

Konzeption einer Messsonde zur quantitativen zeitaufgelösten Detektion von CNG im Motor mittels IR-Strahlung

Dissertation

zur Erlangung des mathematisch-naturwissenschaftlichen
Doktorgrades
„Doctor rerum naturalium“
der Georg-August-Universität Göttingen

im Promotionsprogramm ProPhys
der Georg-August University School of Science (GAUSS)

vorgelegt von

Stephan Bauke

aus Hildesheim

Göttingen, Juni 2017

Betreuungsausschuss

Dr. Hainer Wackerbarth

Photonische Sensorik, Laser-Laboratorium Göttingen e.V.

Prof. Dr. Andreas Dillmann

Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Göttingen

Mitglieder der Prüfungskommission:

Referent: Dr. Hainer Wackerbarth

Photonische Sensorik, Laser-Laboratorium Göttingen e.V.

Koreferent: Prof. Dr. Andreas Dillmann

Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Göttingen

Weitere Mitglieder der Prüfungskommission:

Prof. Dr. Hans Christian Hofsäss, II. Physikalisches Institut, Georg-August-Universität Göttingen

Prof. Dr. Wolfram Kollatschny, Institut für Astrophysik, Georg-August-Universität Göttingen

Prof. Dr. Claus Ropers, IV. Physikalisches Institut, Georg-August-Universität Göttingen

Prof. Dr. Michael Seibt, IV. Physikalisches Institut, Georg-August-Universität Göttingen

Tag der mündlichen Prüfung: 03.08.2017

There must be a beginning of any great matter, but the continuing
unto the end until it be thoroughly finished yields the true glory.

Sir Francis Drake

Concept of a measurement probe for quantitative time resolved analysis of CNG in engines via IR-absorption

Stephan Bauke

Abstract

Rising greenhouse gas emissions caused by the transport sector are one factor that contributes to global warming. Consequently, the EU has decided on new regulations concerning the emissions of automobiles and on the introduction of more realistic test procedures for the admission of new vehicles. The automotive industry now faces the challenge to develop more efficient internal combustion engines. The use of alternative fuels like compressed natural gas is one possible option to reduce the CO₂ emissions of combustion engines. To achieve this goal, new measurement techniques, which allow the analysis of mixture formation prior to combustion, are necessary. In this thesis the development of an optical measurement procedure for time resolved quantification of the λ -value in combustion engines is presented. The procedure is based on the measurement of the broadband transmittance of the ν_3 -absorption line of methane. Based on absorption cross sections taken from the HITRAN database the measured transmittance can be linked to a density via the Beer-Lambert's Law. For this purpose the spectral influences of the measurement system as well as pressure and temperature are taken into account. Utilizing a 2-filter-method, which uses the transmission signals of different parts of the methane spectrum, density and temperature inside the measurement volume can be determined simultaneously. A spark plug probe allows measurements of the λ -value at the location of the ignition. Additionally, an inlet manifold probe is developed in this thesis, which allows the analysis of the mixture formation at the location of the fuel injection. The measurement system and the newly developed algorithm for the analysis of the measurement data are tested with pressure cell experiments. Remaining differences between measurement and calculation are eliminated using a calibration procedure. Through extensive measurements at a rapid compression machine and two different test engines the performance of the measurement system is evaluated and accuracy and precision are determined. The results show that the measurement system developed in this thesis allows for an accurate, time resolved analysis of mixture formation in gas engines.

Konzeption einer Messsonde zur quantitativen zeitaufgelösten Detektion von CNG im Motor mittels IR-Strahlung

Stephan Bauke

Zusammenfassung

Steigende Emissionen von Treibhausgasen durch den Transportsektor sind ein Faktor, die den globalen Klimawandel antreiben. Als Konsequenz daraus hat die EU neue Regularien bezüglich der Emissionen von Kraftfahrzeugen und die Einführung realitätsnäherer Testverfahren bei der Zulassungen neuer Fahrzeuge beschlossen. Die Automobilindustrie steht daher vor der Herausforderung effizientere Verbrennungsmotoren zu entwickeln. Die Nutzung alternativer Antriebsstoffe wie Erdgas ist dabei eine Möglichkeit die CO₂-Emissionen von Verbrennungsmotoren zu senken. Für die Motorenentwicklung ist der Einsatz neuer Messtechnik notwendig, die die Analyse der Gemischbildung vor der Verbrennung im Motor ermöglicht. In dieser Arbeit wird die Entwicklung eines optischen Messverfahrens zur zeitaufgelösten Quantifizierung des λ -Wertes in Erdgasmotoren vorgestellt. Das Verfahren basiert auf einer breitbandigen Messung der Transmission im Bereich der ν_3 -Bande von Methan. Auf der Grundlage von Absorptionsquerschnitten aus der HITRAN-Datenbank und unter Berücksichtigung der spektralen Einflüsse des Messsystems sowie von Druck und Temperatur im Messvolumen kann die Transmission über das Lambert-Beersche-Gesetz einer Dichte zugeordnet werden. Über eine 2-Filter-Methode, welche die Transmissionssignale unterschiedlicher Bereiche des Methanspektrums miteinander korreliert, wird die gleichzeitige Messung von Dichte und Temperatur im Messvolumen ermöglicht. Neben dem Einsatz einer Zündkerzensonde, durch welche der λ -Wert am Ort der Zündung gemessen werden kann, erlaubt die Entwicklung einer Saugrohrsonde die Analyse der Gemischbildung am Ort der Kraftstoffeinspritzung. Das Messsystem und der Auswertalgorithmus werden an Druckzellenmessungen getestet und verbleibende Abweichungen zwischen Messung und Berechnung werden durch eine Kalibration eliminiert. Durch ausführliche Messungen in einer Rapid Compression Machine und an zwei Versuchsmotoren wird die Funktion des Messsystems bewertet sowie Genauigkeit und Präzision bestimmt. Die Ergebnisse zeigen, dass das in dieser Arbeit entwickelte Messsystem eine präzise, zeitaufgelöste Analyse der Gemischbildung in Gasmotoren ermöglicht.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Physikalische und technische Grundlagen	5
2.1	Ottomotorische Verbrennung	5
2.2	Absorption von Infrarotlicht	10
2.2.1	Wechselwirkung von Licht mit Materie	10
2.2.2	Anregung von Rotationen und Schwingungen	11
2.2.3	Linienstärken und -breiten	13
2.2.4	Thermische Anregung von Schwingungen	15
2.2.5	Lambert-Beersches Gesetz	18
3	Methoden zur Gemischbildungsanalyse	19
3.1	Laserinduzierte Fluoreszenz	19
3.2	Flammenionisationsdetektoren	20
3.3	Durchstimmbare Diodenlaser	20
3.4	Nicht-dispersive Infrarotspektroskopie	21
4	Experimenteller Aufbau und Methoden	23
4.1	FTIR-Spektrometer	23
4.2	Thorlabs OSA205	24
4.3	ICOS-System	24
4.3.1	Funktionsprinzip	25
4.3.2	Quantifizierungsstrategie	29
4.3.3	2-Filter-Methode	31
4.3.4	Retroflectoren	33
4.3.5	Lichtquellen	35
4.4	Druckzellenmessungen	37
4.5	Strömungskanal	39
4.6	ICOS-Temperature-System	41
4.7	Rapid Compression Machine	42
4.8	Versuchsmotoren	43

5	Experimente an Druckzellen	47
5.1	Untersuchung des Absorptionsverhaltens von Methan	47
5.2	Kalibration des ICOS-1-Filter-Systems	53
5.3	Untersuchung der CH ₄ -Detektion mittels 2-Filter-Methode	55
5.4	Kalibration des 2-Filter-Systems	58
6	Quantifizierung im Saugrohr	65
6.1	Vorversuche am Strömungskanal	65
6.2	Validierungsmessungen am Motor	72
6.3	Realbetrieb am Motor	76
6.4	Prototyp 2. Generation	79
7	Quantifizierung an der Rapid Compression Machine	83
7.1	ICOS-Temperature-Messungen	83
7.2	Validierungsmessungen 2-Filter-ICOS-System	87
8	Quantifizierung im Brennraum	97
8.1	Temperaturmessungen am Motor	97
8.2	Validierungsmessungen am Motor	100
8.3	Realbetrieb am Motor	105
9	Diskussion	115
10	Zusammenfassung	125
A	Druckzellenmessungen mit dem 2-Filter-ICOS-System	129
B	RCM-Messungen mit dem 2-Filter-ICOS-System	133
C	Motormessungen mit dem 2-Filter-ICOS-System	137
	Literaturverzeichnis	147
	Danksagung	153
	Lebenslauf	155

1 Einleitung

Die stetig wachsende Weltwirtschaft und der daraus resultierende Energieverbrauch haben zu einem steten Anstieg von Treibhausgasemissionen und damit zum globalen Klimawandel geführt. Die steigenden Emissionen haben ihre Ursache unter anderem darin, dass der Großteil der genutzten Primärenergie trotz Fortschritten bei erneuerbaren Energien aus fossilen Brennstoffen besteht [1]. Der globale Klimawandel stellt eine Herausforderung für alle Teile der Gesellschaft dar, dem es mit innovativen Entwicklungen entgegenzutreten gilt.

Ein großer Teil des Energieverbrauchs entfällt dabei auf den Transportsektor, sei es durch vermehrten Güterverkehr als auch durch eine steigende Anzahl privater Automobile aufgrund eines global wachsenden Wohlstandes. Als Reaktion auf den Klimawandel haben die Vereinten Nationen auf dem Klimagipfel von Paris 2015 beschlossen, dass die Erderwärmung auf 2 °C verglichen mit dem vorindustriellen Niveau beschränkt werden soll [2]. Schon zuvor hat die EU zur Verminderung der Treibhausgasemissionen im Transportsektor einen Grenzwert von 95 g/km für die CO₂-Emissionen von PKW-Fahrzeugen im Flottendurchschnitt ab 2021 festgeschrieben [3]. Ausgangspunkt war ein Grenzwert von 130 g/km gültig ab 2015. Weitere gesetzliche Bausteine zur Senkung der Emissionen im Transportsektor sind die Einführung von real driving emissions-Messungen (RDE-Messungen) und die Ablösung des neuen europäischen Fahrzyklus durch die realitätsnäheren worldwide harmonized light-duty vehicle test procedure (WLTP). Die Einführung der RDE-Messungen bedeutet, dass die EU ein Gesetz verabschiedet hat, dass ab September 2017 die Messung der Stickoxidemissionen bei der Typzulassung von Dieselfahrzeugen unter realen Fahrbedingungen vorschreibt. Die gesetzliche Einführung des WLTP ist für die Zeit ab 2021 geplant und soll für realitätsnähere Verbrauchs- und Emissionsangaben bei der Zulassung neuer Fahrzeuge sorgen. All die genannten Neuregelungen stellen eine Herausforderung für die Industrie dar, moderne, emissionsarme Fahrzeuge zu entwickeln.

Um die Emissionen von herkömmlichen Otto- und Dieselfahrzeugen zu senken, wird der Entwicklungsaufwand immer größer. Gleichzeitig sinkt der Effizienzgewinn durch einzelne Maßnahmen immer weiter [4]. Ein vielversprechender Weg zum Erreichen der Grenzwerte für die CO₂-Emissionen ist daher die Verwendung alternativer Antriebsstoffe. In Abb. 1.1 sind die Well-to-Wheel-Emissionen unterschiedlicher Antriebe in CO₂ äquivalent gezeigt, d.h. die Emissionen, welche innerhalb des gesamten Lebenszyklus von der Förderung bis zum Gebrauch entstehen. Anhand der Grafik ist erkennbar, dass der Einsatz von Erdgas eine Reduktion der Emissionen um 25 % erzeugt. Dies liegt vor allem an der chemischen Zusammensetzung von Erdgas, dessen Hauptkomponente Methan mit einem Anteil von 79-99 % ist [5]. Hierdurch entsteht bei der Verbrennung wesentlich weniger Kohlenstoffdioxid als bei konventionellen Kraftstoffen. Ein weiterer Vorteil ist die mögliche Beimengung von Methan aus Biogasanlagen oder aus synthetischer Produktion mittels überschüssigem Strom aus Windkraftanlagen (Power-to-gas). Der beigemengte An-

teil kann bis zu 100 % betragen, wodurch die Emissionen bis auf ein Minimum von 5 g/km sinken [6]. Weiterhin besitzt Erdgas durch seine hohe Klopffestigkeit ein großes Potenzial den Verbrauch und die Emissionen über Aufladung und Downsizing zu verringern [7][8]. Daher können erdgasbetriebene Fahrzeuge konkurrenzfähig gegenüber Elektrofahrzeugen oder Fahrzeugen mit Wasserstoff-Brennstoffzellen in Hinblick auf die Emissionen sein. Bei letztgenannten Antrieben muss kritisch betrachtet werden, aus welcher Quelle der genutzte Strom oder der Wasserstoff gewonnen wird. Hinzu kommen Probleme bei der Infrastruktur in Bezug auf Verteilung und Speicherung der Energie sowie die Reichweite der Fahrzeuge. Gerade Elektrofahrzeuge leiden aktuell noch unter geringen Reichweiten und langen Ladezeiten. Sowohl für Wasserstoff- als auch für Elektrofahrzeuge ist nur ein sehr begrenztes Netz an Tank- bzw. Lademöglichkeiten vorhanden. Mit knapp 1000 Tankstellen und einer flächendeckenden Gasversorgung von Haushalten ist Erdgas deutlich besser aufgestellt. Weiterhin gibt es aktuelle Bestrebungen seitens der Industrie das Netz an Erdgastankstellen großflächig auszubauen [9, 10].

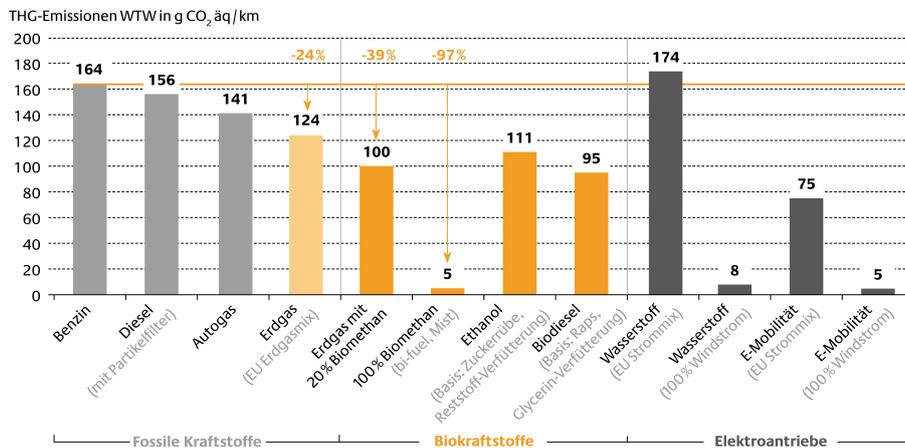


Abbildung 1.1: Well-to-Wheel-Emissionen (WTW) von Treibhausgasen (THG) in CO₂ äquivalent konventioneller und alternativer Antriebsstoffe inkl. Elektromobilität ausgehend von einem Fahrzeug mit Ottomotor und einem Verbrauch von 7 l/100 km [11].

Fahrzeuge mit Erdgasantrieb nutzen aktuell zum überwiegenden Teil einen sogenannten bivalenten Antrieb. Das heißt, dass neben einer Direkteinspritzung von Benzin eine Einspritzanlage für Erdgas im Ansaugtrakt installiert ist. Ein aktuelles Beispiel ist der Audi A4 Avant g-tron, welcher laut Herstellerangabe mit einem 2,0 l Turbomotor mit 170 PS eine Reichweite von 450 km mit Benzin und 500 km mit Erdgas besitzt. Gegenüber konventionellem Kraftstoff besitzt Erdgas neben den geringeren Emissionen noch weitere Vorteile wie z.B. eine hohe Oktanzahl und Klopffestigkeit. Dies bedeutet, dass eine höhere Verdichtung und dadurch eine höhere Effizienz und Einsparung von Kraftstoff möglich ist. Um das volle Potenzial von Erdgas nutzbar zu machen, ist allerdings ein monovalenter Betrieb sowie eine Optimierung des Motors auf den Betrieb mit Erdgas notwendig. Eine Herausforderung bei der Motoroptimierung ist, dass Erdgas im Gegensatz zu konventionellem Otto- oder Dieselmotorkraftstoff nicht flüssig sondern gasförmig eingespritzt wird. Dies

hat direkte Auswirkungen auf die Bildung eines zündfähigen Erdgas-Luft-Gemisches, wobei dieser Vorgang kritisch für den effizienten Betrieb eines Verbrennungsmotors ist. Um einen effizienten Motor entwickeln zu können, ist es also unabdingbar die Gemischbildung zu analysieren, um diese dann optimieren zu können.

Die Analyse der Gemischbildung, d.h. die Messung der Gasdichten, im Motor stellt aufgrund schwerer Zugänglichkeit sowie der Umgebungsbedingungen wie Vibrationen, hoher Drücke und hoher Temperaturen spezielle Anforderungen an die Messtechnik. Wichtige Eigenschaften einer potentiell nutzbaren Messtechnik sind dabei eine hohe zeitliche Auflösung (1 °KW bei 5000 U/min $\approx 33 \mu\text{s}$) sowie einer präzisen Messung der Kraftstoffkonzentration (Genauigkeit 2-5 %). Dabei haben aktuell verwendete Techniken deutliche Nachteile. Eine Möglichkeit das Gas im Motorbrennraum zu analysieren ist die Verwendung von Flammenionisationsdetektoren. Hierbei ist eine Gasentnahme nötig, woraus eine geringe zeitliche Auflösung resultiert. Laserinduzierte Fluoreszenz (LIF) erlaubt eine bildgebende Messung der Gemischbildung ist aber mit einem großen technischen Aufwand verbunden. Die Aufnahmezeit ist direkt mit der Pulsrate des verwendeten Lasers verbunden, welche meist 10 Hz beträgt. Weiterhin ist ein optisch zugänglicher Motor notwendig, der andere thermodynamische Eigenschaften als ein Vollmotor aufweist. Das heißt, dass sich das gemessene System von dem zu optimierenden System unterscheidet, was die Anwendbarkeit dieser Messtechnik weiter begrenzt. Weitere aktuelle Messtechniken zur Gemischbildungsanalyse werden in Kap. 3 vorgestellt und mit dem in dieser Arbeit verwendeten Ansatz verglichen.

In dieser Arbeit wird eine auf nicht-dispersiver Infrarotabsorptionsspektroskopie beruhende Messtechnik entwickelt. Diese bietet die Vorteile einer hohen zeitlichen Auflösung sowie potenziell hoher Genauigkeit bei gleichzeitig einfacher Anwendbarkeit am Motor sowie Eignung für Serienmotoren. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Entwicklung stützt sich dabei auf das Internal-Combustion-Optical-Sensor-System (ICOS-System) der LaVision GmbH, welches in vorherigen Projekten mit dem Laser-Laboratorium Göttingen e.V. entwickelt wurde. Es dient der Optimierung von Motoren mit konventionellen Kraftstoffen und wird dort unter anderem zur Analyse der Gemischbildung und Flammenausbreitung eingesetzt [12, 13]. Das ICOS-System besteht aus einer Lichtquelle, optischen Fasern, einer modifizierten Zündkerze mit einem halboffenen Spiegelgehäuse, welches das Messvolumen darstellt, und einer Detektionseinheit. Die Zündkerze behält dabei ihre normale Funktion bei. Die hohe zeitliche Auflösung wird durch eine breitbandige Anregung und Detektion mittels Bandpassfiltern sowie Detektoren für unterschiedliche Molekülspezies ermöglicht. Eine ausführliche Beschreibung des Systems findet sich in Kap. 4.3. Die Quantifizierung der Kraftstoffdichte anhand der Detektorsignale erfordert die Entwicklung eines Auswertalgorithmus, welcher alle relevanten Parameter berücksichtigt und die erforderliche Genauigkeit garantiert. Die Entwicklung und Validierung der Auswertstrategie stellt den Hauptteil der vorliegenden Arbeit dar. Da das Absorptionsverhalten von Erdgas im Gegensatz zu konventionellem Kraftstoff deutlich von Druck- und Temperaturänderungen beeinflusst wird, ergeben sich aufgrund der Dynamik eines Verbrennungsmotors neue Herausforderungen. Da Methan die Hauptkomponente von Erdgas ist und somit als Modell für diesen Kraftstoff dienen kann, erfolgt der Großteil der Untersuchungen an diesem Molekül.

Zu Beginn dieser Arbeit werden in Kap. 2 die technischen und physikalischen Grundlagen dargestellt, auf denen die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Quantifizierungsstrategie beruht. Dabei werden zunächst die Grundlagen der ottomotorischen Verbrennung erläutert, bevor auf die Absorption von Infrarotlicht eingegangen wird. Anschließend wird in Kap. 3 der Stand der Technik der Messmethoden zur Analyse der Gemischbildung beschrieben und in Verbindung zu dem in dieser Arbeit genutzten System gesetzt. Anschließend erfolgt in Kap. 4 eine Beschreibung der benutzten Versuchsaufbauten und der Durchführung der Experimente. In diesem Kapitel findet sich außerdem eine detaillierte Beschreibung des ICOS-Systems und eine Erläuterung der in dieser Arbeit entwickelten Auswertestrategie. Als erster Schritt zur Entwicklung der Auswertestrategie erfolgt in Kap. 5 eine Untersuchung des Absorptionsverhaltens von Methan in Druckzellen sowie erste Messungen mit modifizierten ICOS-Systemen zur Optimierung der Messtechnik. Wie oben erwähnt erfolgt die Eindüsung von Methan üblicherweise ins Saugrohr. Daher wurde in dieser Arbeit eine entsprechende Sonde entwickelt. Die Ergebnisse der Experimente mit dieser Sonde in einem Strömungskanal und in Versuchsmotoren werden in Kap. 6 dargestellt. Erste Validierungsmessungen der Auswertestrategie bei Einsatz einer Zündkerzensonde mittels Messungen an einer Rapid Compression Machine werden in Kap. 7 gezeigt. Anschließend erfolgen Messungen an einem Versuchsmotor als finaler Schritt in der Entwicklung des Auswertalgorithmus, welche in Kap. 8 beschrieben werden. Abschließend erfolgt eine Diskussion der Ergebnisse und es werden eine Zusammenfassung und ein Ausblick gegeben.

2 Physikalische und technische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die technischen und physikalischen Grundlagen erläutert, welche zum Verständnis und zur Interpretation der Messergebnisse notwendig sind. Zunächst folgt eine kurze Einführung in die ottomotorische Verbrennung mit der Erläuterung der für diese Arbeit relevanten Parameter. Ein umfassenderer Einblick ist in der Fachliteratur zu finden [14, 15]. Danach werden die physikalischen Prinzipien der Absorption von Licht insbesondere von Infrarotlicht und die daraus resultierenden Spektren eingeführt. Weiterhin wird auf die thermische Anregung von Molekülschwingungen und -rotationen und deren Bedeutung für die Messtechnik eingegangen. Abschließend wird das Lambert-Beersche-Gesetz als Grundlage zur Quantifizierung einer Absorberdichte auf Basis einer Transmissionsmessung vorgestellt.

2.1 Ottomotorische Verbrennung

Der Ottomotor, wie er in benzin- und erdgasbetriebenen Fahrzeugen zum Einsatz kommt, arbeitet nach dem Prinzip der inneren Verbrennung, welches im Folgenden erläutert wird. Der Motor besteht meist aus mehreren Zylindern, welche von einem Kolben nach unten gasdicht verschlossen sind. Der Kolben wiederum ist über ein Pleuel mit einer Kurbelwelle verbunden. Durch deren Drehung bewegt sich der Kolben periodisch auf und ab, wodurch das Brennraumvolumen abwechselnd vergrößert und verkleinert wird. Über Einlass- und Auslassventile erfolgt die Ansaugung von Frischluft und, im Fall von Saugrohreinspritzung, Kraftstoff, sowie das Ausstoßen des Gasgemisches nach der Verbrennung. Im Falle einer Kraftstoff-Direkteinspritzung erfolgt die Zugabe von Kraftstoff während der Kompressionsphase der Kolbenbewegung. Die Bewegung des Kolbens nach oben verdichtet das Gemisch und durch die darauffolgende Verbrennung wird Arbeit am Kolben verrichtet, welche in einer Abwärtsbewegung des Kolbens resultiert. Aus der Abfolge von Ansaugen, Verdichten, Arbeiten und Ausstoßen ergibt sich ein Kreisprozess der Verbrennung [14].

Der ottomotorische Kreisprozess wird als Zyklus bezeichnet und umfasst zwei Umdrehungen der Kurbelwelle, was 720° entspricht. Eine zeitliche Zuordnung von Ereignissen und Messgrößen erfolgt anhand des Kurbelwellenwinkels mit der Einheitenbezeichnung Grad Kurbelwinkel ($^\circ\text{KW}$) auf einer Skala von -360°KW bis 360°KW . Ein Zyklus unterteilt sich dabei in vier Takte in dieser Reihenfolge: Ansaugtakt, Verdichtungstakt/Zündung, Arbeitstakt und Auspufftakt, dargestellt in Abb. 2.1. In der Abbildung findet sich auch der Verlauf des Kolbenvolumens (blau) und zwei typische Druckkurven für einen Kreisprozess mit und ohne Zündung (grün und rot) gegen den Kurbelwinkel aufgetragen. Der Ansaugtakt beginnt bei einer Kolbenposition am oberen Totpunkt (OT), bei dem das Zylindervolumen minimal ist. Dieser Punkt im Zyklus wird auch Ladungswechsel-OT (LOT) genannt. Die

auf den Kolben wirkenden Kräfte erzeugen eine Abwärtsbewegung, woraus, je nach Druck im Ansaugtrakt, ein Unterdruck resultiert. Die Einlassventile öffnen sich und Luft oder ein Luft-Kraftstoff-Gemisch strömt in den Zylinder. Bei -180°KW erreicht der Kolben den unteren Totpunkt (UT), das Zylindervolumen ist maximal, der Druck minimal und der Verdichtungstakt beginnt. Durch die Aufwärtsbewegung des Kolbens erhöht sich nach Schließen der Einlassventile der Druck im Zylinder. Die Zündung erfolgt vor Erreichen des OT und sorgt für einen weiteren Druckanstieg durch die einsetzende Verbrennung. Dieser Punkt wird auch Zünd-OT (ZOT) genannt. Für eine ideale Kraftübertragung auf den Kolben ist der Zündzeitpunkt so gewählt, dass sich das Druckmaximum nach OT befindet. Im Arbeitstakt wird der Kolben durch die Verbrennung nach unten getrieben. Nur in diesem Takt wird am Motor Arbeit verrichtet. Nach erneutem Durchlaufen des unteren Totpunktes beginnt der Auspufftakt. Die Auslassventile werden geöffnet und das verbrannte Gas wird aus dem Zylinder geschoben. Anschließend beginnt ein neuer Zyklus.

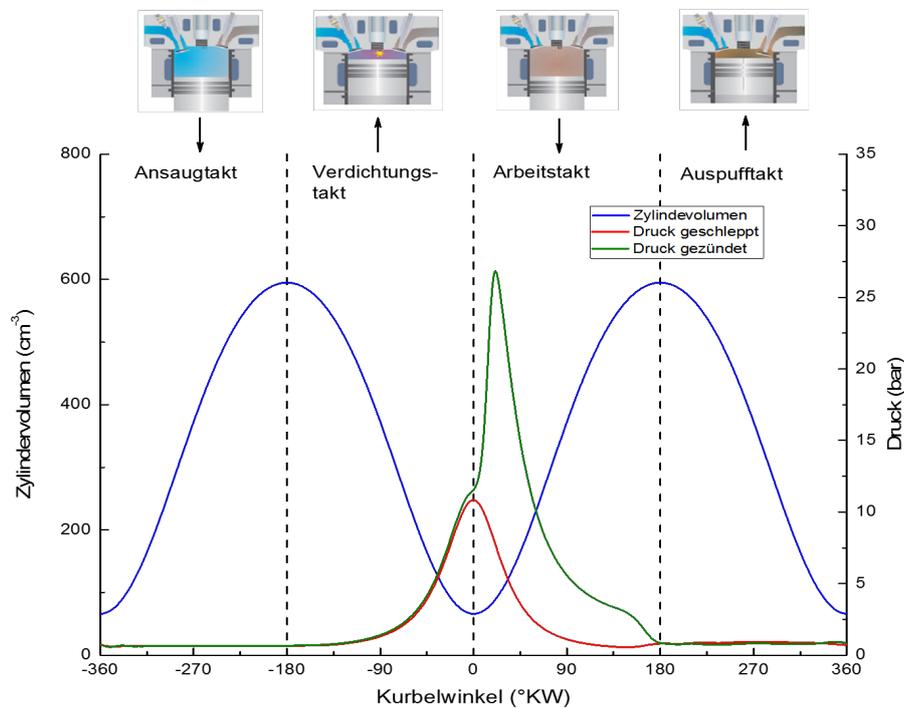


Abbildung 2.1: Ottomotorischer Kreisprozess mit den vier Takten, sowie dem Verlauf des Zylindervolumens und der zugehörigen Druckkurve für einen Motorzyklus mit und ohne Zündung [16].

