbrennungsverhalten von Vor- und Hauptverbrennung. Ein sehr früher Einspritzbeginn (bei niedrigen Temperaturen) des Pilotkraftstoffs führt dabei zu einer ungünstigen Verbrennung, da sich der Kraftstoff bereits vor Zündbeginn ausgebreitet hat und somit die Energiedichte innerhalb der Pilotverbrennung bereits abgesenkt ist. Außerdem können ein langsamer Verbrennungsübergang und eine möglicherweise nicht vollständige Verbrennung zu einem hohen Ammoniakschlupf führen. Andererseits kann eine kontrollierte lange(re) *ID* zu einer räumlich tieferen Platzierung des Verbrennungsbeginns im

Brennraum führen, was zu einer größeren Flammenoberfläche und damit zu einer höheren globalen Wärmefreisetzungsrate führt.

Die optischen Hochgeschwindigkeits-Schlieren/OH*-Chemilumineszenz-Aufnahmen unterstützen die klassischen Messungen optimal und geben räumlich aufgelöst einen tieferen Einblick in das Zünd- und Verbrennungsverhalten. Darüber hinaus kann qualitativ festgestellt werden, dass die lokale Rußbildung am Dodekan-Pilotbrennstoffspray bei der Ammoniakverbrennung im Vergleich zu Methan nicht zu erkennen war.

Auf der Grundlage dieser vielversprechenden Ergebnisse sind weitere Untersuchungen geplant. Insbesondere die Abgasmessung ist ein wichtiger nächster Schritt, der Aufschluss über den Ammoniakschlupf und die NO-Produktion geben soll. Darüber hinaus sollten diese Untersuchungen Validierungsdaten für die berechneten Kraftstoffumwandlungsverhältnisse liefern. Ein breiterer Bereich und eine feiner aufgelöste Variation des Luft-Kraftstoff-Äquivalenzverhältnisses bei höheren Verdichtungstemperaturen wird ein nächster Schritt sein, um den optimalen Verbrennungsprozess mit Ammoniak als Kraftstoff zu bewerten. Eine weitere wichtige zukünftige Untersuchung ist die Variation der Pilotkraftstoffmenge mit Hilfe von Parametern wie Einspritzrate, Düsendurchmesser und Raildruck im Hinblick auf die Verbrennungsstabilität.

Literatur

- [1] Vereinte Nationen, "Paris Agreement", 2015, http://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf.
- [2] DNV Energy Transition Outlook 2020 (Det Norske Veritas), "*Maritime Forecast to 2050*".
- [3] F. Abbasov, T. Earl; C. Calvo Ambel, B. Hemmings, L. Gilliam, "*Roadmap to decarbonising European shipping*". T&E - Transport & Environment, 2018.
- [4] N. Ash, T. Scarborough, "*Sailing on Solar - Could green ammonia decarbonise international shipping?*". Environmental Defense Fund, 2019.
- [5] Lloyd's Register, UMAS (2019a), "*Fuel production cost estimates and assumptions*", Lloyd's Register; UMAS, 2019.
- [6] Lloyd's Register, UMAS (2019b), "*Zero-Emission Vessels: Transition Pathways*". Low Carbon Pathways 2050 series, Lloyd's Register; UMAS, 2019.
- [7] Lloyd's Register; UMAS (2020), "*Techno-economic assessment of zero-carbon fuels*". Lloyd's Register; UMAS, 2020.
- [8] P. Osterkamp, T. Smith, K. Sjøgaard, "*Five percent zero emission fuels by 2030 needed for Paris-aligned shipping decarbonization*", Global Maritime Forum. Getting to Zero Coalition (Hrsg.), 2021.
- [9] B. Schneider, C. Schürch, K. Boulouchos, S. Herzig, M. Hangartner, D. Humair, S. Wüthrich, C. Gossweiler, K. Herrmann, "*The Flex-OeCoS - a Novel Optically Accessible Test Rig for the Investigation of Advanced Combustion Processes under Engine-Like Conditions*", *Energies* 2020, 13(7), 1794; <https://doi.org/10.3390/en13071794>.
- [10] S. Wüthrich, D. Humair, K. Herrmann, A. Bertola, "*Enhanced instrumentation of an optical research engine with unique combustion chamber*", 14th Int. AVL Symposium on Propulsion Diagnostics, 23-24. Juni 2020, Baden-Baden, Deutschland. ISBN 978-3-9816971-6-2.
- [11] D. Humair, P. Cartier, P. Süess, S. Wüthrich, K. Herrmann, C. Barro, B. Schneider, C. Schürch, K. Boulouchos, "*Characterization of dual-fuel combustion processes*", Rostock 6th Large Engine Symposium, September 3-4, 2020, ISBN 978-3-941554-22-1.
- [12] W. Vera-Tudela, B. Schneider, S. Wüthrich, K. Herrmann, "*Study on the ignitability of a high-pressure direct-injected methane jet using a diesel pilot, a glow-plug and a prechamber*", *IJER*-21-0139, 2021, <https://doi.org/10.1177/14680874211048144>.