An einem typischen Prüfstand kann der Motor auch ohne Zündung im sogenannten geschleppten Betrieb laufen. Hierbei wird die Kurbelwelle durch einen externen Elektromotor mit variabler Drehzahl gedreht. In gezündetem Motorbetrieb dient der Elektromotor als Last und fungiert als Generator. Im geschleppten Betrieb ist der Druckverlauf leicht anders. Das Druckmaximum wird etwa $1 - 2^\circ\text{KW}$ vor dem oberen Totpunkt erreicht [17]. Zusätzlich fällt der Druck nach der Expansion unter das Ausgangsniveau (siehe rote Kur-

woraus für das kurbelwellenabhängige Hubvolumen V_h folgt

$$V_h = \frac{d^2}{4} \pi \cdot H(\varphi). \quad (2.4)$$

Das Gesamtvolumen $V_{ges}(\varphi)$ ergibt sich damit zu

$$V_{ges}(\varphi) = V_c + V_h. \quad (2.5)$$

Die Temperatur der Zylinderladung kann während der Kompression näherungsweise durch das Modell einer polytropen Verdichtung beschrieben werden. Über Temperatur T_0 und Druck p_0 vor Beginn der Kompression und dem aktuellen Druck p kann mit Hilfe des Polytropenexponenten κ die Temperatur berechnet werden zu

$$T = T_0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{n-1}{n}}. \quad (2.6)$$

Bei diesem Modell werden Wandwärmeverluste nur über die Wahl des Exponenten berücksichtigt, weswegen es sich nur um eine Näherung handelt. Daher kann es je nach Motor sinnvoll sein den Polytropenexponenten anders zu wählen. Für Methan und Erdgas empfiehlt sich ein Wert von $n = 1,34 - 1,36$ [20]. Dafür ist eine genaue Kenntnis des Drucks notwendig, was an modernen Motorprüfständen über sehr genau arbeitende, piezoelektrische Drucksensoren gewährleistet ist. Diese können aber im Allgemeinen nur relative Druckänderungen messen, weshalb eine Kalibration auf den Absolutdruck notwendig ist. Diese Kalibration kann einerseits durch Festlegung eines Offsets geschehen, wenn für einen bestimmten Grad Kurbelwinkel der Druck bekannt ist. Andererseits kann dies über die Differenz zweier gemessener Drücke p_1 und p_2 in der Kompressionsphase unter Annahme einer polytropen Verdichtung geschehen. Für das Verhältnis der zwei Drücke gilt für die zugehörigen Zylindervolumina V_1 und V_2 unter dieser Annahme mit Gl. 2.6 und dem idealen Gasgesetz $pV = NRT$, mit Stoffmenge N und universeller Gaskonstante R

$$\begin{aligned} \frac{p_2}{p_1} &= \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n \\ \Rightarrow \frac{p_2 - p_1}{p_1} &= \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n - 1 \\ \Rightarrow p_1 &= \frac{dp}{\left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n - 1} \end{aligned} \quad (2.7)$$

mit der Differenz der beiden Drücke $dp = p_2 - p_1$. Die Druckdifferenz ist unabhängig vom Offset, sodass diese aus den gemessenen Drücken p_1' und p_2' berechnet werden kann. Der Offset p_0 ergibt sich dann aus der Differenz von wahren und gemessenem Druck. Diese Berechnung geschieht im in dieser Arbeit verwendeten Messsystem (ICOS-System, siehe Kap. 4.3) automatisch, wenn zwei passende Kurbelwellenwinkel angegeben werden.

Für die Gemischbildung und Verbrennung im Motorbetrieb ist eine genaue Kenntniss des Luftbedarfes, welcher maßgeblich für die eingespritzte Menge an Kraftstoff ist, entscheidend. Der Luftbedarf gibt an, welche Menge an Luft (mit typischerweise 21% Volumen- bzw. 23% Massenanteil von Sauerstoff) zur vollständigen, stöchiometrischen Verbrennung des Kraftstoffes notwendig ist und ergibt sich aus der Reaktionsgleichung der Verbrennung. Hier wird die Entstehung von Stickoxiden vernachlässigt, die aufgrund niedriger Konzentrationen nicht relevant ist [21]. Im Fall von Methan ist die Reaktion



Für jedes Mol Methan sind also zwei Mol Sauerstoff nötig. Mit den molaren Massen von etwa 16 g/mol für Methan und 32 g/mol für Sauerstoff ergibt sich mit dem oben erwähnten Massenanteil ein stöchiometrischer Luftbedarf von

$$L_{\text{stö}} = 17,3 \frac{\text{kg (Luft)}}{\text{kg (CH}_4)}. \quad (2.9)$$

Für Erdgas ergibt sich aufgrund der Zusammensetzung aus Methan, längerkettigen Kohlenwasserstoffen, Stickstoff und weiteren Komponenten ein anderer Luftbedarf. Dieser ist wie die Zusammensetzung Schwankungen unterworfen, wird in der Literatur aber z.B. mit $L_{\text{stö}} = 16$ angegeben [20]. Im motorischen Bereich wird das vorhandene Gemisch üblicherweise durch den sogenannten λ -Wert definiert. Dieser setzt das tatsächlich vorliegenden Luft-Kraftstoff-Verhältnis in Bezug zum stöchiometrischen Verhältnis

$$\lambda = \frac{\left(\frac{m_{\text{Luft}}}{m_{\text{Methan}}} \right)_{\text{tat}}}{\left(\frac{m_{\text{Luft}}}{m_{\text{Methan}}} \right)_{\text{stö}}}. \quad (2.10)$$

Ein Wert von $\lambda = 1$ entspricht daher einer idealen, stöchiometrischen Verbrennung. Ein Wert größer eins bedeutet einen Luftüberschuss während ein Wert kleiner eins einem Kraftstoffüberschuss entspricht. Bei Luftüberschuss spricht man von einem mageren, bei Kraftstoffüberschuss von einem fetten Gemisch.

Da das ICOS-System aus der gemessenen Transmission die Dichten des Absorbers $\rho = n/V$ mit der Stoffmenge n und dem Volumen V bestimmt, ist es sinnvoll den λ -Wert entsprechend umzuformen. Dies kann unter Berücksichtigung der molaren Massen $M = m/n$ und des Zylindervolumens geschehen, sodass gilt

$$\lambda = \frac{\left(\frac{\rho_{\text{Luft}}}{\rho_{\text{Methan}}} \right)_{\text{tat}}}{\left(\frac{\rho_{\text{Luft}}}{\rho_{\text{Methan}}} \right)_{\text{stö}}}. \quad (2.11)$$

Hieraus ergibt sich auch ein anderes Verhältnis für den stöchiometrischen Luftbedarf, da dieser jetzt auf das Zylindervolumen bezogen werden muss. Es gilt

$$L_{\text{stö}} = 9,52 \frac{\text{mol/m}^3 \text{ (Luft)}}{\text{mol/m}^3 \text{ (CH}_4)}. \quad (2.12)$$

2.2 Absorption von Infrarotlicht

In diesem Abschnitt werden die Grundzüge der Wechselwirkung von Licht mit Materie beschrieben. Dabei wird der Fokus auf die Absorption von Infrarotlicht durch Gasmoleküle und die daraus resultierende Anregung von Schwingungen und Rotationen gelegt. Zum Abschluss wird auf die Quantifizierung der Absorption durch das Lambert-Beersche Gesetz eingegangen, welches die Grundlage für die Quantifizierung von Absorberdichten darstellt.

2.2.1 Wechselwirkung von Licht mit Materie

Die Emission oder Absorption von Licht sorgt für den Übergang von einem höheren Energieniveau zu einem niedrigeren und umgekehrt [22]. Die Frequenz f des emittierten oder absorbierten Photons ist dabei über das Planck'sche Wirkungsquantum h mit der Energiedifferenz zwischen den beiden Zuständen E_1 und E_2 verbunden

$$\Delta E = E_2 - E_1 = hf. \quad (2.13)$$

Es gibt drei Arten von Wechselwirkung von Licht mit Materie: stimulierte Absorption, stimulierte Emission und spontane Emission, welche in Abb. 2.3 veranschaulicht sind. Der Prozess der stimulierten Emission ist hierbei eine Besonderheit, da unter Wechselwirkung eines Photons mit einem angeregten Zustand dieser unter Emission eines weiteren Photons abgeregt wird. Beide Photonen besitzen dann die gleiche Energie und schwingen in Phase. Bei der stimulierten Absorption und der spontanen Emission findet der Wechsel zwischen zwei Energieniveaus unter Auslöschung oder Erzeugung eines Photons statt. Die Übergangsrate w_{12} der stimulierten Absorption wurde von Einstein beschrieben als

$$w_{12} = B_{12}u \, df. \quad (2.14)$$

B_{12} ist der Einstein-Koeffizient der stimulierten Absorption und $u \, df$ ist die Energiedichte im Frequenzintervall von f bis $f + df$. Analog ergibt sich die Übergangsrate für die stimulierte Emission mit dem Koeffizienten B_{21} . Die spontane Emission ist unabhängig von der einfallenden Strahlung. Daher kann mit dem Einsteinkoeffizienten für spontane Emission A_{21} die totale Rate für die Emission beschrieben werden als

$$w_{21} = A_{21} + B_{21}u \, df. \quad (2.15)$$

Einstein konnte zeigen, dass die beiden Koeffizienten für stimulierte Absorption und Emission identisch sind ($B_{12} = B_{21} = B$), wenn die betrachteten Zustände den gleichen Entartungsgrad aufweisen und diese über

$$A_{21} = \frac{8\pi hf^3}{c^3} B \quad (2.16)$$

mit der spontanen Emission verbunden sind. Aufgrund der starken Abhängigkeit von der Frequenz kann die spontane Emission bei Betrachtung von Rotations- und Schwingungsübergängen vernachlässigt werden, da diese bei relativ niedrigen Frequenzen stattfinden

[23]. Dies ist wichtig für die Quantifizierung von Dichten anhand von Transmissionsignalen, welche auf Anregungen von Rotationen und Schwingungen beruhen.

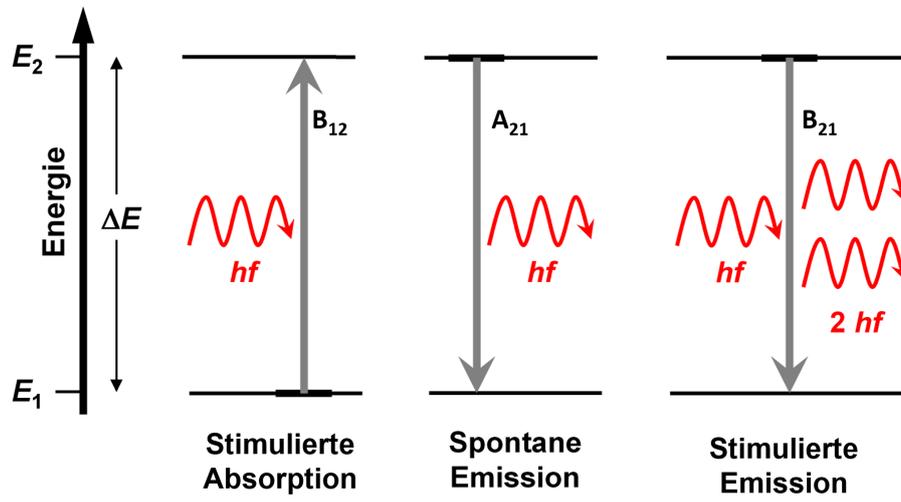


Abbildung 2.3: Die möglichen Prozesse bei Übergang zwischen zwei Energieniveaus E_1 und E_2 durch Absorption oder Emission von Licht.

2.2.2 Anregung von Rotationen und Schwingungen

Die Absorption und Emission von Licht im infraroten Wellenlängenbereich durch Moleküle geht mit der An- und Abregung von Schwingungen und Rotationen der Moleküle einher [23]. Die in dieser Arbeit entwickelte Quantifizierungsmethode basiert auf der Absorption von Licht im Infrarot. Daher wird hier zum besseren Verständnis der Methode die Entstehung von Schwingungsrotationsspektren von Molekülen sowie die Charakteristik einzelner Absorptionslinien grundlegend erläutert. Weiterführende und detailliert mathematische Beschreibungen finden sich in der Fachliteratur, z.B. in [23].

Der klassische Ausdruck für die Energie E eines starren Rotators mit der Winkelgeschwindigkeit ω und dem Trägheitsmoment I ist

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2. \quad (2.17)$$

Über die Lösung der Schrödinger-Gleichung folgt für die diskreten Energieeigenwerte eines sphärischen oder linearen Rotators mit dem Planckschen Wirkungsquantum h , der Lichtgeschwindigkeit c und der Rotationsquantenzahl J

$$E = hcBJ(J + 1) \quad J = 0, 1, 2, \dots \quad (2.18)$$

Hier ist B die Rotationskonstante für die gilt

$$B = \frac{\hbar}{4\pi c I}. \quad (2.19)$$

Damit es zu einem Rotationsübergang durch die Absorption von Licht kommen kann, muss das Molekül ein permanentes Dipolmoment besitzen. Als Auswahlregel für den Übergang gilt $\Delta J = \pm 1$, welche aus der Erhaltung des Drehimpulses resultiert. In der Spektroskopie wird üblicherweise der Rotationsterm $F = E/hc$ angegeben. Die Differenz zweier Rotationsterme ergibt dann direkt die Wellenzahl der absorbierten Strahlung [24]

$$\Delta F = F(J) - F(J - 1) = 2BJ. \quad (2.20)$$

Da der Abstand zweier Energieniveaus somit direkt abhängig vom Trägheitsmoment ist, haben kleine Moleküle wie CH_4 klar separierte Rotationslinien. Bei großen Molekülen hingegen kann es zu einer Überschneidung der Linien kommen, sodass diese nicht mehr einzeln aufgelöst werden können.

In der Realität sind Moleküle keine starren Rotatoren, wie hier dargestellt. Stattdessen kommt es durch die Zentrifugalkraft zu einer Erhöhung des Trägheitsmoments, sodass die Termdifferenz $F(J) - F(J - 1)$ für große J in geringerem Maße zunimmt. Die Intensität der Rotationslinien wird durch die Stärke des Übergangsdipolmoments und durch die Population der Rotationszustände hervorgerufen. Ersteres steigt mit J , letzteres ist durch die Boltzmannverteilung charakterisiert. Daher durchläuft die Intensität der Rotationslinien ein Maximum, welches sich bei Veränderung der Temperatur verschiebt. Bei Erhöhung der Temperatur sind entsprechend vermehrt höhere Rotationsniveaus besetzt.

Zur Herleitung der Termschemata von Schwingungsübergängen wird zunächst von einem zweiatomigen Molekül mit Atommassen m_1 und m_2 ausgegangen. Näherungsweise kann die Schwingung als harmonischer Oszillator beschrieben werden, sodass die Lösung der Schrödinger-Gleichung als Energie für die unterschiedlichen Zustände lautet

$$E = \left(v + \frac{1}{2}\right)\hbar\omega \quad \text{mit} \quad \omega = \left(\frac{k}{m_{eff}}\right)^2 \quad \text{und} \quad v = 0, 1, 2, \dots \quad (2.21)$$

Hierbei ist $m_{eff} = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$ die effektive Masse des Moleküls und k die Kraftkonstante der harmonischen Schwingung. Ein Übergang zwischen zwei Schwingungsniveaus ist erlaubt, wenn es dabei zu einer Änderung des Dipolmomentes kommt. Das Molekül muss hierfür kein permanentes Dipolmoment besitzen. Daraus folgt als Auswahlregel $\Delta v = \pm 1$. Der Vibrationsterm wird analog zum Rotationsterm als $G(v) = E/hc$ definiert, sodass sich für einen erlaubten Übergang folgende Termdifferenz ergibt

$$\Delta G = G(v + 1) - G(v) = \tilde{\nu} \quad \text{mit} \quad \tilde{\nu} = \frac{\omega}{2\pi c}. \quad (2.22)$$

Zu bermerken ist hier, dass aufgrund der Boltzmann-Verteilung bei Raumtemperatur der Großteil der Moleküle im Grundzustand ist. Daher ist der dominante Schwingungsübergang derjenige aus dem Grundzustand. Zur Beschreibung realer Moleküle ist ein harmonisches Potenzial wie bisher verwendet nicht geeignet, da es einige Effekte, wie z.B. die Dis-

soziation von Molekülen nicht erklären kann. Eine Herangehensweise an dieses Problem ist die Verwendung des Morse-Potenzials [23], woraus sich bei Lösung der Schrödinger-Gleichung für das Termschema ein zusätzlicher Term mit der Anharmonizitätskonstante x_e ergibt

$$G(\nu) = \left(\nu + \frac{1}{2}\right)\tilde{\nu} - \left(\nu + \frac{1}{2}\right)^2 x_e \tilde{\nu}. \quad (2.23)$$

Ist $x_e > 0$, verschieben sich die Übergänge also zu niedrigeren Wellenzahlen. Weiterhin erklärt die Anharmonizität das Auftauchen weiterer spektraler Linien, der sogenannten Obertöne, welche Übergängen mit $\Delta\nu = \pm 2, 3, \dots$ entsprechen und gegenüber dem fundamentalen Übergang deutlich abgeschwächt sind.

Reale Spektren im Infrarotbereich sind immer eine Kombination aus Schwingungs- und Rotationsübergängen. Das heißt, die Rotationsquantenzahl J ändert sich bei einem Schwingungsübergang um ± 1 . Bei einigen Molekülen (z.B. CH_4) ist allerdings auch $\Delta J = 0$ erlaubt. Analog zu oben lässt sich ein Schwingungsrotationsterm S aufstellen. Dieser ist unter Vernachlässigung von Anharmonizität und zentrifugaler Verzerrung

$$S(\nu, J) = \left(\nu + \frac{1}{2}\right)\tilde{\nu} + BJ(J + 1). \quad (2.24)$$

Das Spektrum wird in drei Bereiche unterteilt, wie in Abb. 2.4 gezeigt. Der P-Zweig bestehend aus den Übergängen mit $\Delta J = -1$, den Q-Zweig mit $\Delta J = 0$ und den R-Zweig mit $\Delta J = +1$. Bisher wurde von zweiatomigen Molekülen ausgegangen. Bei diesen ist die einzig mögliche Schwingung die Streckung der Bindungslänge. Bei mehratomigen Molekülen können sich entsprechend die unterschiedlichen Bindungslängen und Winkel ändern, woraus komplexe Spektren resultieren. Nichtsdestotrotz können alle Schwingungen als Kombination fundamentaler Schwingungsmoden beschrieben werden. Für ein nichtlineares Molekül bestehend aus N Atomen ergibt sich eine Gesamtzahl von $3N - 6$ unabhängigen Schwingungsmoden. Bei linearen Molekülen sind es $3N - 5$ Moden. Die zuvor dargestellten Termschemata und Auswahlregeln gelten weiterhin [23].

2.2.3 Linienstärken und -breiten

Der Absorptionsquerschnitt σ beschreibt die Stärke mit der ein Molekül Licht absorbiert und ist abhängig von der Wellenzahl ν . Allerdings erstrecken sich Absorptionslinien üblicherweise über einen gewissen Wellenzahlbereich und man spricht von einer Bande. Um ein Maß für die Intensität A einer bestimmten Absorptionsbande zu haben, wird das Integral über deren Breite herangezogen

$$A = \int_{\text{Bande}} \sigma d\nu. \quad (2.25)$$

Es gibt mehrere Effekte, welche zur Breite einer Absorptionslinie beitragen. Die natürliche Linienbreite entsteht durch die begrenzte Lebensdauer angeregter Zustände bedingt durch die spontane Emission. Gemäß der Heisenbergschen Unschärferelation sorgt die endliche

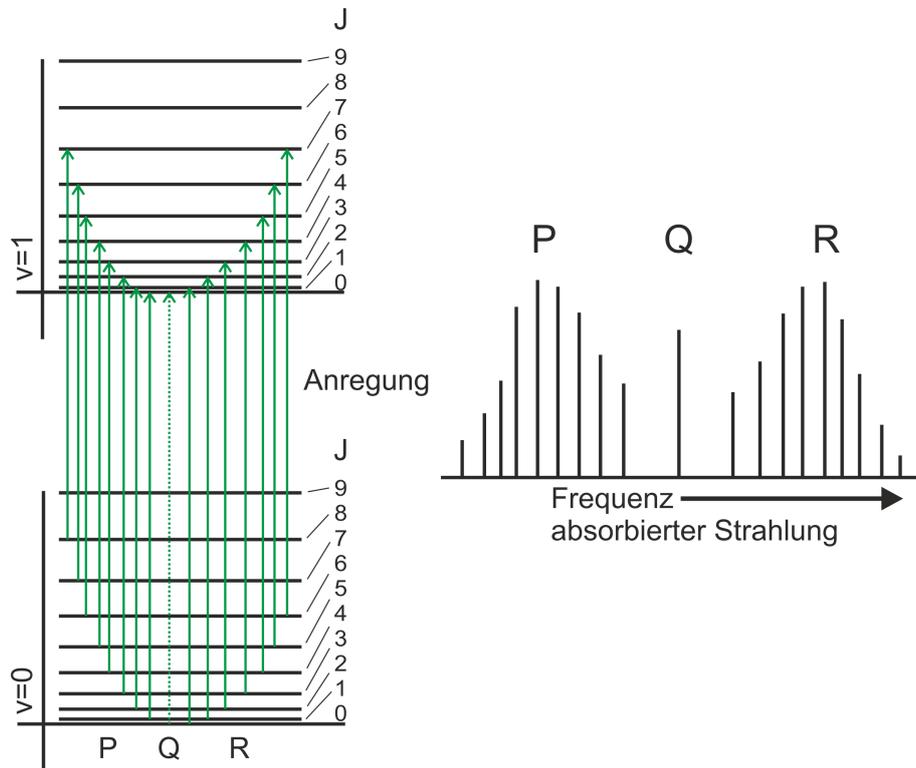


Abbildung 2.4: P, Q und R-Zweig in einem Schwingungsrotationspektrum. Links sind die exakten Energieübergänge und rechts die daraus resultierenden Absorptionslinien gezeigt. Die Intensitäten der einzelnen Linien spiegeln die Besetzung der Zustände wieder [23].

Lebensdauer τ für eine Energieunschärfe δE

$$\delta E = \frac{\hbar}{\tau}. \quad (2.26)$$

Je kürzer die Lebensdauer ist, desto größer ist die Energieunschärfe. Aufgrund des Zusammenhangs mit der spontanen Emission hängt die natürliche Linienbreite stark von der Frequenz der jeweiligen Absorptionslinie ab. Daher ist die Breite bei den betrachteten Schwingungsrotationsübergängen üblicherweise klein. Ein typischer Rotationsübergang hat eine Lebensdauer von etwa 10^3 s, woraus eine natürliche Linienbreite von $5 \cdot 10^{-15} \text{ cm}^{-1}$ folgt [23]. Dementsprechend tragen die im Folgenden beschriebenen Effekte deutlich stärker zur Linienbreite bei.

Die sogenannte Doppler-Verbreiterung basiert auf dem gleichnamigen Effekt und entsteht durch die Bewegungskomponente der Moleküle auf den Beobachter zu oder von diesem weg. Vor allem in gasförmigen Proben stellt dieser Verbreiterungseffekt einen wichtigen Beitrag zur Linienbreite dar. Durch den Doppler-Effekt verschiebt sich die Energie der beobachteten Übergänge und die Absorptionslinien verbreitern sich. Hierbei nehmen die

Linien die Form eines Gauß-Profiles an. Da die Geschwindigkeitsverteilung der Moleküle abhängig von der Temperatur ist, vergrößert sich der Effekt mit zunehmender Temperatur.

Mit zunehmendem Druck steigt die Stoßfrequenz der Moleküle untereinander und mit der Gefäßwand. Dieser Effekt, genannt Stoßverbreiterung, verringert die Lebensdauer beträchtlich und sorgt wie bei der natürlichen Linienbreite für eine Vergrößerung der Energieunschärfe. Die Form der Linie ist die eines Lorentz-Profiles. In Bereichen, wo Doppler- und Druckverbreiterung ähnlich stark vorhanden sind, überlagern sich die Formen der Profile zu einem Voigt-Profil [25].

2.2.4 Thermische Anregung von Schwingungen

Im Brennraum von Motoren kann es während der Kompression zu stark erhöhten Temperaturen kommen. Dies führt zur thermischen Anregung von Schwingungs- und Rotationsniveaus, was die Absorption von Infrarot (IR)-Strahlung beeinflussen kann. Um diesen Einfluss abschätzen zu können, muss zunächst die Wechselwirkung mit Licht genauer betrachtet werden. Wie in Kap. 2.2.1 beschrieben, existieren drei Arten von Wechselwirkung: stimulierte Absorption und Emission sowie spontane Emission durch die ein Übergang zwischen einem niederenergetischen Zustand N_1 und einem höherenergetischen Zustand N_2 stattfinden kann. Die Änderung der Besetzung N_2 des höheren Zustandes ist nach Gl. 2.14 und 2.15 mit der Wellenzahl ν

$$\frac{dN_2}{dt} = N_1 u(\nu) B_{12} - N_2 u(\nu) B_{21} - N_2 A_{21}. \quad (2.27)$$

Im Experiment entspricht die spontane Emission der Hintergrundstrahlung, welche durch eine entsprechende Messung eliminiert wird, sodass diese in der weiteren Betrachtung vernachlässigt werden kann. Die Besetzung der Zustände 1 und 2 lässt sich anhand der Boltzmann-Verteilung beschreiben [22]

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2}{g_1} \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{k_B T}\right), \quad (2.28)$$

wobei g den Entartungsgrad eines Zustandes beschreibt, sodass hier für die Einstein-Koeffizienten gilt

$$\frac{B_{21}}{B_{12}} = \frac{g_1}{g_2}. \quad (2.29)$$

Damit ergibt sich für die Änderung der Besetzung N_2 mit $E_2 - E_1 = h\nu$

$$\frac{dN_2}{dt} = N_1 u(\nu) B_{12} \left(1 - \exp\left(-\frac{h\nu}{k_B T}\right)\right). \quad (2.30)$$

An dieser Gleichung ist zu erkennen, dass bei steigender Temperatur, der Einfluss der stimulierten Emission wächst und die effektive Nettoabsorption geringer wird. Für die aufgenommene Strahlungsleistung $d\phi$ pro Volumenelement dV gilt dabei

$$\frac{d\phi}{dV} = h\nu \frac{dN}{dt}. \quad (2.31)$$

Diese kann auch durch das Lambert-Beersche-Gesetz beschrieben werden. Für die Änderung der Intensität I von Licht mit Wellenzahl ν , welches in einem Medium mit dem Absorptionsquerschnitt σ und der Dichte ρ die Strecke x zurücklegt gilt

$$dI = -\sigma(\nu)\rho I(\nu)dx. \quad (2.32)$$

Für die absorbierte Strahlungsleistung pro Volumenelement folgt mit der Lichtgeschwindigkeit c

$$\frac{d\phi}{dV} = \sigma(\nu)\rho cu(\nu). \quad (2.33)$$

Daraus folgend lässt sich mit Gl. 2.30, 2.31 und 2.33 ein effektiv wirkender Absorptionsquerschnitt beschreiben

$$\sigma(\nu) = N_1 B_{12} \frac{h\nu}{\rho c} \left(1 - \exp\left(-\frac{h\nu}{k_B T}\right)\right). \quad (2.34)$$

Aus dieser Gleichung wird deutlich, dass stark erhöhte Temperaturen sowie deren dynamische Änderung Einfluss auf Absorptionsmessungen haben können. Wie stark dieser ist, lässt sich anhand der thermischen Besetzung der Schwingungsniveaus der relevanten Moleküle, in diesem Fall Methan, untersuchen. Die Hauptschwingungen von Methan liegen bei den Wellenzahlen

$$\nu = (2914, 2; 1523, 8; 3020, 3; 1306, 2) \text{ cm}^{-1}, \quad (2.35)$$

was Frequenzen von

$$f = (8, 7366 \cdot 10^{-13}; 4, 5682 \cdot 10^{-13}; 9, 0546 \cdot 10^{-13}; 3, 9159 \cdot 10^{-13}) \text{ 1/s} \quad (2.36)$$

entspricht [26], wobei die Entartungen $g = (1 \ 2 \ 3 \ 3)$ sind. Die Energie E_{ges} eines Schwingungszustandes des Systems ergibt sich aus der Summe der Einzelenergien nach Gl. 2.13 jeweils multipliziert mit der Entartung:

$$E_{ges} = h \sum_i g_i f_i (n_i + 1/2) \quad (2.37)$$

Dabei sind die Zustände definiert durch $n = (n_1; n_2; n_3; n_4)$, woraus sich für die zu betrachtenden Schwingungen v1 bis v4 ergibt

- $n = (0000)$ Grundzustand
- $n = (1000)$ Schwingung v1
- $n = (0100)$ Schwingung v2
- $n = (0010)$ Schwingung v3
- $n = (0001)$ Schwingung v4
- $n = (0101)$ Kombinationsschwingung v2+v4.

Nach diesen Vorüberlegungen soll der Einfluss der thermischen Anregung auf die Absorption von Methan für das in dieser Arbeit verwendete Messsystem abgeschätzt werden. Das Messsystem nutzt den Absorptionsbereich um $3,3 \mu\text{m}$ für die Detektion von Methan.

Neben den Hauptschwingungen ν_1 bis ν_4 wird daher auch die Kombinationsbande $\nu_2+\nu_4$ betrachtet, da diese in besagtem Bereich liegt. Für diese wurde ein Entartungsgrad von $g=6$ angenommen, da die kombinierten Schwingungen jeweils 2- und 3-fach entartet sind, woraus sich sechs mögliche Kombinationen ergeben. Der Grundzustand ist nicht entartet, d.h. $g=1$. Die Besetzungswahrscheinlichkeit p eines Schwingungszustandes durch thermische Anregung ergibt sich aus der Boltzmannverteilung

$$p = \frac{g}{Z} \exp\left(-\frac{E_{ges}}{k_B T}\right) \quad (2.38)$$

mit der Zustandssumme

$$Z = \sum_i \exp\left(-\frac{E_i}{k_B T}\right). \quad (2.39)$$

Das Ergebnis der Berechnungen liefert die thermischen Besetzung der angeregten Zustände (Abb. 2.5) und des Grundzustandes (Abb. 2.6) in Abhängigkeit von der Temperatur. Es ist zu erkennen, dass eine nennenswerte thermische Anregung erst ab etwa 600 K stattfindet. Die Besetzung des Grundzustandes beträgt bei 800 K knapp unter 99% und bei 1000 K etwa 97%. Damit ist dieser Effekt bei Messungen im Brennraum eines Ottomotors typischerweise vernachlässigbar. Der Einfluss der induzierten Emission auf den effektiv wirkenden Absorptionsquerschnitt wird in den Berechnungen nicht berücksichtigt.

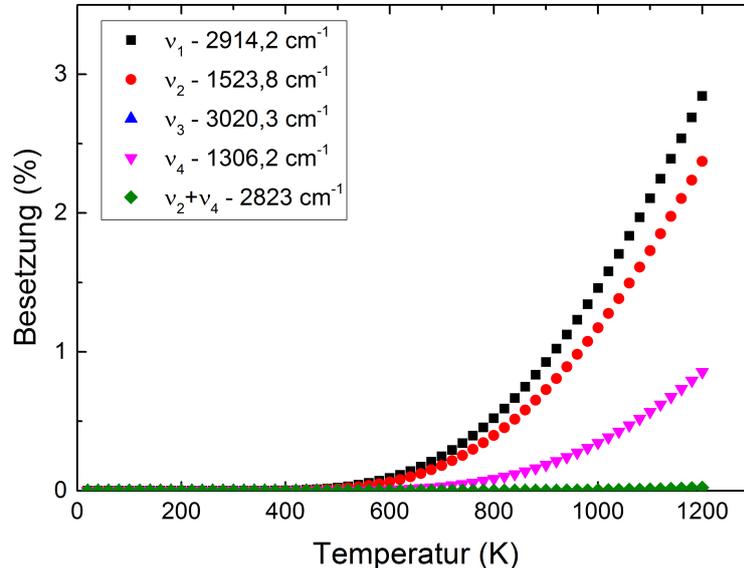


Abbildung 2.5: Besetzungswahrscheinlichkeit der angeregten Schwingungszustände von Methan in Abhängigkeit von der Temperatur nach der Boltzmannverteilung.

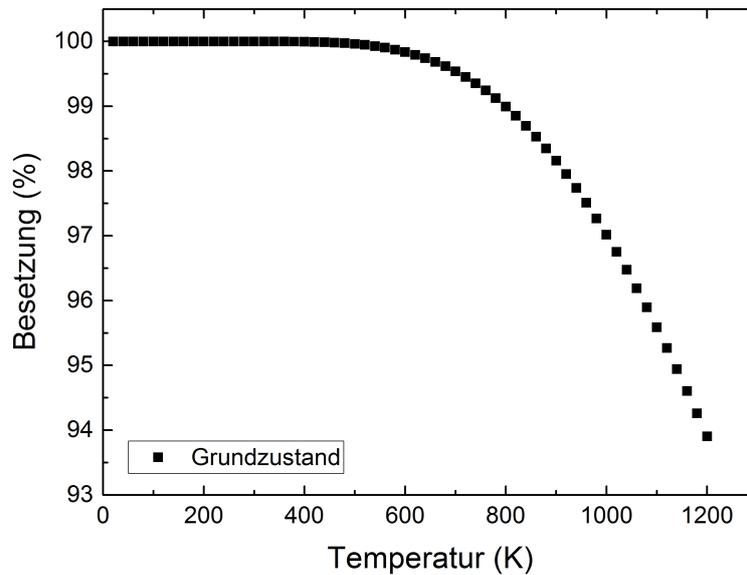


Abbildung 2.6: Besetzungswahrscheinlichkeit des Grundzustandes von Methan in Abhängigkeit von der Temperatur nach der Boltzmannverteilung.

2.2.5 Lambert-Beersches Gesetz

Wie im vorigen Abschnitt erwähnt beschreibt das Lambert-Beersche Gesetz die Absorption monochromatischer Strahlung in einem isotropen Medium [23]. Die Transmission $\bar{\tau}$ ergibt sich aus der Intensität I des Lichtes nach dem Durchgang durch das Medium im Verhältnis zur Eingangsintensität I_0

$$\bar{\tau} = \frac{I}{I_0} = e^{-\sigma(\nu,p,T)\rho(p,T)L}. \quad (2.40)$$

Dabei ist σ wie zuvor der von Wellenzahl, Druck und Temperatur abhängige Absorptionsquerschnitt, $\rho(p, T)$ die Dichte des absorbierenden Mediums oder Moleküls und L die Absorptionsstrecke. Mit diesem empirisch gefundenen Zusammenhang lässt sich über die Messung der Transmission die Dichte des absorbierenden Moleküls quantifizieren, wenn der Absorptionsquerschnitt bekannt ist [24].

3 Methoden zur Gemischbildungsanalyse

Im Rahmen dieses Kapitels soll ein Überblick über Techniken zur Analyse von Gemischbildungsprozessen in der motorischen Verbrennungsdiagnostik gegeben werden. Dies dient der Einordnung der vorliegenden Arbeit und der Gegenüberstellung der hier entwickelten Quantifizierungsmethode mit etablierten Techniken. Hierbei wird in den folgenden Unterkapiteln ein besonderes Augenmerk auf die Quantifizierung der Kraftstoffdichte und des Luft-Kraftstoff-Verhältnisses gelegt. Mittlerweile gibt es ein weites Feld optischer Messtechniken, welche in der motorischen Entwicklung zum Einsatz kommen. Diese nutzen oft laserbasierte Verfahren und basieren auf den physikalischen Prozessen der Rayleigh-, Raman- und Mie-Streuung sowie der laserinduzierten Fluoreszenz (LIF) und -Inkandeszenz. Jedoch sind auch nicht-optische Messverfahren, wie Flammenionisationsdetektoren (FID) sehr verbreitet. Eine weitere alternative zum Einsatz von Lasern bietet die nicht-dispersive Infrarotspektroskopie (NDIR), wozu auch die in dieser Arbeit entwickelte Methode zählt. Durch andere Messtechniken lassen sich neben der Kraftstoffdichte weitere Parameter der motorischen Verbrennung, wie die Verteilung diverser Molekülspezies, Temperatur, Ruß- und Tröpfchenverteilung sowie Strömungsbewegungen erfassen. Ein genauer Überblick findet sich in der Fachliteratur, z.B. bei [17, 27–29].

3.1 Laserinduzierte Fluoreszenz

Bei der laserinduzierten Fluoreszenz wird das Licht eines Lasers genutzt, um Moleküle zur Fluoreszenz anzuregen, welche wiederum von einer oder mehreren Kameras mit passendem Filter detektiert wird. So lässt sich die Verteilung von Molekülen im angeregten Volumen bildgebend erfassen und quantifizieren. Zur Anregung wird meist ein gepulster, frequenzvervielfachter Nd-YAG-Laser mit einer Wellenlänge von 266 nm verwendet. Für die Messungen wird ein nicht-fluoreszierender Ersatzkraftstoff wie iso-Oktan oder n-Heptan verwendet, dem ein fluoreszierender Stoff, ein sogenannter Tracer, in bekannter Konzentration beigemischt wird [30]. Als Tracer eignen sich je nach spezieller Anwendung beispielsweise Aceton, Toluol, 3-Pentanon oder unterschiedliche Amine. Bei Auswahl und Dosierung des Tracers muss eine schädigende Wechselwirkungen mit Motorbauteilen und eine Beeinflussung des Brennverfahrens vermieden werden. Ist dies sichergestellt, ermöglicht die Einkopplung eines quasi 2-dimensionalen Lichtschnittes in den Motorbrennraum eine bildgebende, räumlich aufgelöste Messung der Kraftstoffverteilung. Dafür ist ein optischer Zugang in den Zylinder nötig. Daher kann diese Messtechnik meist nur an Motoren mit Endoskopzugang oder Transparentmotoren mit einer Laubuchse aus Glas angewendet werden. Die thermodynamischen Eigenschaften dieser Motoren unterscheiden sich von denen eines normalen Vollmotors, sodass die Messergebnisse entsprechend interpretiert werden müssen. Es gibt allerdings auch Ansätze mittels modifizierter Zündkerzen im Se-

rienmotor sowohl Temperatur als auch Kraftstoffkonzentration am Ort der Zündkerze zu messen [31, 32]. Im Allgemeinen ist der experimentelle Aufwand für Messungen mit LIF hoch, da ein komplexer, in der Justage aufwendiger, optischer Aufbau mit Laser, Optiken und Kameras an einem Motorprüfstand realisiert werden muss und die Auswertung zeitintensiv ist. Zudem ist eine zeitlich aufgelöste Messung eines einzelnen Motorzyklus im Allgemeinen aufgrund der Repetitionsrate des Nd-YAG-Lasers (10-20 Hz) nicht möglich. Stattdessen werden in aufeinander folgenden Motorzyklen an einer definierten Stellung der Kurbelwelle Messungen gemacht [33].

3.2 Flammenionisationsdetektoren

Flammeionisationsdetektoren (FID) sind etablierte Messgeräte in der Gemischbildungsanalyse bei Verbrennungsmotoren [34]. Hierbei wird ein Gasentnahmesystem an eine funktionsfähige Zündkerze appliziert. Das aus dem Zylinder entnommene Gas wird mittels eines Kapillarrohrs zu einer Wasserstoffflamme geleitet. Die im Gas vorhandenen Kohlenwasserstoffe werden ionisiert, sodass ein Stromfluss gemessen werden kann. Dieser Stromfluss ist proportional zur Konzentration der Kohlenwasserstoffe und damit zur Kraftstoffmenge. Das System muss vor der Benutzung mit Hilfe eines Prüfgases mit definierter Kohlenwasserstoffkonzentration kalibriert werden. Weiterhin ist zu beachten, dass es bei den Messungen bedingt durch die Gasentnahme zu zeitlichen Verzögerungen kommt. Das Probengas, welches am Ende des Kapillarrohrs ankommt und vermessen wird entspricht dem Gas im Zylinder zu einem früheren Zeitpunkt im Motorzyklus. Die Verzögerungen sind abhängig von der Länge des Kapillarrohrs und den Druckbedingungen im Zylinder und erschweren die Interpretation der Messungen [35, 36]

3.3 Durchstimmbare Diodenlaser

Durchstimmbare Diodenlaser erlauben das Scannen einer bestimmten Absorptionsbande eines Moleküls, um darüber Rückschlüsse auf Temperatur und Konzentration dieser Molekülspezies zu ziehen. Diese Technik wird als Tuneable-Diode-Laser-Absorption-Spectroscopy, kurz TDLAS, bezeichnet und ist in der Verbrennungsdiagnostik weit verbreitet [37]. So konnte mit TDLAS beispielsweise aus dem Verhältnis zweier Obertonübergänge des Wassers Temperatur und Restgaskonzentration bestimmt werden [38, 39]. Mit modernen Diodenlasern sind sehr schnelle Messungen mit Auflösungen im Bereich Mikrobis Millisekunden möglich, jedoch ist auch hier der experimentelle Aufwand hoch. Die zu untersuchende Absorptionslinie muss sorgfältig ausgewählt werden und Einflüsse durch Lichtstreuung und beam-steering müssen genau kontrolliert werden. Über Methoden der Wellenlängenmodulation kann der Einfluss dieser Effekte verringert werden. Jedoch ist dann in der Auswertung eine komplexe Modellierung notwendig, die neue Unsicherheiten erzeugt.

3.4 Nicht-dispersive Infrarotspektroskopie

Basierend auf der Absorption von IR-Strahlung gibt es Messkonzepte zur Quantifizierung der Kraftstoffdichte, welche sich in der Wahl der Lichtquelle unterscheiden. Zum einen kann ein He-Ne-Laser genutzt werden, welcher Licht mit einer Wellenlänge von $3,392\ \mu\text{m}$ emittiert, welches sich innerhalb der Absorptionsbande üblicher Kraftstoffe liegt. Aufgrund des Einsatzes monochromatischer Strahlung müssen allerdings die druck- und temperaturabhängigen Absorptionsquerschnitte des verwendeten Kraftstoffes sehr genau bekannt sein [40]. Mit dieser Methode wurden auch schon Versuche mit Methan als Kraftstoff durchgeführt [41]. Um die Problematik der Druck- und Temperaturabhängigkeit spektraler Absorptionsquerschnitte zu umgehen, wurden Zündkerzensensoren entwickelt, welche breitbandige IR-Absorption zur Bestimmung von Kraftstoff- und Restgasdichte nutzen [42, 43]. Bei dieser Methode wird breitbandiges Infrarotlicht über eine optische Faser zu einer Messstrecke geleitet, welche sich neben der Elektrode einer funktionsfähigen Zündkerze befindet. Diese besteht aus einem durch Metallstege gehaltenen Spiegel, welcher das Licht zurück zu einer zweiten Faser reflektiert. Das reflektierte Licht wird über Bandpassfilter in Wellenlängenbereichen unterteilt, um darüber unterschiedliche Molekülspezies zu detektieren [44, 45]. Das gleiche Prinzip wird auch im ICOS-System, welches in dieser Arbeit genutzt wird, angewendet.

Das ICOS-System der Firma LaVision GmbH gehört zu den NDIR-Systemen mit faseroptischem Zündkerzensensor und wurde im Rahmen gemeinsamer Projekte mit dem Laser-Laboratorium Göttingen e.V. entwickelt. Es besteht aus einer breitbandigen Lichtquelle, einer modifizierten Zündkerze mit optischen Zugang sowie einem Detektionsserver mit vier Detektoren. Das System nutzt die breitbandige Absorption von Infrarotlicht der Kraftstoff-Moleküle sowie von CO_2 und H_2O , um deren Dichte zu messen. Damit lassen sich das Luft-Kraftstoff-Verhältnis sowie die Abgasrückführungsrate quantifizieren [36, 46–48]. Die Messungen sind mit einer maximalen zeitlichen Auflösung von $33\ \mu\text{s}$ möglich, was 1° Kurbelwinkel (KW) bei $5000\ \text{U}/\text{min}$ entspricht. Allerdings ist das Messvolumen auf ein kleines Spiegelgehäuse neben der Zündkerzenelektrode beschränkt. Die Messungen beruhen aktuell auf einer empirischen Kalibration des Systems im Labor sowie am Motorprüfstand. Daher kann es außerhalb der kalibrierten Messbereiche je nach Betriebspunkt des Motors zu Ungenauigkeiten in den Ergebnissen kommen. Weiterhin ist das System nur für die Messung von konventionellem Otto- und Dieselmotorkraftstoff geeignet, weswegen es nicht an Erdgasmotoren eingesetzt werden kann. Der Aufbau dieses Systems bildet die Grundlage für die Entwicklung des in dieser Arbeit vorgestellten Messkonzeptes zur Quantifizierung der Kraftstoffdichte in Erdgasmotoren.

4 Experimenteller Aufbau und Methoden

Im Folgenden werden die verwendeten Messsysteme und Versuchsaufbauten sowie die Durchführung der Experimente beschrieben. Hierbei wird zunächst die grundlegende Funktion eines FTIR-Spektrometers beschrieben. Dieses Gerät dient zur Untersuchung des Absorptionsverhaltens von Methan und der Validierung des Rechenmodells zur Quantifizierung der Methandichte in Erdgasmotoren. Der im folgenden beschriebene *Optical Spectrum Analyzer* wird zur Messung des Emissionsspektrums von Lichtquellen genutzt, welche im ICOS-System der LaVision GmbH genutzt werden. Nachfolgend wird die Funktion des ICOS-Systems im Detail erläutert, da im Rahmen dieser Arbeit für dieses System eine Quantifizierungsstrategie zur Bestimmung von Methandichte und λ -Wert in Erdgasmotoren entwickelt wurde. Weiterhin wird die Konzeption einer Messsonde für den Einsatz im Ansaugtakt eines Verbrennungsmotors beschrieben und die Ergebnisse der Suche nach geeigneten Lichtquellen und Reflektoren dargestellt. Als Messumgebung zur Entwicklung der Quantifizierungsstrategie dienen mehrere Druckzellen, ein Strömungskanal, eine Rapid Compression Machine, sowie zwei Versuchsmotoren, deren Aufbau erläutert werden. Außerdem wird die Funktion des ICOS-Temperatur-Systems der LaVision GmbH erklärt, welches zur dynamischen Temperaturmessung in Motor und Rapid Compression Machine genutzt wird, um als Abgleich zu Berechnungen und Messungen des ICOS-Systems zu dienen.

4.1 FTIR-Spektrometer

Ein Fourier-Transform-InfraRot-Spektrometer dient der Messung von Absorptionsspektren fester, flüssiger oder gasförmiger Substanzen im mittleren bis fernen infraroten Spektralbereich. Das Spektrometer besteht üblicherweise aus einer Lichtquelle, einem Michelson-Interferometer, einer Probenkammer und einem Detektor. Im Interferometer wird das Licht der Strahlquelle über einen Strahlteiler aufgeteilt und fällt auf einen festen und einen beweglichen Spiegel. Die Verschiebung des beweglichen Spiegels wird dabei über einen He-Ne-Laser als Referenz kontinuierlich gemessen. Am Detektor wird durch die Verschiebung der Spiegel ein Interferogramm gemessen, welches über eine Fouriertransformation in ein Spektrum umgerechnet wird. Der Vorteil eines FTIR-Spektrometers gegenüber klassischen, dispersiven Spektrometern besteht in einer höheren Lichtausbeute, einem höheren Signal-Rausch-Verhältnis und einer höheren Wellenzahlgenauigkeit. Weiterführende Details zur Funktionsweise sind in der Literatur zu finden [24, 25].

Es wurden zwei Spektrometer der Firma Bruker verwendet, ein Vector 33 und ein Vertex 70. Beide nutzen als Strahlquelle einen Globar, einen KBr-Strahlteiler und einen DLaTGS-Detektor (deutერიertes L-Alanin dotiertes Triglycinsulfat). Das Vector 33 besitzt eine maxi-

male Auflösung von $0,6 \text{ cm}^{-1}$ über den Messbereich $370 - 7500 \text{ cm}^{-1}$. Wohingegen das Vertex 70 eine maximale Auflösung von $0,4 \text{ cm}^{-1}$ über den Messbereich $350 - 8000 \text{ cm}^{-1}$ besitzt. Die Datenaufnahme erfolgte mit der Software OPUS von Bruker. Pro Messung wurden immer fünf Interferogramme aufgenommen. Die Berechnung des Spektrums erfolgte mit einer Phasenkorrektur nach Mertz und die Apodisierung mit einer Blackman-Harris-Funktion mit einem zero-filling-Faktor von 2.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die genannten FTIR-Spektrometer verwendet, um Absorptionsquerschnitte von Methan über Messungen an Druckzellen zu bestimmen und das Rechenmodell zur Quantifizierung der Methandichte zu validieren. Weiterhin wurden die Transmissionskurven der diversen Bandpassfilter für das ICOS-System und der verwendeten ZrF_4 -Fasern vermessen.

4.2 Thorlabs OSA205

Das Thorlabs OSA205 (Optical Spectrum Analyzer) misst das Emissionsspektrum einer Lichtquelle im Bereich von $1-5,6 \mu\text{m}$. Die Funktionsweise basiert dabei auf dem gleichen Prinzip wie bei einem Fourier-Transform-Infrarotspektrometer, erlaubt aber die Einkopplung einer Lichtquelle über einen Faseranschluss und einen Freistrahleingang. Über ein Michelson-Interferometer wird das Interferogramm des Eingangssignals aufgenommen. Daraus wird über die Messsoftware das gemessene Spektrum erzeugt. Zur kontinuierlichen Bestimmung der optischen Weglänge ist ein He-Ne-Laser verbaut. Die maximale Auflösung beträgt $0,25 \text{ cm}^{-1}$. Weiterführende Informationen und Details sind bei Thorlabs zu finden [49].

Zur Messung des Emissionsspektrums der Lichtquelle wird an das Lampengehäuse des ICOS-Systems eine ZrF_4 -Faser angeschlossen. Am Faserausgang wird das Licht mit einer CaF_2 -Linse kollimiert und über den Freistrahleingang des OSA205 in das Spektrometer eingekoppelt. Um Einflüsse von Wasser auf die Messung zu minimieren, wird das Spektrometer mit Stickstoff gespült.

4.3 ICOS-System

In diesem Abschnitt wird das ICOS-System der Firma LaVision GmbH mit faseroptischem Zündkerzensensor und Saugrohrsonde im Detail beschrieben. Die einzelnen Komponenten, ohne die optischen Messköpfe, sind zur Veranschaulichung in Abb. 4.1 gezeigt. Eine schematische Darstellung des Aufbaus der Komponenten sowie der optischen Messköpfe folgt weiter unten. Nach der Erklärung der einzelnen Komponenten erfolgt eine Erläuterung der Quantifizierungsstrategie für die Methandichte. Die Quantifizierungsstrategie wurde im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und an unterschiedlichen Versuchsaufbauten getestet, wie in den nachfolgenden Kapiteln dargelegt wird. Weiterhin werden in diesem Abschnitt die Ergebnisse der Untersuchungen unterschiedlicher Lichtquellen für das System im Allgemeinen und Retroreflektoren für die Saugrohrsonde im Speziellen gezeigt.



Abbildung 4.1: Die einzelnen Komponenten des ICOS-Systems ohne optischen Messkopf: Lichtquelle, Detektionseinheit, optische Fasern und Computer zur Datenaufnahme.

4.3.1 Funktionsprinzip

Das ICOS-System der LaVision GmbH nutzt Bandpassfilter, um die Absorption von IR-Licht durch bestimmte Molekülspezies breitbandig zu messen, was eine schnelle Messung der Gasdichten ermöglicht. Eine wellenzahlaufgelöste Aufnahme des Spektrums wäre nicht mit der gewünschten zeitlichen Auflösung von maximal 1 °KW bei 5000 U/min ($\approx 33 \mu\text{s}$) bei einer Aufnahmezeit von 30 kHz möglich. Die oben beschriebenen FTIR-Spektrometer benötigen zur Erfassung eines Spektrums im gewünschten Wellenzahlbereich bei akzeptabler Auflösung mehrere Sekunden. Der schematische Aufbau des Systems ist in Abb. 4.2 gezeigt. Das Licht der Lampe (150 W Quartz-Wolfram-Halogenlampe, kurz QTH-Lampe) wird über eine Saphirlinse und durch ein Chopperrad in eine ZrF₄-Faser eingekoppelt und gelangt dadurch zum optischen Messkopf. Der nicht absorbierte Teil der Strahlung wird über eine zweite ZrF₄-Faser zum Detektionssystem geleitet. Hier erfolgt die Selektion der molekülspezifischen Absorptionsbereiche über geeignete Bandpassfilter. Eine Linse fokussiert das Licht dann auf einen Detektor, welcher ein Spannungssignal abhängig von der Intensität des einfallenden Lichtes ausgibt. Die Filter stehen in einem Winkel zur Strahlrichtung, sodass der nicht transmittierte Teil über einen Goldspiegel zum nächsten Detektor gelangt, wodurch ein kaskadenförmiger Aufbau möglich ist. Bei den Detektoren handelt es sich um thermoelektrisch gekühlte Quecksilber-Cadmium-Tellurid-Detektoren (MCT-Detektor). Das Chopperrad ermöglicht die wechselnde Aufnahme des Detektorsignals mit und ohne Lichtquelle in schneller Folge. Dadurch ist eine Korrektur des Signals gegenüber thermischer Hintergrundstrahlung in Echtzeit möglich.

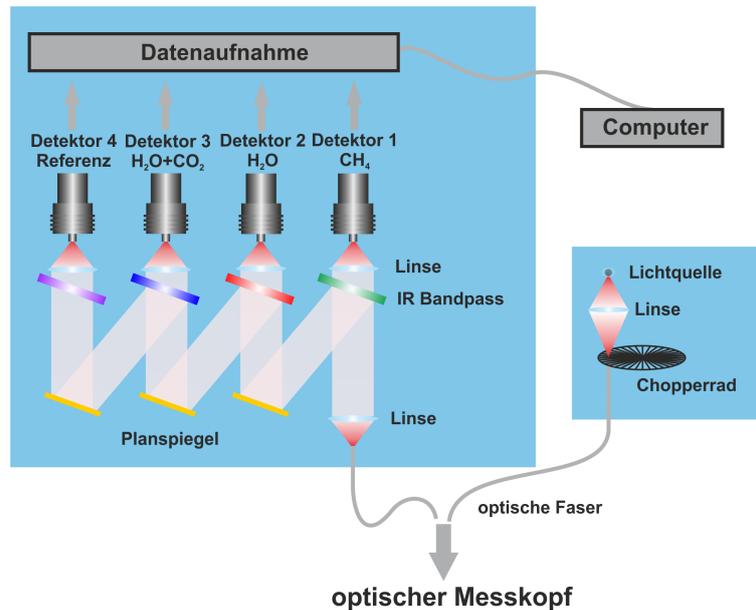


Abbildung 4.2: Schematischer Aufbau des ICOS-Systems mit Lichtquelle und kaskadenförmigem Aufbau der Detektoren. Die Bandpassfilter selektieren den molekulspezifischen Absorptionsbereich und die Detektoren geben ein Spannungssignal abhängig von der einfallenden Lichtmenge aus.

Das ICOS-System besitzt vier Filter mit zugehörigen Detektoren, zusammen Kanäle genannt. Um die Lage der Filter zu veranschaulichen, sind deren Transmissionskurven in Abb. 4.3 mit Beispielspektren aus FTIR-Messungen von CH₄, CO₂ und H₂O gezeigt. Dabei ist zu erkennen, dass sich die Absorptionsbanden von CO₂ und H₂O überlagern. Zur Bestimmung der Abgasrückführungsrate wird daher das Signal im CO₂+H₂O-Filter (Exhaust-Kanal) mit dem Signal des H₂O-Filters, welcher unbeeinflusst von CO₂ ist, korrigiert. Der Referenzfilter dient zur Erkennung von Signaländerungen welche nicht durch eine Absorption hervorgerufen werden. Dies kann aufgrund von Verschmutzungen im Messvolumen durch Öltröpfchen oder Abrieb auftreten. Weiterhin kann es zu dynamischen Einflüssen auf das Signal durch beam steering, sowie Druck- und Temperatureinflüsse auf die Messsonde kommen. Daher umfasst der Referenzfilter einen weitgehend absorptionsfreien Wellenzahlbereich. Da die Absorptionsbande von Methan jedoch breiter ist als die von üblichem Ottokraftstoff, ist ein leichter Einfluss auf den Referenzkanal, insbesondere bei hohen Dichten und hohen Temperaturen, zu erwarten. Ein weiterer Überlapp besteht zwischen den Spektren von H₂O und CH₄. Dieser muss jedoch in der Quantifizierung nicht berücksichtigt werden, da die Banden von H₂O in diesem Bereich im Vergleich zu CH₄ sehr schwach sind. Damit ist der Einfluss auf das gemessene Signal vernachlässigbar. Dies gilt auch unter Berücksichtigung des Strahlengangs im System außerhalb der Messstrecke, welcher Wasser in der Umgebungsluft ausgesetzt ist.

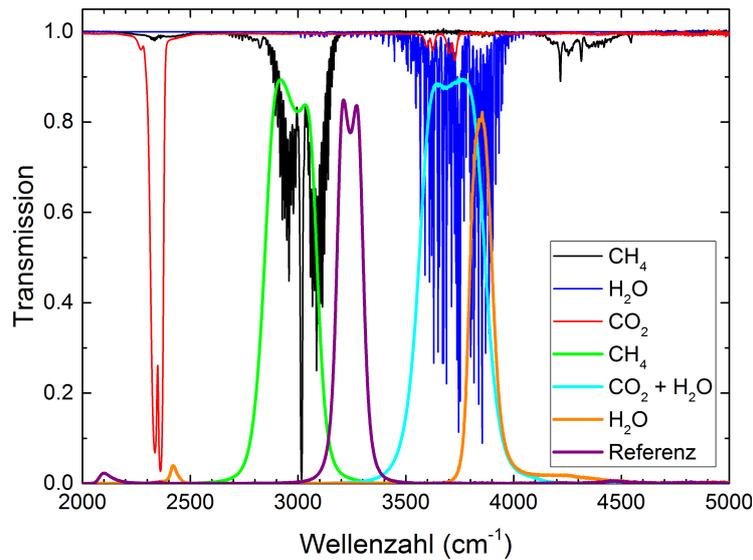


Abbildung 4.3: Lage der Bandpassfilter im ICOS-System relativ zum Absorptionsbereich der zu quantifizierenden Moleküle. Die Spektren wurden per FTIR-Spektrometer vermessen.