- [13] W. Vera-Tudela, B. Schneider, S. Wüthrich, K. Herrmann, "*Study on the ignitability of a high-pressure direct-injected methane jet using a scavenged pre-chamber under a wide range of conditions*", IJER- 1-14, 2022, <https://doi.org/10.1177/14680874221093144>.

- [14] S. Wüthrich, P. Cartier, P. Süess, B. Schneider, P. Obrecht, and K. Herrmann, "Optical Investigation and Thermodynamic Analysis of Premixed Ammonia Dual-Fuel Combustion initiated by Dodecan Pilot Fuel", *Fuel Communications* 12 (2022) 100074, <https://doi.org/10.1016/j.jfueco.2022.100074>.
- [15] J.M. Desantes, J.M. García-Oliver, W. Vera-Tudela, D. López-Pintor, B. Schneider, K. Boulouchos, "Study of the auto-ignition phenomenon of PRFs under HCCI conditions in a RCEM by means of spectroscopy", *Applied Energy*, Vol. 179, pp. 389-400, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.134>.
- [16] A. Srna, M. Bolla, Y.W. Wright, K. Herrmann, R. Bombach, S.S. Pandurangi, K. Boulouchos, G. Bruneaux, "Ignition characteristics of n-dodecane pilot fuel spray in a premixed compressed methane/air charge". *Proceedings of the Combustion Institute* 37 (2019) 4741-4749. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.06.177>.
- [17] J.M. Desantes, J.V. Pastor, J.M. García-Oliver, W. Vera-Tudela, "An experimental study of the effects of fuel properties on reactive spray evolution using Primary Reference Fuels", *Fuel*, Vol. 163, pp. 260- 270, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.09.064>.
- [18] A. Srna, R. Bombach, K. Herrmann, G. Bruneaux, "Characterization of the spectral signature of dual-fuel combustion luminosity: implications for evaluation of natural luminosity imaging", *Applied Physics B* (2019) 125:120, <https://doi.org/10.1007/s00340-019-7222-z>.
- [19] P. Obrecht, "WEG: Berechnung des Wärmeentwicklungsgesetzes aus gemessenen Brennkammerdruckverläufen", eigenes thermodynamisches Modell, ETHZ-LAV & FHWN-ITFE, 2021.
- [20] S. Wüthrich, D. Humair, K. Herrmann, A. Bertola, "Enhanced instrumentation of an optical research engine with unique combustion chamber", 14th Int. AVL Symposium on Propulsion Diagnostics, 23-24. Juni 2020, Baden-Baden, Deutschland. ISBN 978-3-9816971-6-2.
- [21] J. Schramm, J. N. Klüssmann, L. R. Ekknud, A. Ivarsson, "Ammonia Application in IC Engines", 2020.
- [22] C. Mounaïm-Rousselle, P. Bréquigny, C. Dumand, und S. Houillé, "Operating Limits for Ammonia Fuel Spark-Ignition Engine", *Energies* (14), 2021, <https://doi.org/10.3390/en14144141>.
- [23] C. Lhuillier, P. Brequigny, F. Contino, and C. Mounaïm-Rousselle, "Experimental study on ammonia/hydrogen/air combustion in spark ignition engine conditions", *Fuel* (269), 2020, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117448>.
- [24] S. McAllister, J.-Y. Chen, und A. C. Fernandez-Pello, "Fundamentals of Combustion Processes: Appendix", New York, NY: Springer New York, 2011.
- [25] S. Frankl, S. Gleis, S. Karmann, M. Prager, and G. Wachtmeister, "Investigation of ammonia and hydrogen as CO₂-free fuels for heavy duty engines using a high-pressure dual-fuel combustion process", *IJER*, vol. 22, no. 10, pp. 3196-3208, Oct. 2021, <https://doi.org/10.1177/1468087420967873>.
- [26] D. Han, Y. Liu, and Z. Huang, "The Use of Ammonia as a Fuel for Combustion Engines", *Engines and Fuels for Future Transport*, G. Kalghatgi, A. K. Agarwal, F. Leach, and K. Senecal, Eds. Singapur: Springer Singapur, 2022, S. 233-256.