Für das ICOS-System sind zwei Arten von Messköpfen vorhanden. Eine modifizierte Zündkerze und eine Saugrohrsonde. Letztere ist für den Einsatz in Erdgasmotoren im Rahmen dieser Arbeit entwickelt worden, da die Einspritzung üblicherweise in das Saugrohr erfolgt, um Verwirbelungen am Einlassventil zur Förderung der Gemischbildung zu nutzen und genug Zeit für diese zu gewährleisten. Der Zündkerzensensor besitzt neben der Zündelektrode einen Metallkäfig, der vom Gasgemisch im Brennraum durchströmt wird und innerhalb dessen die Absorption der IR-Strahlung stattfindet. Die schematische Anordnung sowie das Messvolumen im Zündkerzensensor sind in Abb. 4.4 dargestellt. Innerhalb des Sensorkopfes laufen zwei Saphirfasern parallel und enden an einem 2 mm dünnen, planparallelen Saphirfenster, wobei eine der Fasern das Licht von der Lichtquelle zum Messvolumen leitet. Auf der gegenüberliegenden Seite des Käfigs ist ein Metallspiegel angebracht, welcher das Licht reflektiert, welches dann durch die zweite Faser zum Detektionssystem gelangt. Das eigentliche Messvolumen wird dabei zum einen durch die Länge innerhalb des Käfigs ($L = 0.48$ cm) als auch durch den Strahldurchmesser definiert.

Die Saugrohrsonde wird bündig mit der Innenwand in das Saugrohr eingeschraubt und auf der gegenüberliegenden Seite wird ein Retroreflektor angebracht. Da bei dieser Sonde kein Spiegelkäfig vorhanden ist, stören keine in das Saugrohr hereinragenden Bauteile die Strömung. Der Retroreflektor sorgt für eine je nach Reflektortyp nahezu winkelunabhängige Reflexion des einfallenden IR-Lichtes zurück in Richtung Quelle (siehe Kap. 4.3.4 für Details). Daher kann die Sonde auch bei gekrümmten Oberflächen eingesetzt werden, was unter Verwendung eines einfachen Spiegels nicht realisierbar wäre. Eine Verkippung um weniger als 1° würde bei einem Spiegel dafür sorgen, dass eine Reflexion des Lichtes zur Quelle zurück nicht möglich ist. Daher wäre der Einsatz eines Spiegels mit hohem Justageaufwand und einer starken Anfälligkeit der Reflexion gegenüber Vibrationen des

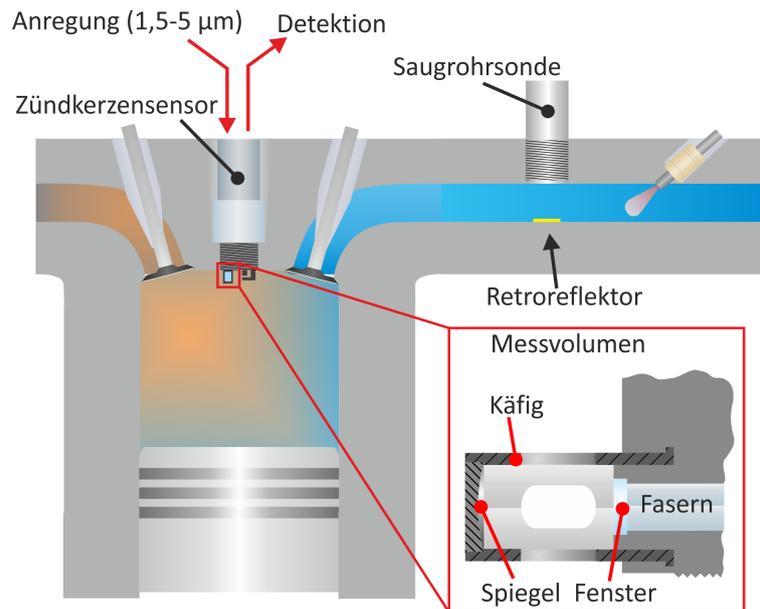


Abbildung 4.4: Messanordnung des ICOS-Systems in Saugrohr und Brennraum eines Verbrennungsmotors sowie Detail des Messvolumens im Zündkerzensensor.

Motors, welche zwangsläufig auftreten, verbunden. Allerdings muss für die Benutzung eines Retroreflektors der Aufbau der Sonde gegenüber dem Zündkerzensensor modifiziert werden. Durch die Retroreflexion ist die Einkopplung des reflektierten Lichts in einen parallel zur Anregungsfaser laufende Detektionsfaser nicht möglich. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit die in Abb. 4.5 gezeigte Saugrohrsonde mit zwei zueinander senkrecht stehenden Faseranschlüssen und einem in 45° -Winkel stehenden 50% CaF_2 -Strahlteiler entwickelt. Die Anregungsfaser wird stirnseitig angeschlossen, wo das Licht durch eine CaF_2 -Linse kollimiert wird und nach Passieren des Strahlteilers und eines 2 mm dünnen Dichtfensters aus Saphir zur Messstelle gelangt. Durch den Retroreflektor gelangt das Licht zurück zum Strahlteiler, wird teilweise reflektiert und über eine zweite CaF_2 -Linse in die Faser zum Detektionssystem eingekoppelt. An den Oberflächen des Saphirfensters kommt es zu Reflexionen, sodass Licht ohne Durchtreten des Messvolumens zum Detektor gelangt. Aufgrund des hohen Brechungsindex von Saphir beträgt der Anteil dieses Signals am Gesamtsignal etwa 10% . Weiterhin kommt es zu einer leichten Reflexion an der Innenwand der Sonde gegenüber dem Faseranschluss für die Detektionsfaser. Diese Effekte können teilweise über eine Messung dieses Streulichtsignals und entsprechende Berücksichtigung in der Auswertung kompensiert werden. Es bleibt jedoch eine gewisse Unsicherheit, da zeitliche Signalschwankungen nicht registriert werden können. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit ein zweiter Prototyp entwickelt, der ein um 5° verkipptes Saphirfenster und eine matte Innenwand besitzt. Damit konnte das Streulichtsignal eliminiert werden.

Der Einsatz des Strahlteilers geht mit einem Verlust von 50% der Signalintensität einher und ein Messaufbau in Durchlichtgeometrie wäre in dieser Hinsicht klar zu bevorzugen. Jedoch wäre dies nur an Versuchsmotoren teilweise realisierbar, ist aber keine Option bei den sehr eingeschränkten Platzverhältnissen eines Serienmotors. Da die Messsonde für den Einsatz an Serienmotoren vorgesehen ist, wurde das Design entsprechend entwickelt. Das Edelstahlrohr ist notwendig, um den Zugang zum Saugrohr vorbei an anderen Motorteilen zu gewährleisten.

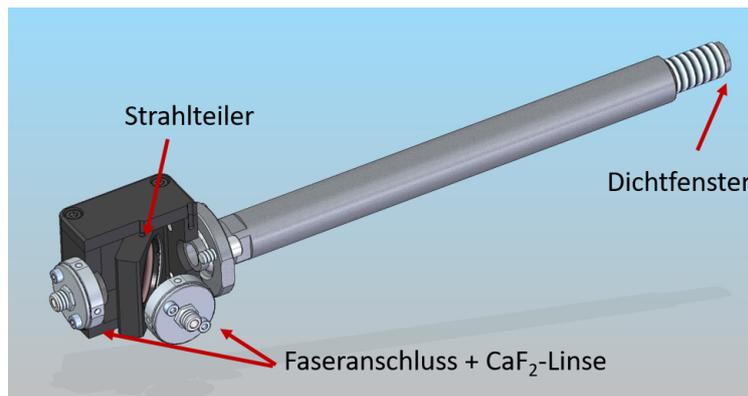


Abbildung 4.5: Schnittzeichnung der Saugrohrsonde mit senkrecht zueinander angeordneten Faseranschlüssen und CaF₂-Linsen zur Kollimation des Lichtstrahls sowie Strahlteiler und Dichtfenster (LaVision GmbH).

4.3.2 Quantifizierungsstrategie

Die Quantifizierung der Methandichte erfolgt anhand des Lambert-Beerschen-Gesetzes, wobei zu beachten ist, dass die Messung der Lichtintensität breitbandig über einen definierten Spektralbereich erfolgt. Daher muss ausgehend von Gl. 2.40, die über die gesamte Absorptionsbande integrierte Transmission betrachtet werden. Für eine genaue Quantifizierung ist es weiterhin notwendig spektrale Einflüsse der optischen Komponenten des Sensorsystems auf die Transmission zu berücksichtigen. Die größten Einflüsse entstehen hierbei durch den verwendeten Filter, die Sensitivität des Detektors, die Transmission der Faser und das Emissionsspektrum der QTH-Lampe. Abb. 4.6 zeigt die Transmissionskurven der diversen optischen Komponenten sowie ein per FTIR-Spektrometer gemessenes Methanspektrum. Aus der Überlagerung der Kurven ergibt sich ein effektives Spektrum, was die auf den Detektor fallende Lichtmenge bestimmt. Die graue Fläche unter dem Spektrum entspricht dabei der effektiven Transmission, welche vom Detektor in ein Spannungssignal übersetzt wird.

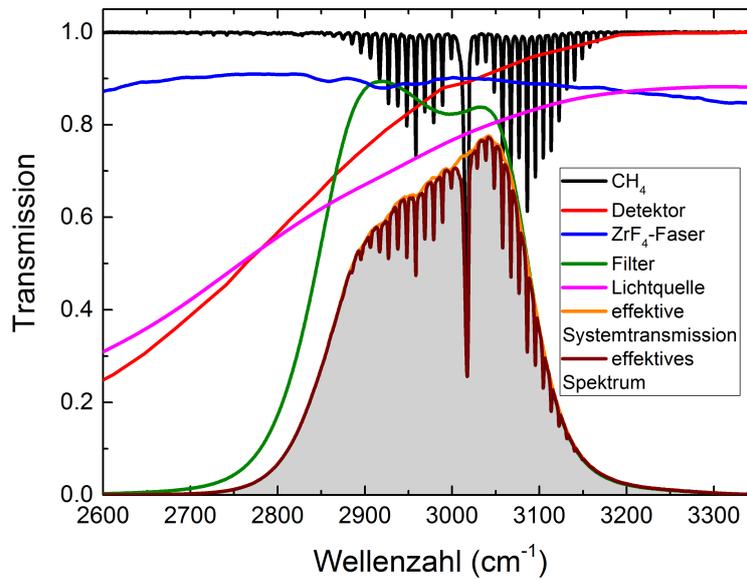


Abbildung 4.6: Spektrale Einflüsse des Sensorsystems und die resultierende, effektive Systemtransmission. Die graue Fläche stellt die effektiv gemessene, breitbandige Transmission dar.

Die breitbandige Transmission τ berechnet sich nach

$$\tau = \frac{\int I(\nu) d\nu}{\int I_0(\nu) d\nu} = \frac{\int \exp(-\sigma(\nu, p, T) \rho(p, T) L) \tau_{sys} d\nu}{\int \tau_{sys} d\nu}, \quad (4.1)$$

wobei die spektrale Abhängigkeit der Eingangsintensität I_0 über die Bestimmung der Systemtransmission τ_{sys} berücksichtigt wird. Die Systemtransmission berechnet sich als Produkt der Transmissionen des Filters τ_{Filter} und der Faser τ_{Faser} , sowie der Sensitivität des Detektors $S_{Detektor}$ und des Emissionsspektrums der Lichtquelle I_{QTH} .

$$\tau_{sys} = \tau_{Filter} \cdot S_{Detektor} \cdot \tau_{Faser} \cdot I_{QTH}. \quad (4.2)$$

Mit Gl. 4.1 wird nun eine Quantifizierung der Methandichte anhand des vom Detektorsystem ausgegebenen Spannungssignals möglich. Die Eingangsintensität I_0 wird über eine Messung unter Abwesenheit von Methan bestimmt, sodass die breitbandige Transmission τ berechnet werden kann. Die Quantifizierung der Methandichte erfolgt über die Berechnung einer Look-up-Tabelle in der berechnete Transmissionen in Abhängigkeit von Druck, Temperatur und Dichte eingetragen sind. Die dafür erforderlichen Absorptionsquerschnitte von Methan entstammen der HITRAN-Datenbank, welche Position und Stärke von Absorptionslinien diverser Moleküle sowie Druck- und Temperaturkoeffizienten für die Linienverbreiterung enthält [50]. Die Absorptionsquerschnitte werden für Temperaturen von 250 K - 1000 K in Schritten von 5 K sowie Drücke von 0,2 bar - 40 bar in 0,2 bar Schritten aus der Datenbank erzeugt. Die Auflösung beträgt dabei $0,01 \text{ cm}^{-1}$ im Druckbereich bis 3 bar und $0,1 \text{ cm}^{-1}$ ab 3 bar für den Wellenzahlbereich von 2500 cm^{-1} - 3500 cm^{-1} . Die Transmissionskurven der Bandpassfilter und der Faser wurden

mittels FTIR-Spektrometer (Bruker Vector 33 und Bruker Vertex 70, siehe Kap. 4.1) vermessen wohingegen die Emission der Lichtquelle über einen Optical Spectrum Analyzer (OSA205, siehe Kap. 4.2) von Thorlabs bestimmt wurde. Die Kurven zur Empfindlichkeit der Detektoren wurden auf Nachfrage vom Hersteller Vigo System S.A. zur Verfügung gestellt.

Über eine Interpolation der Look-up-Tabelle kann für beliebige Eingabeparameter von Druck, Temperatur und Transmission die Methandichte ρ_{CH_4} bestimmt werden. Die Interpolation erfolgt dabei über die *scattered interpolant* Funktion, welche in MATLAB von MathWorks eingebaut ist und auf einer trilinearen Interpolation und einer Triangulation beruht. Zur Berechnung der Konzentration oder des λ -Wertes muss allerdings auch die Gesamtgasdichte bestimmt werden, um die Menge an Frischluft bestimmen zu können (siehe Gl. 2.11). Mittels Druck und Temperatur kann über das ideale Gasgesetz die Gesamtgasdichte ρ_{ges} berechnet werden. Die Dichte der Frischluft entspricht dann der Gesamtgasdichte abzüglich der Methandichte und der λ -Wert berechnet sich zu:

$$\lambda = \frac{\rho_{ges} - \rho_{CH_4}}{9,52 \cdot \rho_{CH_4}}. \quad (4.3)$$

Diese Berechnung berücksichtigt nicht evtl. vorhandenes Restgas aus CO₂ und H₂O, welches durch die Verbrennung im Motor entsteht. Das ICOS-System kann den Restgasanteil prinzipiell bestimmen. Jedoch beruht die Quantifizierung hierbei auf einem empirischen Ansatz, sodass dem Verfahren Grenzen gesetzt sind. Ist der Restgasanteil x bekannt so reduziert dieser den Frischluftanteil an der Gesamtgasdichte um den Faktor $(1 - x)$, sodass für den λ -Wert gilt:

$$\lambda = \frac{\rho_{ges} \cdot (1 - x) - \rho_{CH_4}}{9,52 \cdot \rho_{CH_4}}. \quad (4.4)$$

4.3.3 2-Filter-Methode

Die Kenntnis der Temperatur ist für die Quantifizierung der Methandichte ein entscheidender Faktor. Für den Brennraum kann die globale Temperatur modelliert werden (siehe Gl. 2.6), jedoch werden dabei einige Effekte nicht berücksichtigt. Nach der Verbrennung verbleibt heißes Restgas im Zylinder, sodass die Temperatur vor Beginn der Kompression deutlich über der Temperatur der Frischluft liegt. Weiterhin beeinflusst der Metallkäfig des Zündkerzensensors die lokale Temperatur, da dieser mit der Zeit heiß wird und dadurch das umliegende Gas erhitzt. Es kann ebenfalls zu einer Abkühlung des Gases durch den Spiegel kommen, da sich dieser langsamer erhitzt als das Gas im Brennraum (siehe Kap. 7.1 und Kap. 8.1). Diese Effekte sind nicht nur für die Bestimmung der Methandichte wichtig, sondern beeinflussen in verstärktem Maße die Berechnung der Gesamtgasdichte. Diese ist letztendlich nötig, um den Stoffmengenanteil von Methan und den λ -Wert des Gasgemisches zu berechnen (siehe Gl. 4.3).

Zur Lösung dieser Problematik wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Methode entwickelt, welche eine gleichzeitige Messung von Methan-Dichte und lokaler Gastemperatur im Messvolumen unter Verwendung von 2 Messkanälen für Methan ermöglicht. Hierfür werden zwei Bandpassfilter verwendet, welche unterschiedliche Frequenzbereiche im Methan-

spektrum umfassen, sodass sich bei Änderung der Temperatur, ein unterschiedliches Signalverhalten der beiden Filter ergibt. Dieser Effekt basiert auf der Umbesetzung der Rotationzustände bei Änderung der Temperatur und der daraus resultierenden Intensitätsänderung der Linien im Methanspektrum. Zur Bestimmung von Temperatur und Dichte wird ausgehend von der nach polytroper Verdichtung berechneten Temperatur in einem breiten Intervall (typisch $dT = 200$ K) die zugehörige Methandichte mit Hilfe der Look-up-Tabelle für jeden Filter ermittelt. Aus diesen Daten ergeben sich zwei Kurven für die Dichte in Abhängigkeit der Temperatur für den gemessenen Druck und die jeweilige Transmission beider Einzelfilter, wie in Abb. 4.7 gezeigt. Der Schnittpunkt beider Kurven ergibt die lokale Gastemperatur und die Methandichte.

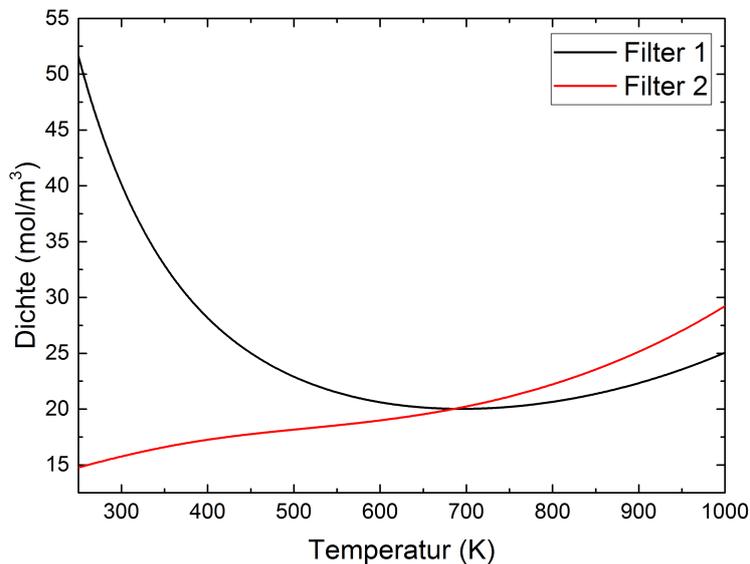


Abbildung 4.7: Beispiel einer Korrelationskurve zweier Filtersignale zur Bestimmung von Temperatur und Methandichte. Der Schnittpunkt stellt den finalen Messwert dar.

Aufbauend auf einer vorherigen Arbeit [51], in der die Funktionsweise der 2-Filter-Methode gezeigt wurde, wurden im Rahmen dieser Arbeit weitere Filterkombinationen untersucht und das Messprinzip umfassend validiert. Die Transmissionskurven sämtlicher, untersuchter Filter sind in Abb. 4.8 zusammen mit einem Methanspektrum dargestellt, wobei die getesteten Kombinationen in Tab. 4.1 beschrieben sind. Die Bezeichnung der Filter entspricht der zentralen Wellenlänge in nm bei einem Einfallswinkel von 0° . Die Filterkombinationen 3485-3420 und 3552-3420 wurden schon vorher untersucht (siehe [51]) und hier zu Vergleichszwecken erneut vermessen, da der Versuchsaufbau optimiert wurde. Der Filter mit der Bezeichnung 3420 entspricht dem Bandpassfilter, der auch im 1-Filter-System verwendet wird und in Abb. 4.3 gezeigt ist.

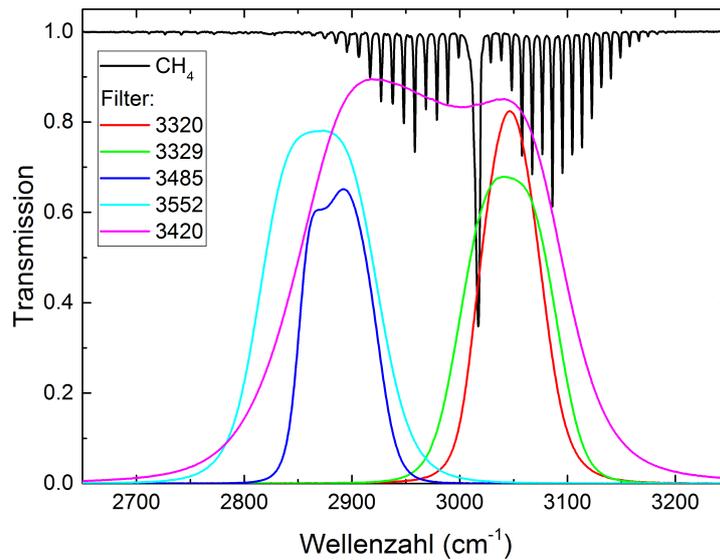


Abbildung 4.8: Übersicht der verwendeten Filter, getestet wurden die Kombinationen: 3320-3485, 3320-3552, 3329-3552, 3485-3420 und 3552-3420.

Tabelle 4.1: Verwendete Filterkombinationen in der 2-Filter-Methode.

Filterkombination	Filter 1		Filter 2	
	Zentralwellenlänge	Breite	Zentralwellenlänge	Breite
3320-3485	3320 nm	70 nm	3485 nm	90 nm
3320-3552	3320 nm	70 nm	3552 nm	140 nm
3329-3552	3329 nm	100 nm	3552 nm	140 nm
3485-3420	3485 nm	90 nm	3420 nm	300 nm
3552-3420	3552 nm	140 nm	3420 nm	300 nm

4.3.4 Retroreflektoren

Für den Einsatz einer Saugrohrsonde im Motor muss zur Reflektion des Lichtes ein Retroreflektor verwendet werden, da ein Spiegel eine zu stark winkelabhängige Reflexion aufweist und hereinragende Bauteile wie der Spiegelkäfig der Zündkerzensonde die Strömung im Saugrohr stören würden. Retroreflektoren unterscheiden sich grundsätzlich darin von üblichen Spiegeln, dass diese eine vom Einfallswinkel nahezu unabhängige Reflexion des Lichtes zurück zur Quelle gewährleisten. Typische Anwendungsfelder im Alltag sind daher z.B. Straßenschilder und -markierungen, Lichtschranken sowie Reflektoren an Fahrrädern. Dabei sind zwei Geometrien von Reflektoren zu unterscheiden: Tripelspiegel und Lüneburg-Linsen (siehe Abb. 4.9). Ein Tripelspiegel ist eine Anordnung von drei zueinander senkrecht stehenden, spiegelnden Flächen. Eine Lüneburg-Linse besteht aus einem kugelförmigen, transparenten Material, welches das Licht auf die mit reflektierendem Material beschichtete Rückseite fokussiert. Hierbei ist zu beachten, dass die Reflexion an

einem Tripelspiegel in einem leichten Strahlversatz resultiert und die Reflexion an einer Lüneburg-Linse im Regelfall eine geringere Winkelabhängigkeit zeigt.

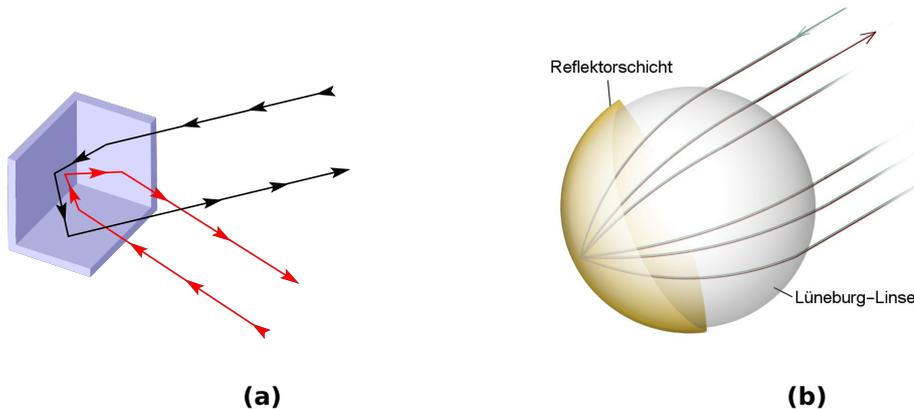


Abbildung 4.9: Geometrie und Strahlengang an Retroreflektoren: (a) Tripelspiegel (b) Lüneburglinse [52].

Im Rahmen dieser Arbeit wurden mehrere Reflektoren beider Varianten untersucht. Die Qualitätskriterien zur Beurteilung der Reflektoren waren hierbei die Stärke der Reflexion sowie dessen Winkelabhängigkeit, auftretende Absorption des Lichtes durch das Reflektormaterial sowie die Baugröße des Reflektors. Letzteres ist für den Einsatz im Saugrohr insofern wichtig, da die Strömung innerhalb des Rohres und damit das Brennverfahren nicht beeinflusst werden dürfen. Daher wäre der Einsatz einer dünnen Folie gegenüber einem mehrere Millimeter dicken Reflektor zu präferieren. Jedoch hat sich bei der Untersuchung diverser Folien gezeigt, dass der Großteil nicht für den Bereich des mittleren Infrarot geeignet sind (3M Diamond Grade 983, 3M Diamond Grade Cube 3000X, 3M Engineer Grade 3210, 3M Engineer Grade 3211, 3M Engineer Grade 3290i, 3M 8850, 3M 3929, 3M IWM 13057 AP, 3M IWM 13058 AP, Di-Soric, IMOS Chess, IMOS IRF6000, Maclite 5729). Die Strukturen auf den Folien bestehen aus Kunststoff, welches das Licht im für die hier verwendete Messtechnik relevanten Spektralbereich zum größten Teil absorbiert. Nur zwei der 17 getesteten Folien zeigen eine über den Messbereich von $2,5\ \mu\text{m}$ bis $5\ \mu\text{m}$ nahezu gleichbleibende Reflexion: 3M High Gain 7610 und 3M 7800P. Letztere hat allerdings eine um einen Faktor von ≈ 4 geringere Reflexionsstärke und wird damit nicht weiter in Betracht gezogen. Weiterhin wurden zwei Reflektoren der Firma IMOS getestet: V116 und V120, welche beide goldbeschichtet sind, sodass keine Absorption von IR-Licht im Messbereich erfolgt. Dabei hat der Reflektor V116 eine Höhe von etwa 4 mm während der V120 mit 2 mm Höhe deutlich flacher ist. Dadurch wird letzterer für den Einsatz im Motor brauchbar.

Zur Bestimmung der Reflektivität und der Winkelstabilität wurde der optische Aufbau der Saugrohrsonde mit zwei senkrecht zueinander stehenden Linsen und 50% Strahlteiler (siehe Abb. 4.4) im Labor nachgebaut. Der jeweilige Reflektor wurde dabei auf einen drehbaren Halter mit Winkelskala aufgeklebt und schrittweise verkippt, während mit dem ICOS-System das Signal im CH_4 -Kanal gemessen wurde. In Abb. 4.10 ist das gemessene

und in Abb. 4.11 das relative (auf Maximum normiert) Spannungssignal gegen den Verkipfungswinkel aufgetragen. Es ist erkennbar, dass der Reflektor IMOS V120 die mit Abstand stärkste Reflexion aufweist. Diese ist im Maximum um einen Faktor 2,5 bzw. 16 größer als vom Reflektor V116 und der Folie 7610. Das Signal von letzterer liegt zudem unterhalb des Mindestsignals von 0,5 V, welches von der LaVision GmbH vorgegeben wurde. Anhand des relativen Signalverlaufs ist allerdings zu erkennen, dass die Folie gegenüber den Reflektoren eine geringere Winkelabhängigkeit der Reflexion aufweist. Zusammen mit einer einfacheren Applizierbarkeit ist aufgrund der zu erwartenden, gekrümmten Geometrie am Messort im Saugrohr daher die Verwendung der Folie vorzuziehen. Dafür müsste eine stärkere Lichtquelle eingesetzt werden, welche die geringe Reflexion ausgleicht.

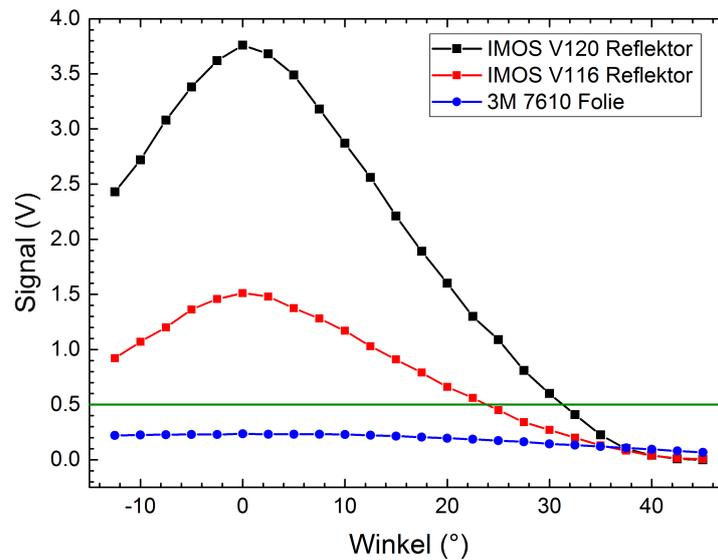


Abbildung 4.10: Absolute Signalhöhe der getesteten Retroreflektoren in Abhängigkeit vom Verkipfungswinkel und erforderliches Mindestsignal (grüne Linie). Ein Winkel von 0° bedeutet senkrechter Einfall.

4.3.5 Lichtquellen

Standardmäßig ist im ICOS-System eine 150 W QTH-Lampe verbaut. Diese besitzt einen Kolben aus Quarzglas, welches ab etwa $3 \mu\text{m}$ Licht stark absorbiert [53]. Das heißt der Großteil des Lichtes, welches die Lampe bei höheren Wellenlängen emittiert, entstammt der heißen Kolbenoberfläche. Diese ist kälter als die eigentliche Glühwendel, woraus ein entsprechender Verlust an emittierter Intensität resultiert. Aus diesem Grund wurden weitere Lichtquellen auf ihre Emission getestet. Dabei wurde darauf geachtet, dass es sich um dedizierte Infrarotlichtquellen handelt und/oder ein Austrittsfenster aus Saphir verbaut ist. Dieses absorbiert die Strahlung erst ab einer Wellenlänge von etwa $4 \mu\text{m}$ [54]. Zum Testen der Lichtquellen wurde im Labor ein Aufbau realisiert, welcher dem Lampengehäuse des ICOS-Systems nachempfunden ist. Das Licht der jeweiligen Lampe wird über

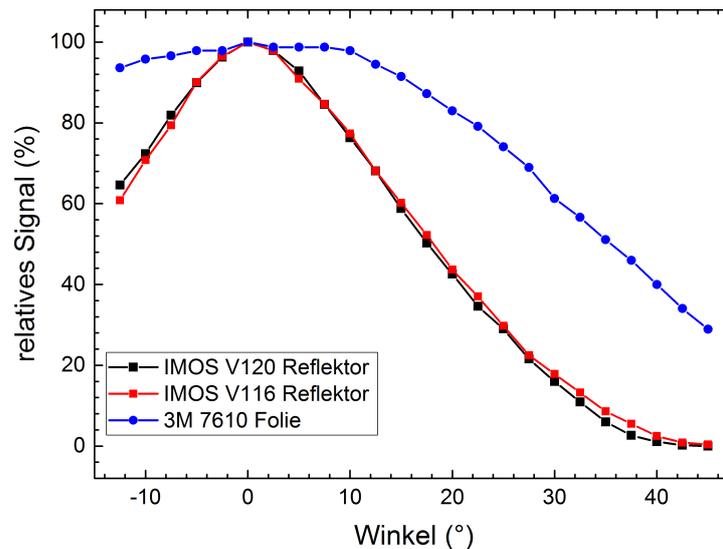


Abbildung 4.11: Relative Signalthöhe der getesteten Retroreflektoren in Abhängigkeit vom Verkippungswinkel zur Veranschaulichung der Winkelabhängigkeit der Reflexion. Ein Winkel von 0° bedeutet senkrechter Einfall.

eine CaF_2 -Linse durch ein Chopperrad in eine ZrF_4 -Faser eingekoppelt. Am Austritt der Faser wird das Licht mit einer weiteren CaF_2 -Linse auf einen MCT-Detektor abgebildet, welcher über ein Oszilloskop ausgelesen wird, um die Signalthöhe zu bestimmen. Um die Strahlungsleistung der Lichtquellen im relevanten Spektralbereich beurteilen zu können, wurden vor dem Detektor zwei unterschiedliche Filter platziert. Ein breitbandiger Filter bei $3,4 \mu\text{m}$ entsprechend des Filters für den CH_4 -Kanal (siehe Abb. 4.3) und ein schmalbandiger Filter, welcher die CO_2 -Bande bei $4,3 \mu\text{m}$ umfasst.

Getestet wurden im Vergleich mit der QTH-Lampe der IR-Emitter EP-4317 von Helioworks und die Xenonlampe UXR-300BU von Ushio. In Abb. 4.12 sind die gemessenen Signalthöhen unter Benutzung der unterschiedlichen Filter gegen die Leistung der jeweiligen Lampe aufgetragen. Dabei wurde die Leistung der UXR-300BU über einen weiten Bereich variiert, während die anderen Lichtquellen bei ihrer jeweiligen Maximalleistung betrieben wurden. Die UXR-300BU erzeugt das stärkste Signal mit einem um den Faktor 6 (bei $3,4 \mu\text{m}$) und 13 (bei $4,3 \mu\text{m}$) höheren Signal gegenüber der QTH-Lampe. Die Ursache dafür ist die höhere Leistung zum einen, zum anderen aber auch das Saphir-Fenster, welches zu längeren Wellenlängen transparent ist, als der Quarzkolben der QTH-Lampe. Der Emitter EP-4317 verfügt ebenfalls über ein Saphirfenster und obwohl die Leistung um einen Faktor 15 kleiner ist gegenüber der QTH-Lampe, ist das Signal nur um einen Faktor 2,6 (bei $3,4 \mu\text{m}$) bzw. 1,3 (bei $4,3 \mu\text{m}$) kleiner. Dies liegt zum einen daran, dass die leuchtende Fläche bei der QTH-Lampe größer ist, als beim EP-4317. Dadurch wird die größere Leistung auch über einen größeren Bereich verteilt. Zum anderen verdeutlicht das Ergebnis die Verluste der QTH-lampe aufgrund des Quarzkolbens.

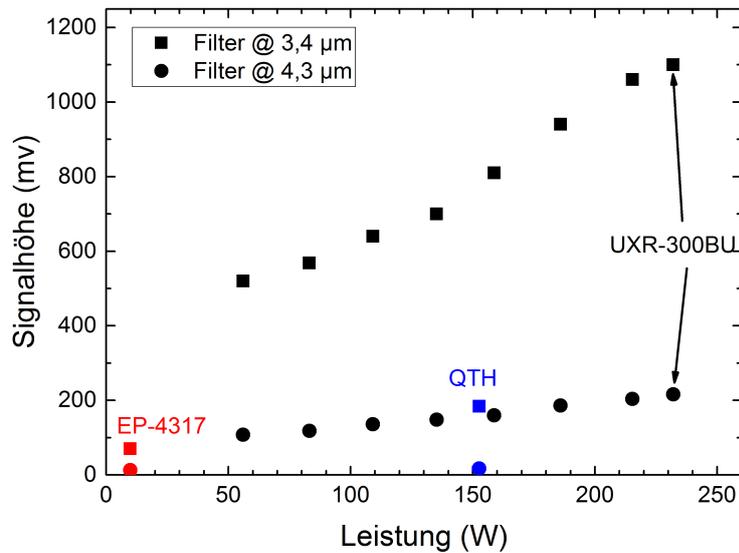


Abbildung 4.12: Gemessene Signalhöhen der unterschiedlichen Lichtquellen unter Verwendung der Filter bei $3,4\mu\text{m}$ (Vierecke) und $4,3\mu\text{m}$ (Kreise).

Aufgrund der obigen Ergebnisse wurde ein Prototyp eines Lampengehäuses mit der Ushio UXR-300BU als Lichtquelle von der LaVision GmbH gebaut. Bei den ersten Tests mit dem ICOS-System zeigte sich, dass durch das im Vergleich zum Laboraufbau optimierte optische Setup eine weitere Signalsteigerung (etwa ein Faktor 10 bei $3,4\mu\text{m}$) erreicht werden konnte. Jedoch zeigen die Signale im zeitlichen Verlauf stark ausgeprägte Modulationen. Bei einem Signal von $\approx 2,4\text{ V}$ im CH_4 -Kanal beträgt die Differenz zwischen maximaler und minimaler Spannung $\approx 0,3\text{ V}$ bei Einsatz der Xenonlampe in Verbindung mit dem Zündkerzensensor. Bei Benutzung der QTH-Lampe tritt hingegen nur ein Rauschen in der Höhe von $\approx 10\text{ mV}$ bei der gleichen Signalhöhe auf, welches auf das Rauschen des Detektors zurückzuführen ist. Die konkrete Ursache für die starken Signalschwankungen konnte, auch im Kontakt mit dem Hersteller, bisher nicht geklärt werden. Die Vermutung ist, dass es sich um thermische Dichteschwankungen in der Gasentladung handelt. Damit sind die beobachteten Signalschwankungen kein Detektorrauschen. Vielmehr handelt es sich um eine durch die Eigenschaften der Xenonlampe hervorgerufene Modulation des Signals. Es ist noch nicht abschließend gelungen eine softwareseitige Korrektur der Signale zu entwickeln. Daher kann die neue Lichtquelle in Messungen noch nicht angewendet werden und es muss weiter auf das Standardmodell zurückgegriffen werden.

4.4 Druckzellenmessungen

Bei den in dieser Arbeit verwendeten Druckzellen handelt es sich um Metallzylinder mit Hohlraum, welche über einen Anschluss mit einem Probegas befüllt sowie evakuiert werden können. Weiterhin befinden sich an den Druckzellen Zugänge zur Anbringung der in dieser Arbeit verwendeten Messtechnik, sodass Gase unter motornahen Bedingungen (erhöhte Drücke und Temperaturen) vermessen werden können.

Zur Untersuchung des Absorptionsverhaltens von Methan wurde eine Druckzelle mit MgF_2 -Fenstern an den Stirnseiten verwendet. Diese wurde in den Probenraum eines Bruker Vector 33 FTIR-Spektrometers (siehe Kap. 4.1) eingebaut und mit einem Gasmischbehälter sowie einer Vakuumpumpe verbunden, wie in Abb. 4.13 schematisch dargestellt. Die komplette Apparatur aus Mischbehälter und Druckzelle ist beheizbar und die aktuelle Temperatur in Druckzelle und Mischbehälter wird jeweils über ein Typ K Thermoelement erfasst. Über mehrere Ventile ist eine Abtrennung von Mischbehälter, Druckzelle, Gaszufuhr und Vakuumpumpe möglich. Eine Messung des Drucks erfolgt über Hochtemperatur-Drucktransmitter der Keller AG. An der Druckzelle befindet sich ein Drucktransmitter des Typs PAA 25 HTC mit einem Messbereich von 0-50 bar und einer Genauigkeit von 0,25 bar. Im Mischbehälter befinden sich ein PAA 35 X HTC (0-1 bar, Genauigkeit 0,005 bar) zur genauen Einstellung des Partialdrucks von CH_4 sowie ein PA 35 X HTC (0-50 bar, Genauigkeit 0,5 bar) zur Einstellung des Gesamtdrucks mittels Zugabe von N_2 . Sämtliche Genauigkeiten sind Herstellerangaben und Datenblätter sind online einsehbar [55]. Der Mischbehälter dient der Herstellung von Mischungen aus einem oder mehreren zu untersuchenden Gasen mit Stickstoff, wobei letzterer infrarot-inaktiv ist und nur zur Verdünnung und Druckerhöhung dient. Zusätzlich können über ein Septum Flüssigkeiten in den Mischbehälter eingespritzt und verdampft werden. Der Mischbehälter verfügt außerdem über einen magnetischen Rührer, um eine homogene Durchmischung der Gasbestandteile zu garantieren.

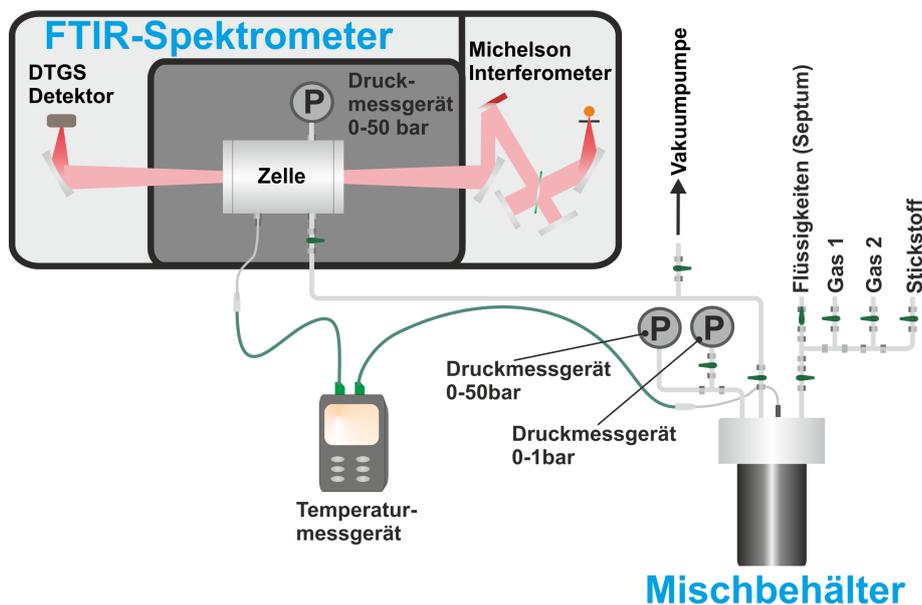


Abbildung 4.13: FTIR-Messungen mit Druckzelle, Mischbehälter, Vakuumpumpe sowie Druck- und Temperaturmessgeräten [19].

Bevor eine Mischung im Mischbehälter angesetzt wird, wird die gesamte Apparatur evakuiert und mehrmals mit Stickstoff gespült. Zum Ansetzen der Mischung wird diese nach dem Befüllen mit den einzelnen Bestandteilen für 30 min gerührt, um eine Homogenisierung sicherzustellen. Währenddessen wird die Zelle weiter evakuiert, sodass

vor Beginn der eigentlichen Messungen eine Hintergrundmessung durchgeführt werden kann. Anschließend wird für die Messungen mit dem FTIR-Spektrometer der Druck in der Zelle schrittweise erhöht. Mit jeder Mischung kann die Druckzelle dreimal befüllt werden wobei jede Mischung zweimal angesetzt wird, um die Reproduzierbarkeit der Messungen sicherzustellen. Mit dem FTIR-Spektrometer wird die Transmission im Bereich $2000-7000\text{ cm}^{-1}$ bei einer Auflösung von $0,6\text{ cm}^{-1}$ gemessen. Dies entspricht mehr als dem kompletten Messbereich, den das ICOS-System über die unterschiedlichen Filter abdeckt etwa $2500-4500\text{ cm}^{-1}$. So können evtl. auftretende Überlagerungen in der Absorption mehrerer Moleküle ausgemacht werden.

Für die Kalibrationsmessungen (siehe Kap. 5.2) sowie die Untersuchung der 2-Filter-Detektion (siehe Kap. 5.3) mit dem ICOS-System werden zwei weitere Druckzellen verwendet, welche sich in Aufbau und Eigenschaften jedoch stark ähneln. Beide Zellen besitzen Gewindebohrungen, um einen Zündkerzensensor des ICOS-Systems aufzunehmen, wobei eine Zelle mit und eine ohne MgF_2 -Fenster ausgestattet ist. Letztere ermöglicht damit gleichzeitige Messungen mit FTIR-Spektrometer und ICOS-System. Sämtliche Zellen sind für Drücke bis maximal 40 bar und Temperaturen von höchstens 400 °C ausgelegt, wobei das praktische Limit aufgrund der thermischen Belastung der umgebenden Bauteile und des Zündkerzensensors je nach Variante bei $200 - 300\text{ °C}$ liegt. Weiterhin werden für die Kalibrationsmessungen vorgemischte Gase aus Flaschen anstelle des Mischbehälters benutzt. Dies garantiert gleichbleibende Bedingungen und eine exakte Kenntnis der Mischung in der Druckzelle. Verwendet werden Mischungen aus CH_4 5.5 und N_2 6.0 mit Anteilen von $\approx 2,5\%$, $\approx 9,5\%$ und $\approx 30\%$ CH_4 . Dies entspricht λ -Werten von 4, 1 und 0,25 und deckt den für das System angedachten Messbereich ab. Die Durchführung der Kalibrationsmessungen verläuft analog zur obigen Beschreibung. Bei evakuierter Druckzelle wird das Hintergrundsignal aufgenommen und anschließend wird die Zelle schrittweise befüllt, was mindestens dreimal wiederholt wird. Das ICOS-System simuliert für die Messungen eine Motordrehzahl von 1000 U/min . An jedem Messpunkt werden 100 Zyklen mit einer Auflösung von 1 °KW aufgenommen und anschließend gemittelt.

4.5 Strömungskanal

Der Strömungskanal dient zur Nachbildung der Bedingungen im Saugrohr und zum Testen des optischen Aufbaus der Saugrohrsonde. Über einen großen Lüfter am Ende des Kanals wird Luft aus dem Labor durch einen Filter in den Kanal gesogen. Dabei wird der Luftstrom durch eine Luftpumpe gemessen. Am Kanalende, vor dem Lüfter, befindet sich eine Drosselklappe, durch die sich der Durchfluss stufenlos bis minimal 50% verringern lässt. Des Weiteren lassen sich am Anschluss der Drosselklappe an den Kanal Plättchen mit vermindertem Querschnitt einsetzen, um den Luftstrom weiter zu drosseln. So lassen sich Durchflussraten im Bereich von etwa $0,6\text{ l/s}$ bis 13 l/s realisieren. Der Kanal verfügt über mehrere optische Zugänge mittels Quartz-Fenstern und es kann Gas kontinuierlich über ein Mischmodul zugeführt oder über einen handelsüblichen Gasinjektor eines Verbrennungsmotors eingedüst werden, wie in Abb. 4.14 gezeigt. Die Eindüsung erfolgt in diesem Fall direkt an der Messposition. Die Gaszufuhr per MFC erfolgt vor dem Mischmodul und dient der Herstellung homogener Gemische aus Luft und Methan, während die Gaszufuhr per Injektor den Einspritzvorgang im Saugrohr nachbildet.

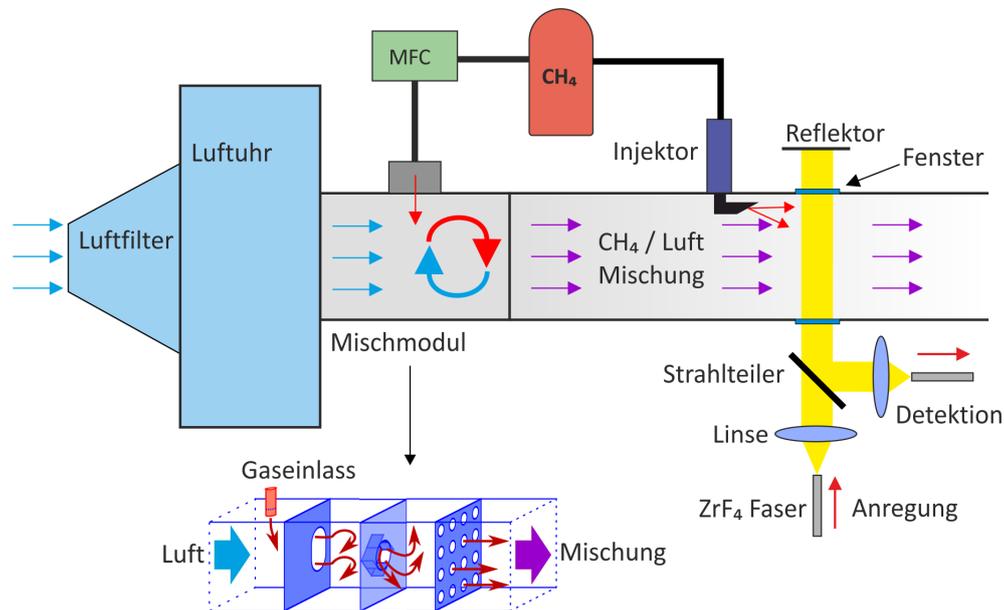


Abbildung 4.14: Schematischer Aufbau des Strömungskanals mit Detail zum Mischmodul. Methan wird entweder über den MFC für eine homogene Mischung oder den Injektor zur Nachbildung einer Einspritzung zugeführt.

Die Zufuhr des Gases wird dabei über einen Massenflussregler (MFC) eingestellt, welcher an das Mischmodul angeschlossen ist. Es werden zwei MFCs der Firma Aalborg verwendet, mit einem Durchflussbereich von 0-10 l/min für N_2 (Umrechnung auf CH_4 mittels Faktor 0,72) und 0-60 l/min für CH_4 . Beide basieren auf einem kalorimetrischen Messprinzip und liefern eine Genauigkeit von $\pm 1\%$ der maximalen Durchflussrate (laut Datenblatt des Herstellers). Das Mischmodul besteht aus drei Teilen, welche durch strömungsformende Platten voneinander getrennt sind (siehe Abb. 4.14 unten). Das Gas wird mittig vor der ersten Platte eingedüst. Diese hat eine ovale Öffnung an der Seite, um eine Rotation in der Strömung senkrecht zur Flussrichtung zu erzeugen. Die zweite Platte hat eine runde Öffnung in der Mitte welche mit kleinen Platten tangential zu dieser verengt wird. Dies dient der Erzeugung eines Wirbels um die Strömungsrichtung, um die Vermischung des Gases mit der Luft weiter zu fördern. Die dritte Platte besitzt eine Reihe regulär angeordneter Löcher, um die Strömung wieder auszurichten. Nach dem Mischmodul folgt eine gerade Strecke von 50 cm Länge bis zur Messposition, was einer weiteren Beruhigung der Strömung dient. Es werden immer abwechselnd Messungen mit und ohne Zuführung von Methan durchgeführt, sodass das Hintergrundsignal bestimmt und eine breitbandige Transmission berechnet werden kann. Nach dem Zu- und Abschalten der Methanzufuhr wird etwa 2 min bis zur Messung gewartet. Zum einen braucht der MFC etwas Zeit auf den eingestellten Wert zu regeln, zum anderen wird so sichergestellt, dass ein homogenes Gemisch vorhanden ist, sowie das gesamte restliche Methan aus dem Kanal entfernt wurde.

Der optische Aufbau in Abb. 4.14 entspricht der Geometrie der Saugrohrsonde in Abb. 4.4. Der Unterschied am Strömungskanal besteht darin, dass der Aufbau offen ist und der Reflektor nicht in den Kanal eingeklebt ist. Dabei wird der optische Aufbau so dicht wie möglich an die Kanalfenster herangesetzt, um Quereinflüsse durch die Absorption von Wasser in der Umgebungsluft vernachlässigbar zu halten. Der Kanalquerschnitt beträgt $28 \times 38 \text{ mm}^2$, wobei entlang der kurzen Seite gemessen wird. Daher beträgt die gesamte Absorptionsstrecke mit diesem optischen Aufbau 56 mm. Für die Messung simuliert das ICOS-System eine Motordrehzahl von 1000 U/min bei einer Auflösung von $1 \text{ }^\circ\text{KW}$. Es werden immer 50 aufeinanderfolgende Zyklen aufgenommen. Im Gegensatz zu den Messungen mit MFCs werden bei Verwendung des Injektors die ersten 10 Zyklen ohne Eindüsung aufgenommen, um daraus das Hintergrundsignal bestimmen zu können.

4.6 ICOS-Temperature-System

Das ICOS-Temperature-System ermöglicht die zeitaufgelöste Messung von Temperaturen im Brennraum von Verbrennungsmotoren. Damit ist eine Analyse der Temperaturverläufe während einzelner Motorzyklen möglich, wofür konventionelle Thermolemente deutlich zu langsam sind. Zur Bestimmung der Temperatur wird die Absorptionsbande von Wasser bei einer Wellenlänge von $1,36 \text{ }\mu\text{m}$ genutzt. Laut LaVision GmbH liegt die maximale Aufnahmezeit bei 23 kHz und die Genauigkeit ist kleiner 20 K bei einer Wasserkonzentration von 3% im Temperaturbereich von 273-900 K. Wie für das ICOS-System ist auch hier ein Zündkerzensensor vorhanden. Des Weiteren ist ein Aufbau in Durchlicht möglich.

Das System nutzt einen Infrarotlaser mit breitbandiger Emission um 1310 nm, dessen Licht über eine Singlemode-Faser zu einem Kollimator gelangt. Von dort gelangt das Licht zum Messvolumen, wird über einen Goldspiegel wieder in die gleiche Faser eingekoppelt und erreicht das Detektionssystem. Das Licht wird über einen IR-Spektrographen auf eine Linienkamera mit InGaAs-Detektor abgebildet, sodass ein breites Spektrum des vorhandenen Wassers aufgenommen wird. Gleichzeitig wird ein Teil des Laserlichtes direkt auf den Spektrographen abgebildet und stellt die Hintergrundmessung dar. Während der Messung wird der gesamte spektrale Apparat mit N_2 gespült, um eine Beeinflussung durch Luftfeuchtigkeit zu verhindern. Vor der Messung muss ein Dunkelbild aufgenommen werden, um das Hintergrundrauschen des Kamerasensors bestimmen zu können. Weiterhin muss eine Referenzmessung an einem absorptionsfreien Messvolumen durchgeführt werden. Dies wird über eine Spülung des Messvolumens mit N_2 realisiert. Während der Messung wird außerdem das Drucksignal vom Drucksensor des Motors aufgenommen. Nach der Messung wird unter Einbeziehung von Dunkelbild, Referenzmessung, Druck und Hintergrundmessung über Gl. 2.40 das Absorptionsspektrum berechnet. Dieses wird mit Spektren aus der HITRAN-Datenbank [50] verglichen, sodass über eine Betrachtung der Korrelation zwischen den Spektren und eine Interpolation die Temperatur bestimmt werden kann.

Das ICOS-Temperature System wird in dieser Arbeit zur Temperaturmessung an Versuchsmotoren genutzt. Mit diesen Messungen kann das Temperaturmodell einer polytropen Verdichtung (siehe Gl. 2.6) überprüft und dessen Parameter angepasst werden. Weiterhin kann die Bestimmung der Temperatur mittels der 2-Filter-Methode (siehe Kap. 4.4) mit den Ergebnissen des ICOS-Temperature-Systems abgeglichen werden.

4.7 Rapid Compression Machine

Eine Rapid Compression Machine (RCM) ist ein 1-Kolben-Einhubtriebwerk zur Analyse von Gemischbildung und Verbrennungsprozessen. Die in dieser Arbeit verwendete RCM der Firma Testem (siehe Abb. 4.15) besitzt eine Messkammer und eine Antriebskammer. Die Messkammer wird mit dem zu untersuchenden Gasgemisch befüllt, während die Antriebskammer mit trockener Luft unter hohem Druck gesetzt wird. Der Druck aus der Antriebskammer treibt einen Kolben einmalig an, sodass das Gas in der Messkammer in sehr kurzer Zeit, ähnlich wie bei einem Verbrennungsmotor, verdichtet wird. Nach Erreichen des Druckmaximums schwingt der Kolben sanft aus und ein neuer Verdichtungsprozess kann vorbereitet werden. Die RCM bietet eine sehr motornahe Testumgebung bei gleichzeitig viel genauer definierten Umgebungsbedingungen als im Motor und bietet sich daher für Validierungsmessungen mit dem ICOS-System an.



Abbildung 4.15: Rapid-Compression-Machine der Firma Testem [56].

Im Kopf der Messkammer ist ein piezoresistiver Drucksensor eingeschraubt, sodass der Druck über die gesamte Messdauer gemessen werden kann. Für Messungen mit dem ICOS-System wurde eine modifizierte Deckplatte für die RCM konstruiert, sodass dort ein Zündkerzensensor eingeschraubt werden kann. Die Temperatur der Messkammer vor Beginn der Verdichtung wird über ein Thermoelement erfasst. Da von der RCM kein entsprechendes Triggersignal bereitgestellt wird, simuliert das ICOS-System für die Messungen eine Motordrehzahl von 1500 U/min bei einer Auflösung von 1 °KW. Vor Beginn jeder Messung wird die Messkammer auf 40 mbar evakuiert. Anschließend wird die Antriebskammer mit trockener Luft bis zum gewünschten Antriebsdruck befüllt. Währenddessen wird mit dem ICOS-System eine Messung über 50 Zyklen durchgeführt aus der später das absorptionsfreie I_0 -Signal bestimmt wird. Nach Befüllen der Antriebskammer wird die Messkammer aus Gasflaschen mit vorgemischtem CH_4/N_2 -Gemisch bestehend aus

CH₄ 5.5 und N₂ 6.0 äquivalent zu $\lambda = 0,9$, $\lambda = 1,0$ und $\lambda = 1,1$ befüllt. Sobald in der Messkammer ein voreingestellter Druck erreicht ist, setzt sich der Kolben in Bewegung und der Verdichtungsvorgang startet. Ab diesem Zeitpunkt wird die Messung mit dem ICOS-System gestartet. Diese dauert auf Basis des simulierten Kurbelwinkelsignals 200 Zyklen zu je 720 Messpunkten und umfasst damit den gesamten Verdichtungsvorgang.

Für Messungen mit dem ICOS-Temperature-System muss in der Messkammer Wasserdampf vorhanden sein, siehe Kap. 4.6. Dafür wurde in die Gaszuleitung zur Messkammer ein Septum eingebaut, über das mit Hilfe einer Spritze Wasser zugeführt werden kann. Die Metallrohre um das Septum und zur Messkammer hin sind mit einem Heizband umwickelt und werden auf 75 °C geheizt. Kurz vor der Messkammer gehen die Metallrohre in einen flexiblen Schlauch aus Kunststoff über, welcher nicht geheizt werden kann. Aufgrund des Wärmeübertrags können daher die Metallrohre nicht höher als angegeben geheizt werden, da sonst eine Schädigung des Kunststoffes droht. Damit ist die Menge Wasser, welche eingespritzt werden kann, bevor Kondensation auftritt stark limitiert und kann nicht exakt abgeschätzt werden. Daher ist mit einer teilweisen Kondensation des Wasserdampfes in der Zuleitung zur Messkammer zu rechnen. Zusätzlich ist es nicht möglich den Partialdruck von Wasser in der Messkammer zu messen. Aus diesen Gründen ist es zwar möglich eine für Messungen mit dem ICOS-Temperature-System ausreichende Menge Wasser in die Messkammer zu befördern, allerdings ist diese nicht exakt definiert.

4.8 Versuchsmotoren

Im Rahmen dieser Arbeit standen zwei unterschiedliche Versuchsmotoren für Experimente zur Verfügung. Einer davon ist ein 4-Zylinder Ottomotor (Versuchsmotor 1), welcher für den Betrieb mit Gas umgebaut wurde und in jedem Zylinder mit einem piezoresistiven Drucksensor der Firma Kistler ausgestattet wurde. Aufgrund der Einbaulage des Motors am Prüfstand musste der Ansaugtrakt insoweit modifiziert werden, dass zwischen Zylinderkopf und eigentlichem Saugrohr ein Metalladapter platziert wurde. Dieser vergrößert den Abstand zwischen den genannten Bauteilen und dient der Anbringung von Messtechnik. Des Weiteren ist unterhalb des Zylinderkopfes eine Zwischenplatte eingebracht, welche über Fenster den optischen Zugang zu einem der Zylinder gewährleistet. Bei Versuchsmotor 2 handelt es sich um einen sogenannten Transparentmotor mit einer Laufbuchse aus Quarzglas. Der Kolben besitzt ebenfalls einen Einsatz aus Quarzglas. Auch hier ist ein Metalladapter am Zylinderkopf vorhanden an dessen Ende der Injektor platziert ist und an den die Saugrohrsonde angebracht werden kann.

Für Messungen mit der Saugrohrsonde wurde der Metalladapter im Ansaugtrakt von Versuchsmotor 1 modifiziert, wie in Abb. 4.16 dargestellt. Der Zugang zu einem der vier Zylinder wurde vom restlichen Saugrohr abgetrennt und es wurde eine neue Gaszufuhr installiert. Diese ermöglicht zum einen Frischluft aus dem Labor anzusaugen und zum anderen vorgemischtes Gas aus einer Flasche zu ziehen. Die verwendeten Gase bestanden aus 2,52% und 9,51% CH₄ 5.5 in N₂ 6.0. Die Saugrohrsonde wird über einen Adapter mit Gewindebohrung eingeschraubt, während der Retroreflektor auf der gegenüberliegenden Seite eingeklebt ist. Direkt neben der Messposition (1,5 cm entfernt) sind ein 1mm dickes Typ K Thermoelement und ein piezoresistiver Drucksensor Typ 4007B der Firma Kistler installiert. Für Messungen mit regulärer Eindüsung wurde die Gaszufuhr entfernt und der

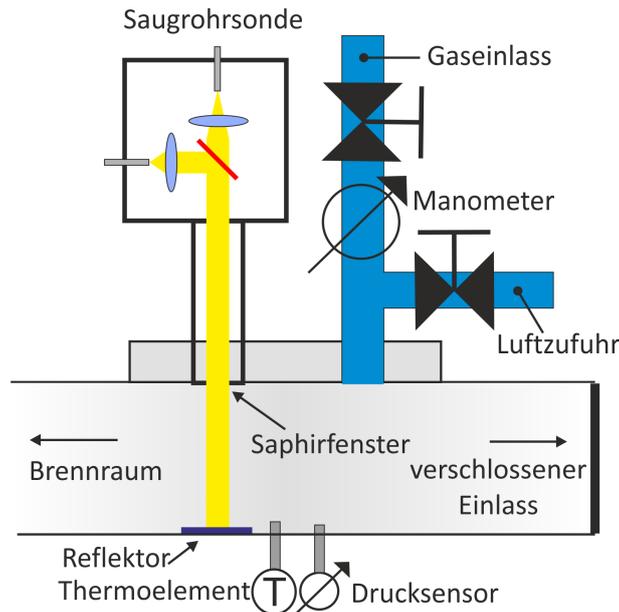


Abbildung 4.16: Schemazeichnung der Modifikationen am Ansaugtrakt von Versuchsmotor 1 für Messungen mit der Saugrohrsonde.

Zugang zum Zylinder wieder geöffnet. Die Eindüsung findet am stromaufwärts gelegenen Ende des Metalladapters in einer Entfernung von 5 cm zur Messposition statt.

Der schematische Aufbau an Versuchsmotor 2 ist in Abb. 4.17 gezeigt. An Stelle der normalen Zündkerze ist der Zündkerzensensor eingeschraubt. Der Saugrohrsensor ist im Metalladapter platziert, wobei hier der Retroreflektor nicht direkt in den Ansaugtrakt, sondern auf einem Gewindebolzen aufgeklebt wurde. Die Eindüsung erfolgt auch hier stromaufwärts zur Messposition. Alternativ dazu kann die Zufuhr von Kraftstoff über einen MFC erfolgen. Die Luftzufuhr wird immer über einen MFC gesteuert. Zusätzlich ist eine Vormischstrecke verbaut, sodass mit Hilfe der beiden MFCs sehr genau definierte Luft-Kraftstoff-Gemische realisiert werden können. Für die Luftzufuhr kommt ein MFC Red-Y Smart des Typs GSC-D4TA-DD13 der Firma Vögtlin Instruments mit einem Messbereich von 2...200 l_n/min zum Einsatz. Der Messfehler beträgt $\pm 0,3\%$ des Endwertes zuzüglich $\pm 0,5\%$ des Messwertes. Für die Methanzufuhr wird ein Flow Controller Typ F-202AI-M20-ABD-44-K der Firma Bronkhorst mit einem Messbereich von 0,2...7 kg/h verwendet. Dessen Messfehler beträgt $\pm 0,1\%$ des Endwertes zuzüglich $\pm 0,5\%$ des Messwertes. Daraus ergibt sich ein mittlerer Fehler in den eingestellten λ -Werten ($\lambda = 0,95$, $\lambda = 1,0$ und $\lambda = 1,1$) von $\approx 1,8\%$.

Als Kraftstoff kam CH_4 4.5 zum Einsatz. Bei Messungen an Versuchsmotor 2 wurde außerdem das ICOS-Temperature-System verwendet (siehe Kap. 4.6). Hier wurde ein optischer Aufbau in Durchlicht realisiert, wobei Kollimator und Spiegel mit Metallröhrchen versehen wurden. Diese können bis auf etwa 5 mm an die Laufbuchse herangeschoben und mit N_2 gespült werden. Der Durchlichtaufbau wurde, in Abhängigkeit von weiterer, externer Messtechnik, nacheinander in zwei zueinander senkrechten Richtungen am Versuchsmotor

installiert. Bedingt durch die Bauart des Motors erlaubte nur eine dieser beiden Richtungen die Messung der Temperatur über den gesamten Motorzyklus. Bei der anderen Richtung erfolgte eine teilweise Abschattung der Messstrecke durch den Kolben, sodass eine Messung der Temperatur bis etwa 30 °KW vor ZOT möglich war. Weiterhin wurde für einige Messungen der Zündkerzensensor durch einen äquivalenten Sensorkopf des ICOS-Temperature-Systems ausgetauscht. Dies erlaubte die Messung der Temperatur direkt an der Zündkerze. In der folgenden Tab. 4.2 finden sich die wichtigsten Merkmale der beiden Versuchsmotoren übersichtlich aufgelistet.

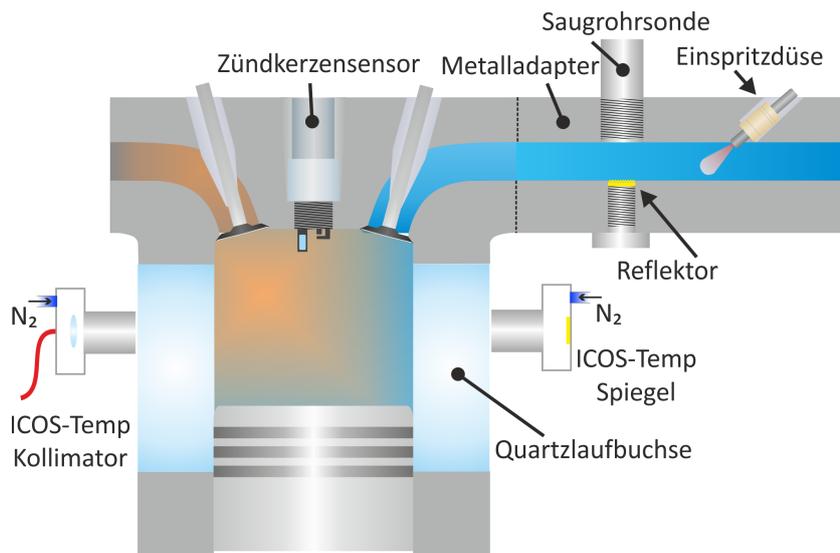


Abbildung 4.17: Schematischer Aufbau der Messtechnik: Versuchsmotor 2

Tabelle 4.2: Technische Daten der Versuchsmotoren

	Versuchsmotor 1	Versuchsmotor 2
Motorart	4-Zylinder-Motor	1-Zylinder-Transparentmotor
Bohrung (mm)	89	74,5
Hub (mm)	85	86
Verdichtung	9:1	8:1
Pleuellänge (mm)	136,1	140
Öffnen der Einlassventile (°KW)	-320	-334
Schließen der Einlassventile (°KW)	-124	-184
Öffnen der Auslassventile (°KW)	164	167
Schließen der Auslassventile (°KW)	704	347

5 Experimente an Druckzellen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Experimente an optischen Druckzellen (siehe Kap. 4.4) vorgestellt. Messungen mit einem FTIR-Spektrometer (siehe Kap. 4.1) dienen der grundlegenden Untersuchung des Absorptionsverhaltens von Methan in Abhängigkeit von Druck und Temperatur in motorrelevanten Bereichen. Hierbei wird insbesondere der Einfluss des verwendeten Bandpassfilters auf spätere Quantifizierungsstrategien berücksichtigt. Anschließend werden Messungen mit dem ICOS-System vorgenommen, um das Rechenmodell zur Quantifizierung der Methandichte zu validieren und zu kalibrieren. Weiterhin werden Messungen mit der 2-Filter-Methode unter Verwendung unterschiedlicher Filterkombinationen durchgeführt, um die bestmögliche Kombination bezogen auf die erzielbare Genauigkeit in der Quantifizierung zu finden.

5.1 Untersuchung des Absorptionsverhaltens von Methan

Im Folgenden wird das grundsätzliche Absorptionsverhalten von Methan unter Variation von Druck und Temperatur untersucht. Insbesondere wird die Abhängigkeit von Druck und Temperatur in Hinblick auf die Quantifizierung im Brennraum eines Ottomotors untersucht und bewertet. Diese Untersuchung geschieht anhand von Messungen an optischen Druckzellen per FTIR-Spektroskopie und mittels des ICOS-Systems.

Für die Messungen wurden Mischungen mit 0,1% und 0,05% Methan in Stickstoff in einem Mischbehälter hergestellt und wie in Kap. 4.4 beschrieben bei 25 °C und 250°C von 5 bar bis 35 bar mittels Druckzelle im FTIR-Spektrometer vermessen. Die Mengen an Methan sind so gewählt, dass es in keinem Bereich der gemessenen Absorptionsspektren zu einer Sättigung der Absorption kommt. Sättigung bedeutet hier, dass die Transmission im Rahmen der Messgenauigkeit des FTIR-Spektrometers auf Null fällt. Anderenfalls wäre eine Berechnung des Absorptionsquerschnittes nicht möglich. Dieser wird über das Lambert-Beersche Gesetz (siehe Gl. 2.40) berechnet und über die komplette Bande von 2610 cm^{-1} - 3300 cm^{-1} integriert. Die Messungen wurden je sechsmal wiederholt, um daraus Mittelwerte zu berechnen. Als Fehler wurde über die Standardabweichung das 95% Konfidenzintervall berechnet. Zum Vergleich mit Literaturdaten wurden Absorptionsquerschnitte aus der HITRAN-Datenbank [50] mit einer Auflösung von $0,1\text{ cm}^{-1}$ erzeugt und über den gleichen Spektralbereich integriert. Die integrierten Absorptionsquerschnitte aus Spektrometernmessungen und HITRAN-Berechnungen sind in Abb. 5.1 gegen den Druck aufgetragen. Die Messdaten in Abb. 5.1 zeigen, dass innerhalb des Fehlerbereichs der integrierte Absorptionsquerschnitt unabhängig von Druck und Temperatur ist. Zu niedrigen Drücken sinkt der gemessene Absorptionsquerschnitt etwas, allerdings streuen hier die Messwerte mehr, sodass der Fehlerbereich größer wird. Die Werte aus der HITRAN-Datenbank weichen systematisch nach oben ab, liegen bis auf den Werten

für 10 und 15 bar nur für 250 °C innerhalb des Fehlerbereichs der Messwerte. Bei den HITRAN-Berechnungen zeigt sich eine geringe Abweichung von 2-2,7% zwischen den Absorptionsquerschnitten bei 25 °C und 250 °C. Insgesamt sprechen die Ergebnisse dafür, dass die integrierte Absorption durch thermische Anregung im untersuchten Bereich nicht signifikant beeinflusst wird. Anderenfalls wäre ein deutlicher Unterschied zwischen integrierten Absorptionsquerschnitten bei unterschiedlichen Temperaturen zu sehen. Somit erscheinen integrierte Absorptionsmessungen unabhängig von Druck und Temperatur grundsätzlich möglich.

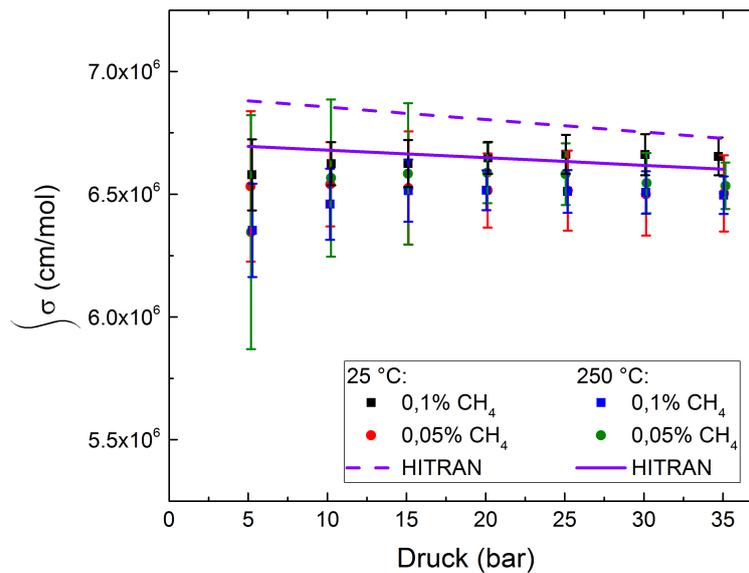


Abbildung 5.1: Integrierte Absorptionsquerschnitte σ aus FTIR-Messungen und HITRAN-Datenbank bei 25 °C und 250 °C für 0,1% und 0,05% Methan in Stickstoff. Die Fehlerbalken entsprechen einem 95% Konfidenzintervall.

Im ICOS-System wird der Wellenlängenbereich für die molekulspezifische Absorption über Bandpassfilter selektiert. Wie in Abb. 4.6 gezeigt, stellt der Filter den entscheidenden spektralen Einfluss zur Selektion des Detektionsbereichs dar. Der Filter umfasst nicht die komplette Absorptionsbande, sodass der Einfluss des Filters auf die Druck- und Temperaturabhängigkeit der integrierten Absorption untersucht werden muss. Daher werden die aus den im vorigen Absatz beschriebenen Messungen erhaltenen Absorptionsquerschnitte mit der Filtertransmission multipliziert und anschließend integriert. Die Transmissionskurve des Bandpassfilters wurde zuvor im FTIR-Spektrometer vermessen. Die Absorptionsquerschnitte aus der HITRAN-Datenbank werden ebenfalls mit der Filtertransmission multipliziert und anschließend integriert. Die berechneten integrierten Absorptionsquerschnitte sind in Abb. 5.2 gegen den Druck aufgetragen. Anhand der Grafik ist deutlich der Unterschied zwischen den resultierenden Werten bei 25 °C und 250 °C zu erkennen. Durch die höhere Temperatur sind im Grundzustand höhere Rotationsniveaus angeregt, woraus eine Verbreiterung der Absorptionsbande von Methan resultiert. In Abb. 5.3 sind aus FTIR-Spektrometernessungen berechnete Absorptionsquerschnitte von Methan bei

40 bar und 25 °C sowie 250 °C in Abhängigkeit von der Wellenzahl zusammen mit der skalierten Transmissionskurve des Bandpassfilters aus dem ICOS-System gezeigt. Da der Filter nicht die komplette Absorptionsbande abdeckt, werden die außen liegenden Rotationsbanden unterdrückt. Dadurch sinkt der integrierte Absorptionsquerschnitt, wie in Abb. 5.2 zu sehen. Die Berechnungen anhand der HITRAN-Datenbank zeigen die gleiche Tendenz, auch wenn hier wieder eine systematische Abweichung zu höheren Werten vorhanden ist. Daher ist für die Messungen mit dem ICOS-System mit dem hier verwendeten Filter eine Temperaturabhängigkeit der gemessenen Transmissionen zu erwarten.

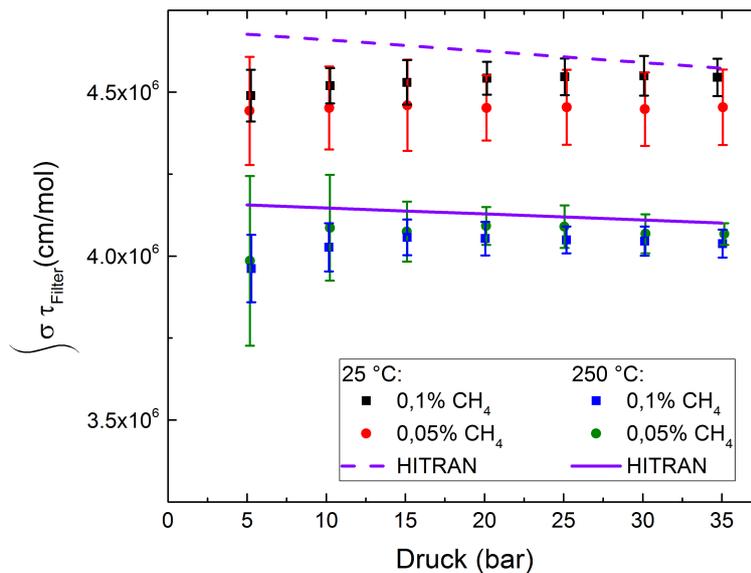


Abbildung 5.2: Integrierte Absorptionsquerschnitte σ mit Berücksichtigung der Filtertransmission τ_{Filter} aus FTIR-Spektrometernmessungen und HITRAN-Datenbank bei 25 °C und 250 °C für 0,1% und 0,05% Methan in Stickstoff. Die Fehlerbalken entsprechen einem 95% Konfidenzintervall.

Die oben gezeigten Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Temperaturabhängigkeit der Absorption durch die Wahl eines breiteren Filters beseitigt werden kann. Dies hätte erhebliche Vorteile für die Quantifizierung der Methandichte anhand integrierter Transmissionsmessungen, da die Temperatur im Brennraum eines Motors eine schwer zu erfassende Größe darstellt. Allerdings gelten die bisher gezeigten Ergebnisse nur für solche Kombinationen aus Methandichte, Druck und Temperatur für die es zu keiner Sättigung der Absorption kommt. Das heißt so lange, wie Änderungen in der Transmission einzelner Banden durch das Detektionssystem noch erfasst werden können. Zwar ist die Absorptionsstrecke im ICOS-Zündkerzensensor deutlich geringer als in der Druckzelle (0,96 cm gegenüber 6 cm), jedoch ist der Anteil an Methan mit $\approx 9,5\%$ für eine stöchiometrische Verbrennung erheblich größer als in den bisherigen Messungen. Daher ist mit einer weitaus komplexeren Abhängigkeit der integrierten Transmission von Druck und Temperatur zu rechnen, welche durch die Wahl eines breiteren Filters nicht beseitigt werden kann.

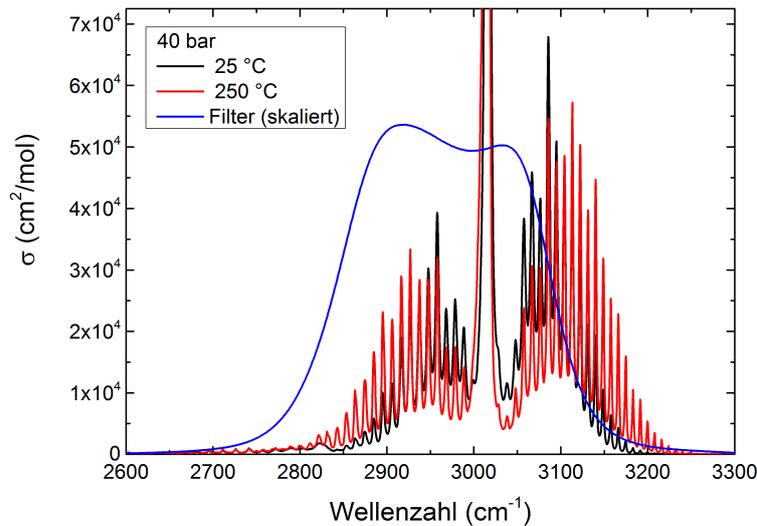


Abbildung 5.3: Absorptionsquerschnitt von Methan gemessen mittels FTIR-Spektrometer bei 40 bar und 25 °C sowie 250 °C sowie skalierte Transmissionskurve des Bandpassfilters aus dem ICOS-System.

Der oben besprochene Effekt der Temperaturabhängigkeit durch eine Sättigung der Absorption wird anhand von Transmissionsmessungen mit dem ICOS-System deutlich. Die Druckzelle wurde mit Gemischen aus 0,1%, 0,4% und 1,6% Methan in Stickstoff bei Drücken von 5-35 bar befüllt. Über das ICOS-System wurde die integrierte Transmission bei Raumtemperatur gemessen. Anstatt des Zündkerzensensors kam hier jedoch ein optischer Aufbau in Durchlichtgeometrie zum Einsatz. Bei dieser Art Aufbau wird das Licht der Lichtquelle über eine Faser zum Zellenfenster geleitet, dort über eine CaF_2 -Linse mit Brennweite $f = 25 \text{ mm}$ kollimiert und nach dem Durchgang durch die Zelle über eine weitere CaF_2 -Linse in die Faser zum Detektionssystem eingekoppelt. In Abb. 5.4 sind die gemessenen Transmissionen für die drei Gasmischungen gegen die Dichte aufgetragen. Bei jeder Messreihe wurde die Druckzelle mit der jeweiligen Gasmischung schrittweise von 5 bar bis 35 bar befüllt. Dementsprechend ist der Messpunkt kleinster Dichte einer Messreihe bei 5 bar und der Messpunkt größter Dichte bei 35 bar gemessen. Die Daten in Abb. 5.4 zeigen, dass die gemessene Transmission bei fester Dichte druckabhängig ist, da die einzelnen Messreihen gegeneinander verschoben sind. Direkt sichtbar wird die Druckabhängigkeit an den Messpunkten bei 5 bar bei 1,6% Methan und 20 bar bei 0,4% Methan, da hier die Dichten gleich sind, die Transmission für ersteren Messpunkt jedoch höher ist. Der Grund dafür wird aus Abb. 5.5 ersichtlich, welche die zu den eben genannten Messpunkten aus der HITRAN-Datenbank erzeugten Transmissionsspektren zeigt. Bei 5 bar zeigen einzelne Rotationspeaks eine Sättigung der Transmission. Sättigung bedeutet hier, dass Änderungen in der Höhe der Peaks durch eine Änderung der Methandichte so gering sind, dass diese praktisch nicht mehr auflösbar sind. Bei 20 bar hingegen sorgt die Druckverbreiterung für eine geringere Höhe der Peaks, sodass keine Sättigung in der Transmission einzelner Peaks auftritt. Dadurch ist die integrierte Transmission geringer. Bei höheren Anteilen von Methan, wie sie bei Verbrennungsprozessen im Motor auftreten

sind die Peaks ebenso höher. Dadurch ist zu erwarten, dass bei Temperaturänderungen durch die Umbesetzung der Rotationsniveaus die integrierte Transmission zusätzlich beeinflusst wird. Somit muss für den Einsatz des ICOS-Systems im Brennraum neben dem Druck, welcher standardmäßig am Motorprüfstand gemessen wird, auch die Temperatur bei der Quantifizierung der Methandichte berücksichtigt werden.

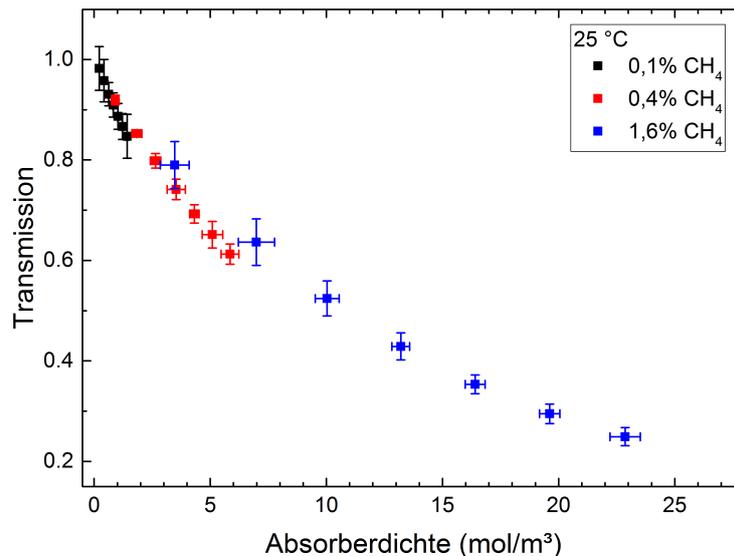


Abbildung 5.4: Integrierte Transmissionen gemessen mit dem ICOS-System in Durchlichtgeometrie für unterschiedliche CH₄/N₂-Mischungen. Bei jeder Messreihe wurde die Druckzelle von 5 bar bis 35 bar schrittweise mit der Gasmischung befüllt.

Um die Berechnungen auf Basis der HITRAN-Datenbank, wie diese in Kap. 4.3.2 beschrieben werden, zu validieren, wird die Druckzelle mit einer CH₄/N₂ Mischung äquivalent zu $\lambda = 1$, d.h. mit ein Mischungsverhältnis äquivalent einer stöchiometrischen Verbrennung (siehe Gl. 2.10) befüllt. Bei Raumtemperatur und unterschiedlichen Drücken wird mittels FTIR-Spektrometer das Transmissionsspektrum von Methan gemessen. Dann wird unter Einbeziehung der gleichen spektralen Einflüsse wie für die Berechnung der Look-up-Tabelle auf Basis der HITRAN-Datenbank die spektral aufgelöste Transmission integriert. Aus der Look-up-Tabelle werden die integrierten Transmissionen unter Eingabe von Druck, Temperatur und Methandichte berechnet. In Abb. 5.6 sind die integrierten Transmissionen aus Messung und Berechnung gegen die Dichte aufgetragen. Der Vergleich der Daten zeigt, dass die Übereinstimmung von Experiment und Berechnung sehr gut ist mit einer maximalen Abweichung von $\approx 1,3\%$ in der integrierten Transmission, welche bei der höchsten vermessenen Dichte (entspricht höchstem Druck) auftritt. Das zeigt, dass die Berechnungen anhand der HITRAN-Datenbank brauchbare Werte als Grundlage einer Auswertestrategie liefern.

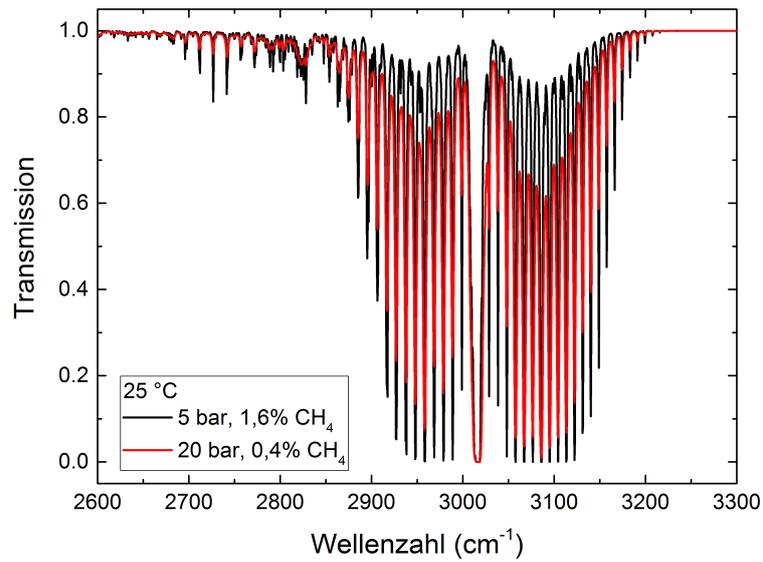


Abbildung 5.5: Per HITRAN-Datenbank berechnete Transmissionsspektren von Methan bei fester Dichte und fester Temperatur unter Variation von Druck und Konzentration.

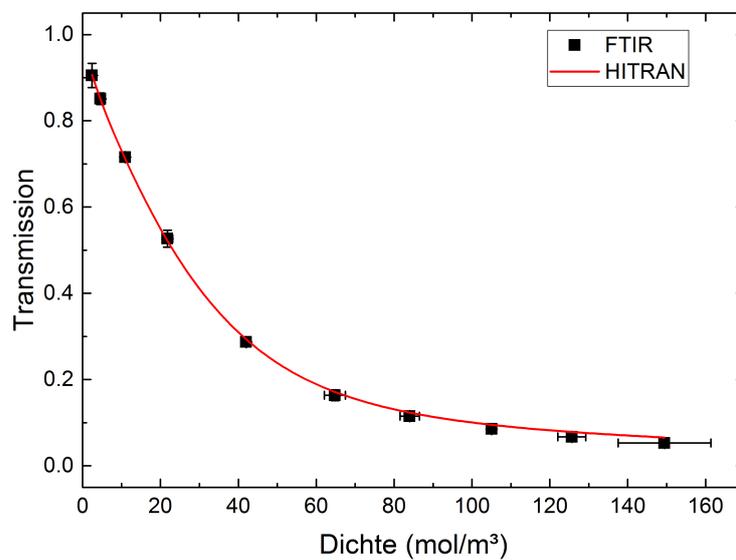


Abbildung 5.6: Integrierte Transmission gegen Dichte aus FTIR-Spektren und HITRAN-Datenbank unter Einbeziehung der gleichen spektralen Einflüsse. Die Fehlerbalken sind teilweise sehr klein und daher nicht sichtbar.

5.2 Kalibration des ICOS-1-Filter-Systems

Im vorigen Abschnitt wurde das grundsätzliche Absorptionsverhalten von Methan sowie der Einfluss des Bandpassfilters darauf untersucht und die Berechnungen anhand der HITRAN-Datenbank validiert. Als nächster Schritt folgen in diesem Abschnitt Messungen von CH_4/N_2 -Mischungen an Druckzellen mit dem ICOS-1-Filter-System und Zündkerzensensor. Dazu werden, wie in Kap. 4.4 beschrieben, vorgemischte Gase äquivalent zu $\lambda = 1$ und $\lambda = 0,25$ (9,5% CH_4 und 30% CH_4 , siehe Gl. 2.10) aus Gasflaschen verwendet, um sehr genau definierte Messbedingungen zu erhalten. Die Gasmischungen werden bei Raumtemperatur und 200 °C und Drücken von 0,5 - 25 bar je dreimal vermessen. Auf Basis der HITRAN-Datenbank wird bei gegebenem Druck, Temperatur und CH_4 -Dichte die zu erwartende Transmission ermittelt. Die gemessenen Transmissionen sind zusammen mit den Berechnungen in Abb. 5.7 und Abb. 5.8 gegen die Dichte aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die Berechnungen von den Messungen geringfügig abweichen, sodass eine Kalibration der Berechnungen erforderlich ist (siehe Abb. 5.9). Die Abweichungen können hier durch Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der spektralen Einflüsse auftreten. Beispielsweise kann ein leichtes Verkippen der Filter im Detektionssystem gegenüber der Stellung beim Vermessen im FTIR-Spektrometer für Abweichungen sorgen. Veränderungen in der Fasereinkopplung durch leichte, mechanische Verschiebung der Fasenden können ebenso Einfluss auf die spektrale Transmission haben. Weiterhin können die aus der HITRAN-Datenbank extrahierten Absorptionsquerschnitte Ungenauigkeiten aufweisen. Die maximale relative Abweichung zwischen berechneter τ_{calc} und gemessener Transmission τ_{mess} beträgt $\approx 7\%$ während die Abweichung im Mittel $\approx 2,3\%$ beträgt. Dabei wächst die relative Abweichung (Absolutwert von eins minus dem Verhältnis aus berechneter zu gemessener Transmission) mit sinkender Transmission.

Um die beobachteten Abweichungen zu minimieren, wird eine empirische Kalibration angewendet, welche schon früher erfolgreich benutzt wurde [19]. In Abb. 5.9 ist die berechnete τ_{calc} gegen die gemessene Transmission τ_{mess} aufgetragen, wobei die grüne Linie die ideale Übereinstimmung anzeigt. Die Fehlerbalken sind aufgrund ihrer Größe im Allgemeinen nicht sichtbar. Um eine Kalibrationsfunktion zu finden, welche die höchstmöglichen Genauigkeit in der späteren Quantifizierung erreicht, müssen die Daten in Abb. 5.9 möglichst gut von dieser Funktion repräsentiert werden. Die Annahme einer linearen Funktion als erste Näherung wie in [19] repräsentierte die Daten nicht exakt genug. Vor allem für Transmissionen kleiner 0,4 ergeben sich Abweichungen vom linearen Verhalten. Die beste Übereinstimmung ließ sich durch Anpassung eines Polynoms 3. Grades erreichen. Das Ergebnis der Anpassung ist

$$\tau_{mess} = 0,0003(4) + 0,91(3) \cdot \tau_{calc} + 0,12(5) \cdot \tau_{calc}^2 - 0,04(3) \cdot \tau_{calc}^3. \quad (5.1)$$

Die geringe Abweichung der angepassten Funktion zur grünen Linie in Abb. 5.9, welche die ideale Übereinstimmung darstellt, verdeutlicht, dass die spektralen Eigenschaften des Systems gut durch das Rechenmodell wiedergegeben werden. Weiterhin wird deutlich, dass die Kalibration unabhängig von der Temperatur ist, da die Daten für 25 °C und 200 °C auf einer Kurve liegen. In Abb. 5.7 und Abb. 5.8 sind die kalibrierten Transmissionswerte als blaue Linie eingetragen. Die Übereinstimmung mit den experimentellen Daten ist sichtlich besser. Die Abweichung beträgt maximal $\approx 1,5\%$ und im Mittel $\approx 0,5\%$. Die hier ermittelte Kalibration wird später vor der Quantifizierung der Methandichte auf die Lookup-Tabelle angewendet, um die Genauigkeit der Ergebnisse zu verbessern.

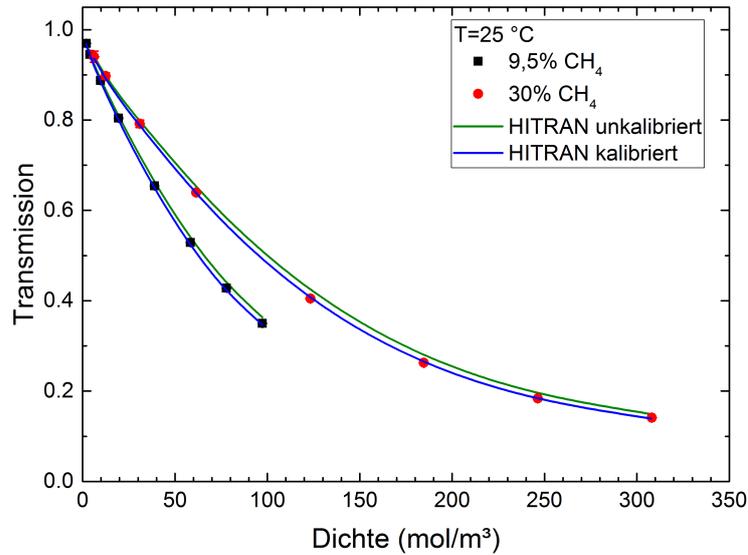


Abbildung 5.7: Per ICOS-System in der Druckzelle gemessene Transmission bei Raumtemperatur bei Variation des Druckes für zwei unterschiedliche CH₄/N₂-Gasmischungen und Vergleich mit HITRAN-Berechnungen.

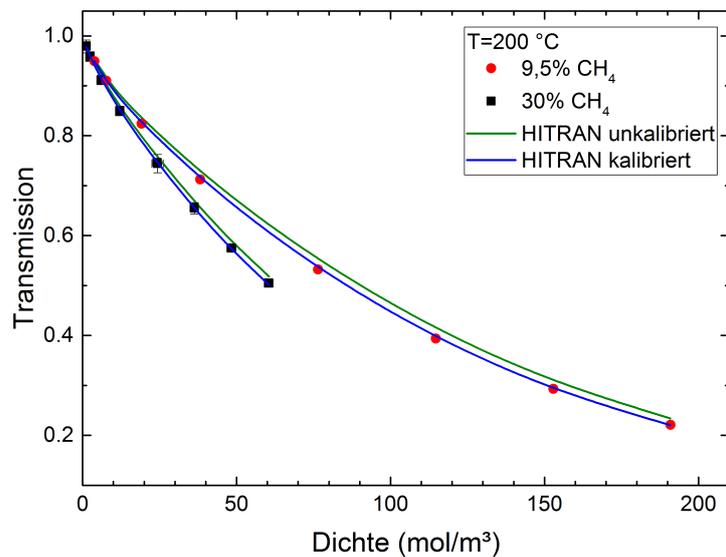


Abbildung 5.8: Per ICOS-System in der Druckzelle gemessene Transmission bei 200 ° bei Variation des Druckes für zwei unterschiedliche CH₄/N₂-Gasmischungen und Vergleich mit HITRAN-Berechnungen.

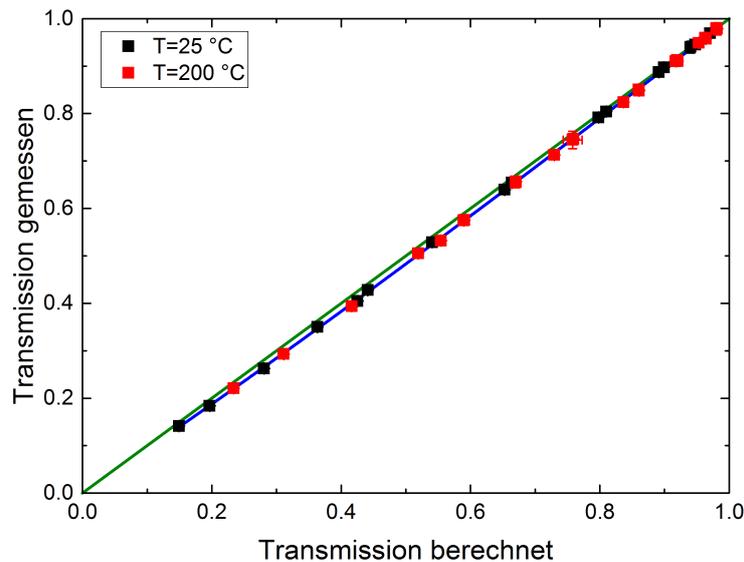


Abbildung 5.9: Auftragung der berechneten gegen die gemessene Transmission zur Bestimmung einer Kalibrationsfunktion. Die grüne Linie stellt eine ideale Übereinstimmung dar, während die blaue Kurve einer Anpassung mit einem Polynom 3. Ordnung entspricht. Die Fehlerbalken sind im Allgemeinen aufgrund ihrer Größe nicht sichtbar.

5.3 Untersuchung der CH₄-Detektion mittels 2-Filter-Methode

Die Idee hinter der 2-Filter-Methode ist die gleichzeitige Messung von Methandichte und Temperatur im Messvolumen über die Korrelation zweier Signale, welche bei Temperaturänderungen unterschiedlich variieren. In diesem Abschnitt werden die in Tab. 4.1 gelisteten Filterkombinationen anhand von Druckzellenmessungen getestet. Dabei kommt ein justierbarer optischer Aufbau zum Einsatz, der einen einfachen Austausch der Filter ermöglicht, dem Aufbau im ICOS-System nachempfunden ist und in einer vorherigen Arbeit [51] aufgebaut wurde. Für alle Filterkombinationen ergeben sich hierbei Abweichungen zwischen gemessener und berechneter Transmission, wie schon beim 1-Filter-System beobachtet. Mit Hilfe der zur jeweiligen Filterkombination passenden Kalibrationsfunktion wird anschließend auf Grundlage der in der Druckzelle gemessenen Transmission auf Temperatur und CH₄-Stoffmengenanteil zurückgerechnet. Daraus können die Abweichungen zu den nominellen Werten bestimmt werden, um die beste Filterkombination, d.h. diejenige mit der geringsten Abweichung zu finden. Diese wird dann bei Messungen am Motor eingesetzt. Der Übersichtlichkeit halber werden an dieser Stelle nur die Daten der final eingesetzten Filterkombination 3485-3420 gezeigt. Die Ergebnisse der anderen Filterkombinationen befinden sich im Anhang A.

Für die Kalibrationsmessungen an der Druckzelle zum Vergleich der Filterkombinationen kam ein vorgemischtes CH_4/N_2 -Gas äquivalent zu $\lambda = 1$ ($\approx 9,52\%$ CH_4) zum Einsatz. Gemessen wurde bei Raumtemperatur, $100\text{ }^\circ\text{C}$ und $200\text{ }^\circ\text{C}$. Die Auftragung der gemessenen τ_{mess} gegen die berechnete Transmission τ_{calc} ist in Abb. 5.10 zu sehen. Die Kalibrationsfunktion ist unabhängig von der Temperatur und kann hier, anders als beim 1-Filter-System, durch zwei lineare Regressionen dargestellt werden. Aufgrund der Daten konnte keine Abweichung vom linearen Verhalten festgestellt werden. Diese ergeben sich je nach Bandpassfilter typischerweise erst bei Transmissionen kleiner 0,4, welche durch die bei anderen Messungen benutzte Gasmischung äquivalent zu $\lambda = 0,25$ (30% CH_4) erreicht werden können. Die grundsätzlichen Befunde für die anderen Filterkombinationen sind die gleichen, wobei sich für die jeweils angepassten Geraden andere Werte ergeben. Für die hier gezeigte Filterkombination ergibt sich als Anpassung

$$\text{Filter 3485: } \tau_{\text{mess}} = 0,943(1) \cdot \tau_{\text{calc}} + 0,055(1)$$

$$\text{Filter 3420: } \tau_{\text{mess}} = 1,040(2) \cdot \tau_{\text{calc}} - 0,046(2).$$

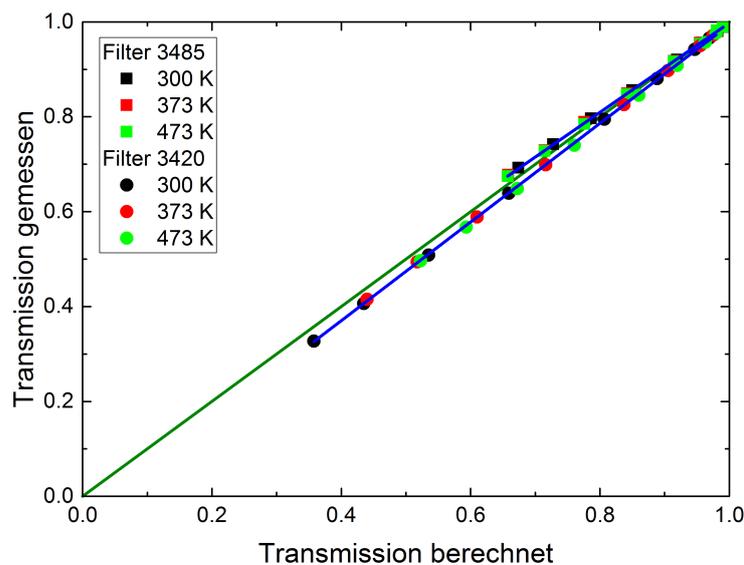


Abbildung 5.10: Auftragung der berechneten gegen die gemessene Transmission für das 2-Filter-System mit den Filtern 3485 und 3420. Die Daten für die Filter wurden jeweils mit einer Geraden gefittet und die grüne Linie stellt die ideale Übereinstimmung dar. Die Fehlerbalken sind aufgrund ihrer Größe nicht sichtbar.

Mit der so erhaltenen Kalibrationsfunktion wird über die Korrelation der Signale aus den Filtern (siehe Kap. 4.3.3) die Temperatur T und der Stoffmengenanteil x in der Druckzelle bestimmt. Aus den Ergebnissen für T und x werden dann die Abweichungen Δx und ΔT

zu den nominellen Werten berechnet. Die Abweichungen sind in Abb. 5.11 gegen den Druck aufgetragen. Da die Datenpunkte den Messfehler der Quantifizierung darstellen, sind entsprechend keine Fehlerbalken eingezeichnet. Anhand der Auftragung ist zu sehen, dass die Abweichungen und deren Streuung mit sinkendem Druck deutlich ansteigen. Dieser Trend lässt sich bei allen Filterkombinationen beobachten. Sinkender Druck bedeutet auch eine größere Transmission, sodass Signalschwankungen durch Rauschen oder Unsicherheiten in der Bestimmung der Hintergrundintensität I_0 einen größeren Einfluss auf die Berechnungen haben. Im Anwendungsfall am Motor liegt der für die Messung interessante Bereich typischerweise bei Drücken größer 2 bar. In diesem Druckbereich sind die in Abb. 5.11 Abweichungen deutlich geringer als bei kleineren Drücken. Die Abweichungen sind bei den anderen Filterkombinationen im Allgemeinen größer als im hier gezeigten Fall. Bei den ausgeschlossenen Filterkombinationen sind in vielen Fällen zudem temperaturabhängige Abweichungen zu beobachten. Diese Abhängigkeit würde bei Messungen im Motor eine größere Unsicherheit bedeuten, da in Druckzellenmessungen nicht der komplette Temperaturbereich abgedeckt werden kann, der am Motor üblicherweise auftritt. Eine Ausnahme bildet die Filterkombination 3329-3552, welche im Allgemeinen eine kleinere Abweichung in Temperatur und Stoffmenge aufweist wie die hier gezeigte Kombination 3485-3420. Zusätzlich ist die Kalibrationsfunktion der Filterkombination 3329-3552 sehr dicht an der idealen Geraden. Daher sollte ursprünglich diese Filterkombination bei Motormessungen eingesetzt werden. Dementsprechend wurde von der LaVision GmbH ein ICOS-System mit diesen Filtern aufgebaut. Die Detektoren in diesem System wiesen jedoch deutliche Abweichungen im spektralen Empfindlichkeitsbereich gegenüber den sonst verwendeten Detektoren auf. Hierbei handelt es sich schlicht um Variationen in der Produktion des Zulieferers. Daher lieferte das System mit der Filterkombination 3329-3552 ein nahezu unbrauchbares Signal-Rausch-Verhältnis. Aus Zeitgründen konnten vor den terminierten Motormessungen keine neuen Detektoren vom entsprechenden Zulieferer mehr bezogen werden. Aus diesem Grund wurde für die Motormessungen auf die Filterkombination 3485-3420 sowie auf den optischen Aufbau aus den Druckzellenmessungen zurückgegriffen. Wie gezeigt stellt sich diese Filterkombination ebenfalls als sehr vielversprechend dar und wurde mit dem optischen Aufbau schon erfolgreich an Versuchsmotor 1 getestet [51].

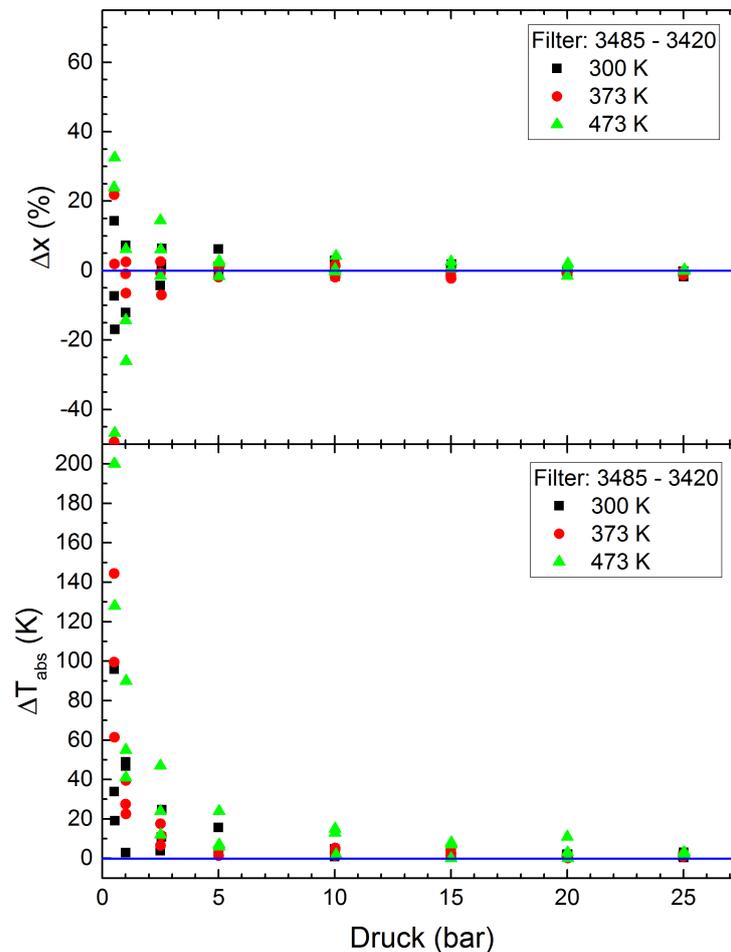


Abbildung 5.11: Ergebnis der Anwendung der 2-Filter-Methode auf die Druckzellenmessungen nach erfolgter Kalibration. Gezeigt sind die prozentuale bzw. absolute Abweichung für Stoffmengenanteil x und Temperatur T .

5.4 Kalibration des 2-Filter-Systems

In Vorbereitung der Messungen an der Rapid Compression Machine (RCM) (Kap. 7) und am Motor (Kap. 8) werden ausführliche Druckzellenmessungen mit der zuvor ausgewählten Filterkombination 3485-3420 zur Kalibration der Berechnungen durchgeführt. Hierzu wurde vorgemischtes CH_4/N_2 -Gas äquivalent zu $\lambda = 1$ und $\lambda = 0,25$ verwendet. Die Messungen wurden bei Raumtemperatur, 100 °C, 200 °C und 300 °C durchgeführt. In Abb. 5.12 und Abb. 5.13 sind die gemessene gegen die berechnete Transmission aus den Kalibrationsmessungen aufgetragen. Hierbei ist anzumerken, dass nach den Messungen bei 200 °C und vor den Messungen bei 300 °C die Filter zur Messung der Transmissionskurve im FTIR-Spektrometer kurzzeitig entfernt und wieder eingebaut wurden. Dieses Vorgehen führt zu einer Abweichung der Messung bei 300 °C im Vergleich zu den vorherigen Mes-

sungen. Daher wurden im Anschluss an die Messungen bei 300 °C nochmals Messungen bei Raumtemperatur durchgeführt. Die Daten dieser Messungen sind als Auftragung der gemessenen gegen die berechnete Transmission in Abb. 5.14 und Abb. 5.15 gezeigt. Beim Vergleich der Grafiken fällt auf, dass die Daten vor Ausbau der Filter in Abb. 5.12 und Abb. 5.13 näher an der idealen Übereinstimmung liegen als die Daten nach Wiedereinbau der Filter in Abb. 5.14 und Abb. 5.15. Gemeinsam haben alle Graphen allerdings, dass die Daten für unterschiedliche Temperaturen alle jeweils eine Kurve ergeben. Daher kann eine Temperaturabhängigkeit der Kalibrationsfunktion ausgeschlossen werden. Vielmehr liegt nahe, dass das Aus- und Einbauen der Filter dafür sorgt, dass diese nicht im exakt gleichen Winkel wie zuvor im Strahlengang positioniert sind. Eine Änderung des Einbauwinkels der Filter resultiert in einem geänderten Einstrahlwinkel des IR-Lichts, was zu einer spektralen Verschiebung der Transmissionskurve führt. Dieser Effekt ist ein Problem des verwendeten optischen Aufbaus und kommt bei einer geschlossenen Detektionseinheit des ICOS-Systems nicht vor. Die spektrale Verschiebung der Filtertransmission kann bei Berechnung der Look-up-Tabelle nicht berücksichtigt werden und resultiert damit in einer anderen Kalibrationsfunktion. Dementsprechend wurden die Messergebnisse getrennt und jeweils eigene Kalibrationsfunktionen angefügt. In Abb. 5.13 und Abb. 5.15 ist erkennbar, dass die Datenpunkte für den Filter 3420 von einem rein linearen Verhalten abweichen. Dies gilt nicht für den Filter 3485, für den die minimale Transmission höher ist und die Messungen ein lineares Verhalten zeigen. Es hat sich allerdings gezeigt, dass eine Kalibration mit einem Polynom 3. Ordnung, wie beim 1-Filter-System, die beste Genauigkeit bei der Quantifizierung (siehe nächster Absatz) erzielt.

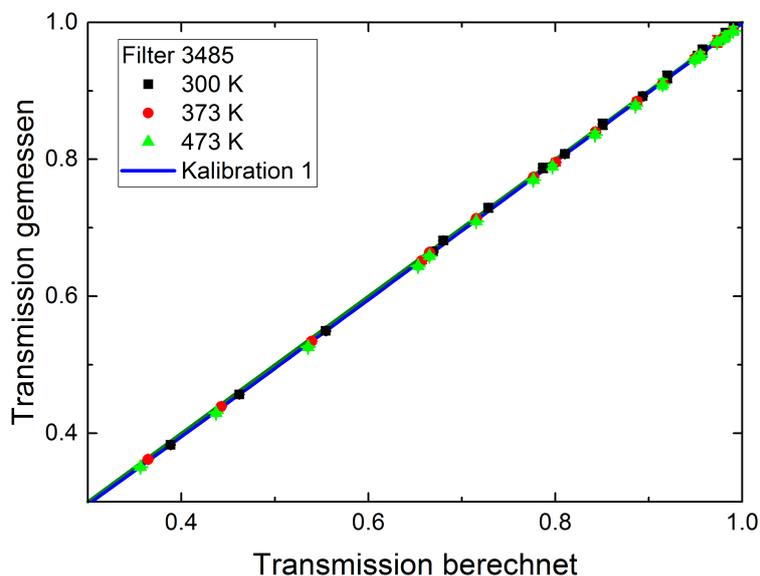


Abbildung 5.12: Kalibrationsmessungen für den Filter 3485 mit Anpassung eines Polynoms 3. Ordnung (blaue Linie) und der idealen Übereinstimmung (grüne Linie). Fehlerbalken sind teilweise aufgrund ihrer Größe nicht sichtbar.

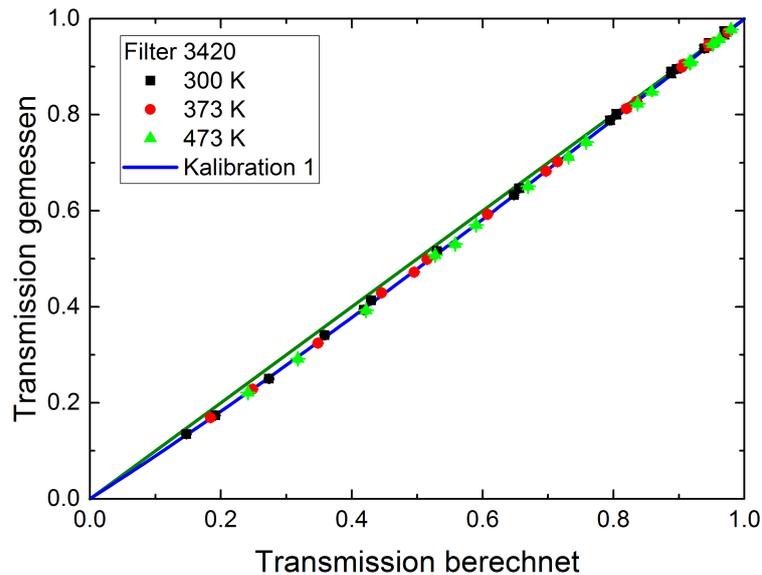


Abbildung 5.13: Kalibrationsmessungen für den Filter 3420 mit Anpassung eines Polynoms 3. Ordnung (blaue Linie) und der idealen Übereinstimmung (grüne Linie). Fehlerbalken sind teilweise aufgrund ihrer Größe nicht sichtbar.

Mit Hilfe der ermittelten Kalibrationsfunktionen wird die Look-up-Tabelle kalibriert, um auf Stoffmengenanteil und Temperatur in der Druckzelle zurückzurechnen. Dies stellt eine Überprüfung der Konsistenz der Kalibration dar und folgt dem gleichen Vorgehen wie beim Test der unterschiedlichen Filterkombinationen (siehe Kap. 5.3). In Abb. 5.16 und Abb. 5.17 sind als Ergebnis dieser Berechnungen die Abweichungen von Stoffmengenanteil Δx und Temperatur ΔT für unterschiedliche Temperaturen gegen den Druck aufgetragen. Die Daten entsprechen dabei dem Fehler der Quantifizierung, weswegen keine Fehlerbalken eingezeichnet sind. Es ergibt sich qualitativ das gleiche Bild wie im vorherigen Abschnitt. Bei kleinen Drücken, das heißt hohen Transmissionen ergeben sich deutlich größere Abweichungen zu den nominellen Werten für Druck und Temperatur als bei hohen Drücken und die berechneten Werte zeigen eine größere Streuung. Im Mittel wird eine Genauigkeit im Stoffmengenanteil von $\Delta x \approx 4,0\%$ und in der Temperatur von $\Delta T \approx 11,0$ K erreicht.

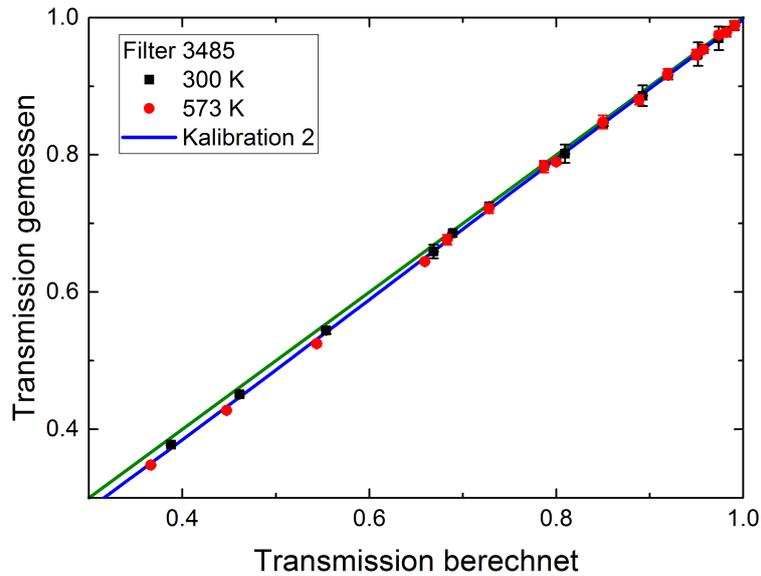


Abbildung 5.14: Kalibrationsmessungen für den Filter 3485 nach Aus- und Wiedereinbau der Filter mit Anpassung eines Polynoms 3. Ordnung (blaue Linie) und der idealen Übereinstimmung (grüne Linie). Fehlerbalken sind teilweise aufgrund ihrer Größe nicht sichtbar.

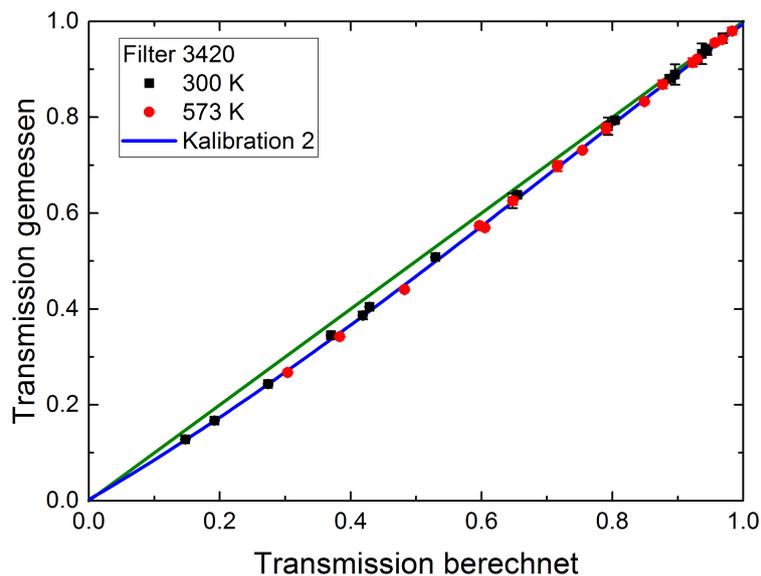


Abbildung 5.15: Kalibrationsmessungen für den Filter 3420 nach Aus- und Wiedereinbau der Filter mit Anpassung eines Polynoms 3. Ordnung (blaue Linie) und der idealen Übereinstimmung (grüne Linie). Fehlerbalken sind teilweise aufgrund ihrer Größe nicht sichtbar.

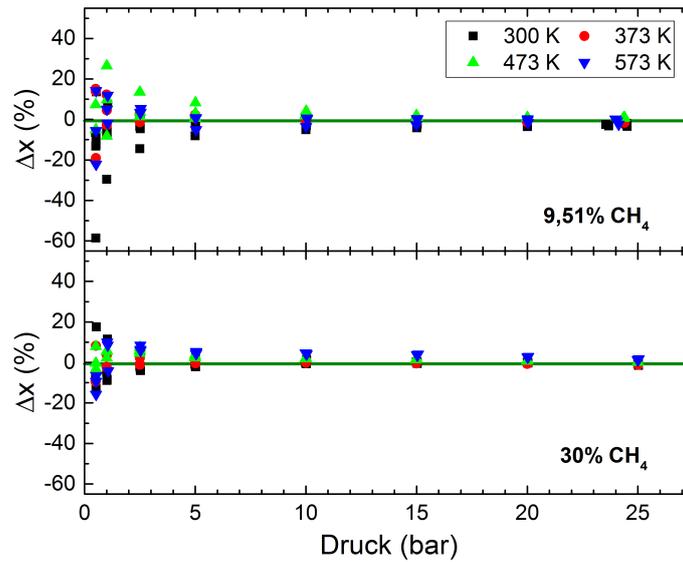


Abbildung 5.16: Abweichungen Δx im quantifizierten Stoffmengenanteil für die Druckzellenmessungen bei unterschiedlichen Drücken und Temperaturen nach Anwendung der Kalibration. Verwendet wurden Gasmische mit 9,51% (oben) und 30% (unten) CH_4 in N_2 .

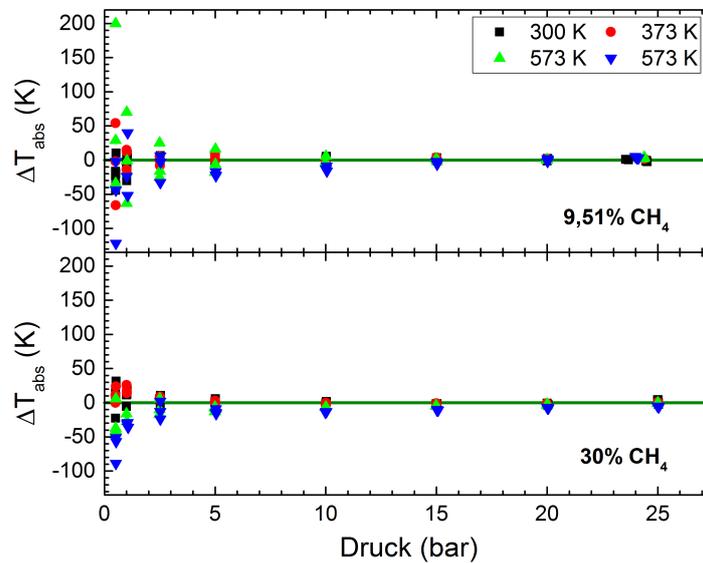


Abbildung 5.17: Abweichungen ΔT in der quantifizierten Temperatur für die Druckzellenmessungen bei unterschiedlichen Drücken und Temperaturen nach Anwendung der Kalibration. Verwendet wurden Gasmische mit 9,51% (oben) und 30% (unten) CH_4 in N_2 .

Die bisher verwendeten Kalibrationsfunktionen lassen außer Acht, dass ein Punkt in der Kalibration physikalisch feststehen sollte. Dieser Fixpunkt liegt bei einer Absorberdichte von Null, da dort sowohl berechnete als auch gemessene Transmission Eins sind. In den realen Experimenten an der Druckzelle können sich hier jedoch Abweichungen ergeben. Wie schon erwähnt hat die Bestimmung der Hintergrundintensität I_0 gerade bei kleinen Dichten einen großen Einfluss auf die Bestimmung der breitbandigen Transmission. Kleine Dichten bedeuten hohe Transmissionswerte bei denen schon geringe Abweichungen in der Transmission deutlich größere Abweichungen in der mittels Look-up-Tabelle bestimmten Temperatur und Dichte ausmachen können. Die hier verwendete Kalibration ohne Fixpunkt passt die Berechnungen genau auf die hier gemachten Messungen an, sodass die Quantifizierung in Abb. 5.16 und Abb. 5.17 die höchstmögliche Genauigkeit erreicht. Wird der Fixpunkt in die Kalibration mittels eines Polynoms 3. Ordnung miteinbezogen ergeben sich entsprechend andere Kalibrationsfunktionen.

Wird diese Kalibration angewendet, um wie zuvor auf Stoffmenge und Temperatur zurückzurechnen und daraus wie zuvor die Abweichungen Δx und ΔT zu bestimmen ergeben sich teilweise leicht höhere Werte. Die Abweichungen sind in Abb. 5.18 und Abb. 5.19 für die unterschiedlichen Temperaturen gegen den Druck aufgetragen. Im Bereich niedriger Drücke ($< 2,5$ bar) zeigen sich für 9,51% CH_4 größere Abweichungen verglichen mit den Ergebnissen bei einer Kalibration ohne Fixpunkt. Bei 30% CH_4 erscheinen die Abweichungen ähnlich groß und die maximale Abweichung ist geringer. Im Mittel ist die Genauigkeit ein wenig schlechter verglichen mit der Kalibration ohne Fixpunkt mit Werten von $\Delta x \approx 4,2\%$ und $\Delta T \approx 11,2$ K. Bei den hier gemachten Berechnungen handelt es sich um eine Überprüfung der Konsistenz der Quantifizierungsmethode. Der erwähnte Fixpunkt in der Kalibration ist jedoch physikalisch sinnvoll und daher unbedingt zu berücksichtigen. Für weitere Validierungsmessungen an RCM und Motor lohnt es sich also eine Kalibration mit Fixpunkt in Betracht zu ziehen.

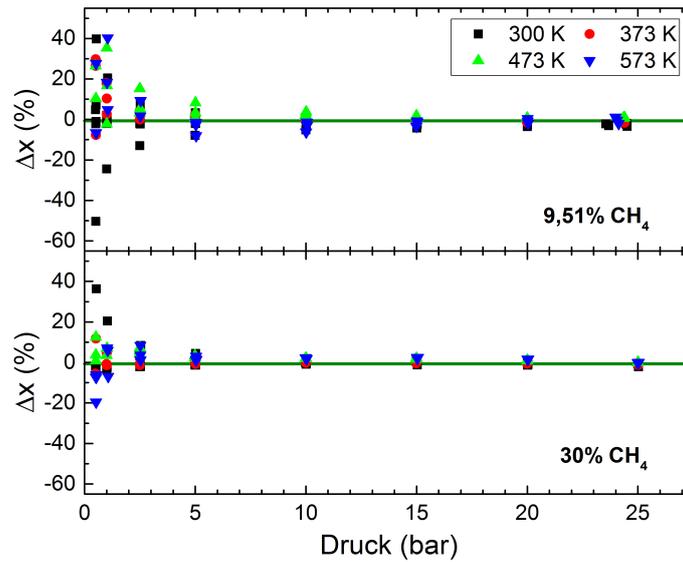


Abbildung 5.18: Abweichungen Δx im quantifizierten Stoffmengenanteil für die Druckzellenmessungen bei unterschiedlichen Drücken und Temperaturen nach Anwendung einer Kalibration mit dem Fixpunkt (1,1). Verwendet wurden Gasmischungen mit 9,51% (oben) und 30% (unten) CH_4 in N_2 .

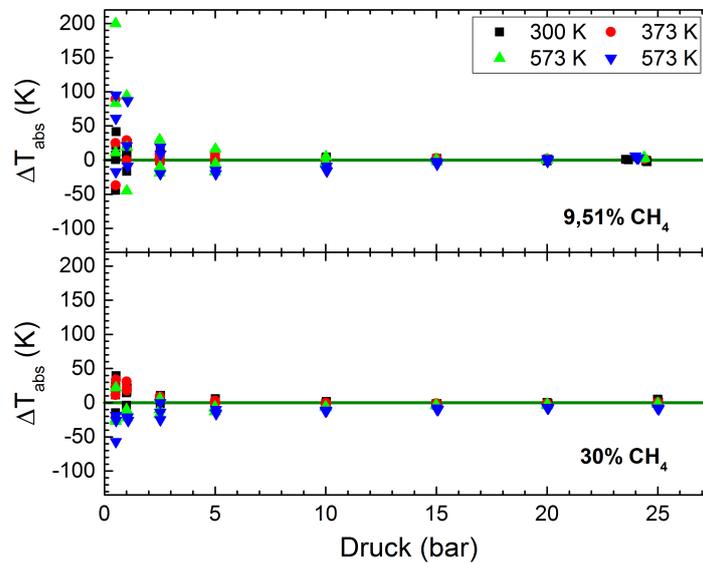


Abbildung 5.19: Abweichungen ΔT in der quantifizierten Temperatur für die Druckzellenmessungen bei unterschiedlichen Drücken und Temperaturen nach Anwendung der Kalibration mit dem Fixpunkt (1,1). Verwendet wurden Gasmischungen mit 9,51% (oben) und 30% (unten) CH_4 in N_2 .

6 Quantifizierung im Saugrohr

Nach der Validierung der Quantifizierungsstrategie mittels Druckzellenmessungen, wird das ICOS-System in diesem Kapitel in Verbindung mit der Saugrohrsonde getestet. Dafür wird zunächst der optische Aufbau der Sonde am Strömungskanal nachgebildet, um unter definierten Bedingungen Kalibrations- und Validierungsmessungen durchführen zu können. Anschließend wird der erste Prototyp der Saugrohrsonde im Versuchsmotor 1 getestet. Mit Hilfe von Modifikationen am Ansaugtrakt sind auch hier Validierungsmessungen möglich. Anschließend werden die Einspritzung von Methan im normalen Motorbetrieb und Variationen der Einspritzparameter quantifiziert. Ein weiterentwickelter Prototyp kommt bei Validierungsmessungen in Versuchsmotor 2 zum Einsatz. Alle Messungen werden mit der 1-Filter-Methode durchgeführt. Die 2-Filter-Methode liefert nach aktuellem Stand ein noch zu geringes Signal-Rausch-Verhältnis für belastbare Messungen in Verbindung mit der Saugrohrsonde. Dies gilt insbesondere in Hinblick auf die erreichbare Genauigkeit bei der Temperaturbestimmung (siehe Abb. 5.17) bei Drücken < 2 bar, welche im Saugrohr vorherrschen. Weiterhin sind die zu erwartenden Temperaturvariationen im Saugrohr unter den gegebenen Versuchsbedingungen so gering, dass eine dynamische Messung der Temperatur nicht erforderlich erscheint.

6.1 Vorversuche am Strömungskanal

Der optische Aufbau der Saugrohrsonde wird am Strömungskanal nachgebildet, um diesen zu testen und unter definierten Bedingungen Messungen durchführen zu können. Im Detail sind Aufbau und Durchführung der hier vorgestellten Experimente in Kap. 4.5 beschrieben. Zur Herstellung definierter CH_4 -Luft-Gemische kommt ein Mischmodul wie in Abb. 4.14 gezeigt zum Einsatz. In Abb. 6.1 sind Rohsignale, d.h. die Spannungsausgabe des CH_4 -Detektors für Messungen mit Umgebungsluft und Luft/ CH_4 -Mischung für $\lambda = 0,25$ gegen die Zeit für die Dauer einer kompletten Messung aufgetragen. Anhand dieser Daten lässt sich die Funktion des Mischmoduls verifizieren. Die Peak-to-Peak-Spannung beträgt 0,015 V bzw. 0,04 V ohne bzw. mit CH_4 im Kanal, was 0,6% bzw. 2,2% des Signals entspricht. Das heißt, in der Messung mit CH_4 ergeben sich Signalschwankungen, die über das reine Rauschen des Detektionssystems hinausgehen. Hierbei ist zu beachten, dass das Signal einer Mittelung über den Strahldurchmesser (≈ 8 mm) und die Absorptionslänge (56 mm) entspricht. Das Mischmodul erzeugt also kein absolut homogenes Gemisch. Die in Abb. 6.1 dargestellte Messung entspricht dabei dem Fall stärkster Signalschwankungen bei den hier vorgenommenen Messungen. Bei Messungen mit anderen Gemischen sind die Signalschwankungen stets kleiner. Für die Kalibrationsmessungen werden nur über die gesamte Messung gemittelte Werte betrachtet. Daher ist es sinnvoll die Standardabweichung des Signals zu betrachten, welches bei der gezeigten Luft/ CH_4 -Mischung 0,005 V beträgt. Verglichen mit einem Signalunterschied von 0,58 V im Mittel zwischen Messungen mit und ohne CH_4 entspricht dies einer relativen Unsicherheit von weniger als 1%. Daher ist anzunehmen, dass das Mischmodul Luft/ CH_4 Mischungen erzeugt, die für die angedachten Kalibrationsmessungen homogen genug sind.

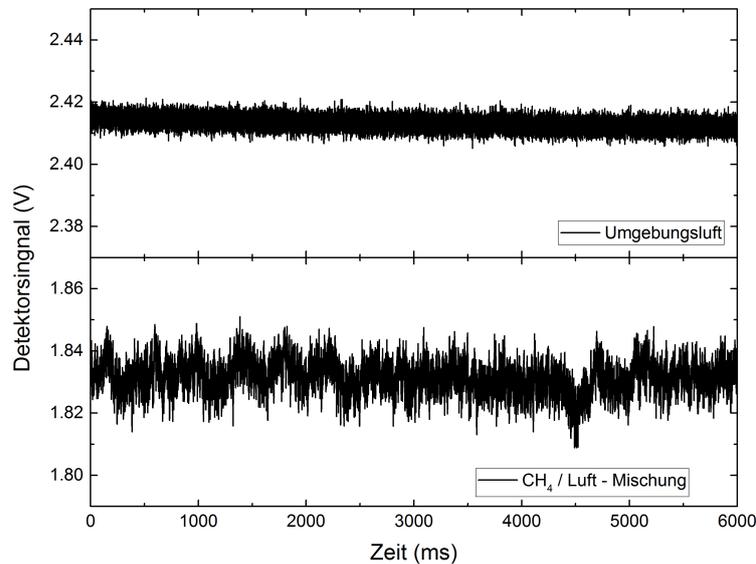


Abbildung 6.1: Rohsignale des CH_4 -Detektors für eine Messung mit Umgebungsluft (oben) und Luft/ CH_4 -Mischung bei $\lambda = 0,25$ (unten).

Bei den hier vorgenommenen Messungen am Strömungskanal und am Motor bei Verwendung der Saugrohrsonde ist ein großer Teil des Strahlengangs der Umgebungsluft ausgesetzt. Im Fall der Saugrohrsonde beträgt die offene Strecke an Umgebungsluft etwa 50 cm, am Strömungskanal ist diese Strecke etwa halb so lang. Wie in Abb. 4.3 zu sehen, überlagern sich Teile des H_2O -Spektrums mit dem CH_4 -Spektrum, sodass ersteres auch durch den Bandpassfilter des ICOS-Systems erfasst wird. Daher muss untersucht werden, inwieweit Luftfeuchtigkeit und damit eine Absorption durch die Umgebungsluft die Messungen beeinflussen kann. Aus der HITRAN-Datenbank wurde hierzu der Absorptionsquerschnitt von H_2O mit einer Auflösung von $0,01 \text{ cm}^{-1}$ bei 300 K und 1 bar erzeugt, was den Umgebungsbedingungen entspricht. Mit dem Absorptionsquerschnitt und der Transmissionskurve des CH_4 -Bandpassfilters kann das durch die Absorption von H_2O hervorgerufene Transmissionsignal berechnet werden. Unter der Annahme einer Luftfeuchtigkeit von 100% ($\approx 3\% \text{ H}_2\text{O}$ bei Raumtemperatur) und einer Absorptionsstrecke von 50 cm, was der offenen Strecke an Luft entspricht ist die integrierte Transmission im CH_4 -Filter $\approx 99,7\%$. Bei einem typischen Detektorsignal von 2,5 V liegt die Signalveränderung durch die von Luftfeuchtigkeit hervorgerufene Absorption im schlimmsten Fall damit unterhalb des Rauschens von 0,015 V. Somit ist der Einfluss von Wasser in den hier gemachten Messungen vernachlässigbar.

Als erster Schritt vor den eigentlichen Kalibrationsmessungen wurde validiert, dass die Strömungsgeschwindigkeit keinen Einfluss auf die Messungen hat. Dafür wurde ein optischer Aufbau in Durchlichtgeometrie am Kanal verwendet. Es wurden bei unterschiedlichen Strömungen unterschiedliche λ -Werte eingestellt und vermessen. Das Ergebnis dieser Messungen ist in der Einfügung in Abb. 6.2 gezeigt und bestätigt, dass die gemessene Transmission vom eingestellten λ -Wert abhängt jedoch weitgehend unabhängig von der gewählten Strömungsgeschwindigkeit ist.

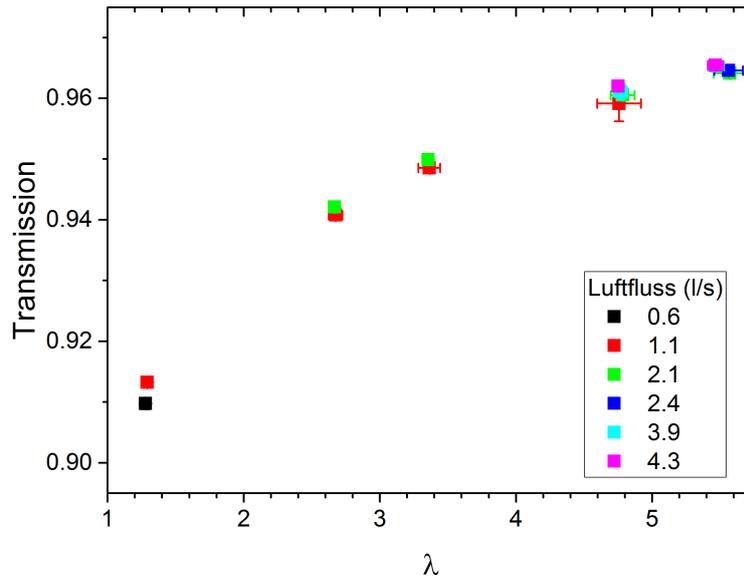


Abbildung 6.2: Mit dem 1-Filter-ICOS-System im Strömungskanal gemessene Transmission gegen den eingestellten λ -Wert für unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten.

Der optische Zugang zum Strömungskanal ist über Quartzfenster realisiert. Diese haben einen spektralen Einfluss auf die Messungen, der bei Verwendung der Saugrohrsonde oder des Zündkerzensensors nicht vorhanden ist. Daher müssen separate Kalibrationsmessungen unabhängig von den Messungen an der Druckzelle durchgeführt werden. Für die Kalibrationsmessungen werden, wie unter Kap. 4.5 beschrieben per MFC und Mischmodul unterschiedliche λ -Werte eingestellt und vermessen. Die Messungen geschehen mit dem optischen Aufbau in Reflexion, wie in Abb. 4.14 gezeigt, welcher dem Aufbau der Saugrohrsonde entspricht. Dabei wird jede Messung 6-mal wiederholt, anschließend der Mittelwert gebildet und als Fehler das 95%-Konfidenzintervall berechnet. Der Fehler des λ -Wertes wird über Fehlerfortpflanzung aus der Messunsicherheit des MFCs berechnet. In Abb. 6.3 sind die gemessenen Transmissionen gegen den λ -Wert aufgetragen und mit Berechnungen basierend auf der HITRAN-Datenbank verglichen (rote Kurve). Die Berechnungen erfolgen auf Grundlage einer Look-up-Tabelle wie unter Kap. 4.3.2 beschrieben. Hierbei wurde eine Temperatur von 298 K und ein Druck von 1 bar angenommen, was den Bedingungen im Labor entspricht. Die spektralen Einflüsse, welche in der Berechnung der Look-up-Tabelle berücksichtigt werden (siehe Gl. 4.1), sind um die Transmission der Quartzfenster erweitert worden. In Abb. 6.4 sind ein Methanspektrum, die Transmis-

sionskurve des Bandpassfilters, sowie der weiteren in der Berechnung berücksichtigten Komponenten mit spektralem Einfluss gezeigt. Die Transmissionskurve des Quarzfensters wurde dabei per FTIR-Spektrometer vermessen. Über ein Differenzdruckmessgerät wurde ermittelt, dass der Druckabfall im Kanal durch die Strömung in der Größenordnung von 10 mbar liegt. Bei diesen Umgebungsbedingungen ist der Einfluss von Druck und Temperatur auf die berechnete Transmission vernachlässigbar. Ein Druckunterschied von 200 mbar erzeugt einen Unterschied von $\approx 1\%$ in der berechneten Transmission. Ein Temperaturunterschied von 40 K resultiert in einem Unterschied von $\approx 0,2\%$. Damit ist es legitim mit konstanten Umgebungsbedingungen zu rechnen. In Abb. 6.3 zeigt sich, dass es mit steigendem λ -Wert zu größeren Abweichungen zwischen Messdaten und Berechnungen (rote Kurve) kommt, wodurch eine Kalibration erforderlich wird. Weiterhin ist zu erkennen, dass Berechnungen, welche allein den Bandpassfilter berücksichtigen (grüne Kurve) deutlich größere Abweichungen zu den Messungen produzieren.

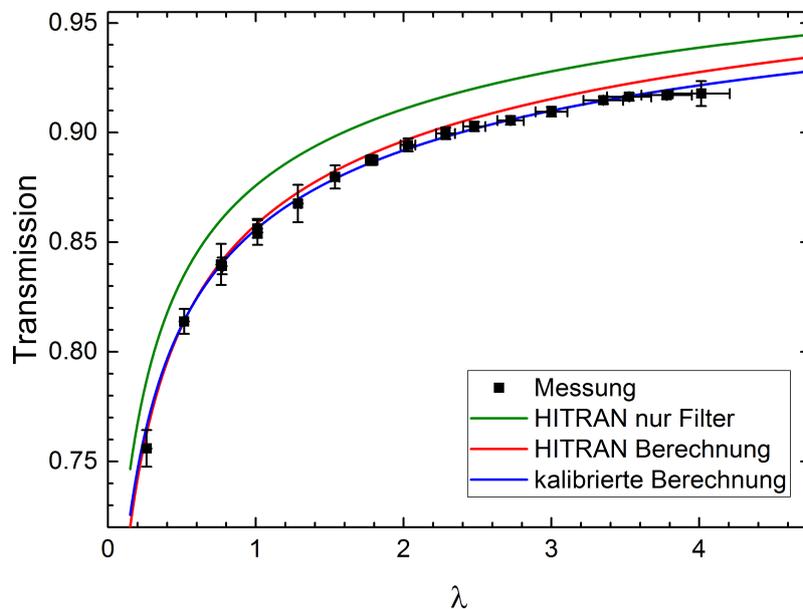


Abbildung 6.3: Auftragung der gemessenen Transmission im Strömungskanal zur Kalibration und Vergleich mit Berechnungen auf Basis der HITRAN-Datenbank.

Die Abweichung zwischen Messung und Berechnung können durch Ungenauigkeiten in der Bestimmung der Absorptionsstrecke und der spektralen Einflüsse entstehen. Weiterhin können Abweichungen zwischen den Daten der HITRAN-Datenbank und realen Absorptionsquerschnitten nicht ausgeschlossen werden. Diese Einflüsse sind vermutlich eher klein, in Summe können diese die beobachteten Abweichungen jedoch erklären. Um die Abweichungen zu minimieren, wird wie in Kap. 5 eine Kalibration auf die Berechnungen angewendet. Dazu werden gemessene gegen berechnete Transmissionswerte wie in in Abb. 6.5 gezeigt gegeneinander aufgetragen. Es ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen gemessener Transmission τ_{mess} und berechneter Transmission τ_{calc} , der über

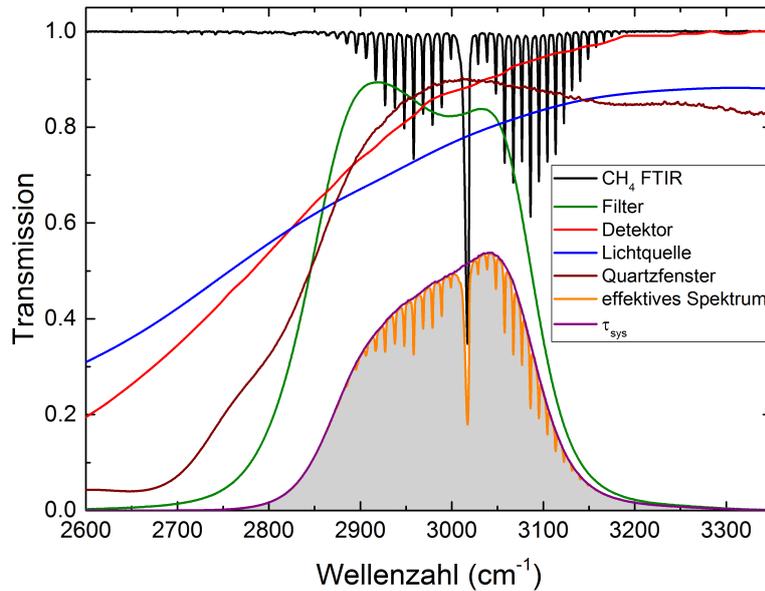


Abbildung 6.4: Methanspektrum aus FTIR-Spektrometermessungen, Transmissionskurve des Bandpassfilters im ICOS-System sowie weitere spektrale Einflüsse auf die Detektion. Die graue Fläche entspricht dem vom Detektor des ICOS-Systems gemessenen Signal.

eine lineare Regression quantifiziert wird zu:

$$\tau_{mess} = 0,94(1) \cdot \tau_{calc} + 0,05(1). \quad (6.1)$$

Da sich die gemessenen Transmissionswerte hier verglichen mit den Druckzellenmessungen in Kap. 5.2 deutlich über Werten von 0,4 liegen, ist keine Kalibration über ein Polynom notwendig. Die Abweichung der Daten vom linearen Verhalten zu hohen Transmissionswerten kann durch einen systematischen Fehler des MFCs entstehen. Bei diesen Messpunkten arbeitete der MFC nahe des unteren Durchflusslimits, wodurch die relative Ungenauigkeit steigt. Laut Hersteller kann es hierbei zu reproduzierbaren, systematischen Abweichungen des realen Durchflusses gegenüber dem eingestellten Wert kommen. Die Abweichung der unkalibrierten Berechnungen zu den Messwerten ist maximal 1.1% und im Mittel 0,5%. Nach der Kalibration sinken diese Werte auf 0,5% im Maximum und 0,2% im Mittel, was die Qualität der Kalibration verdeutlicht. Die relative Abweichung wurde hier berechnet als 1 minus dem Verhältnis aus berechneter zu gemessener Transmission.

Als nächster Schritt erfolgt auf Grundlage der kalibrierten Berechnungen die Quantifizierung einer Eindüsung von CH_4 in den Kanal bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten. Als Injektor kommt ein handelsüblicher Gasinjektor für PKW-Motoren zum Einsatz. Dieser ist mit 7 bar Druck beaufschlagt und die Eindüsungzeit beträgt 7 ms, was ebenfalls typischen Werten entspricht. Die Messdauer beträgt 1200 ms und die Eindüsung beginnt 200 ms nach Messbeginn. Die Messposition ist etwa 5 mm von der Öffnung des Injektors entfernt.

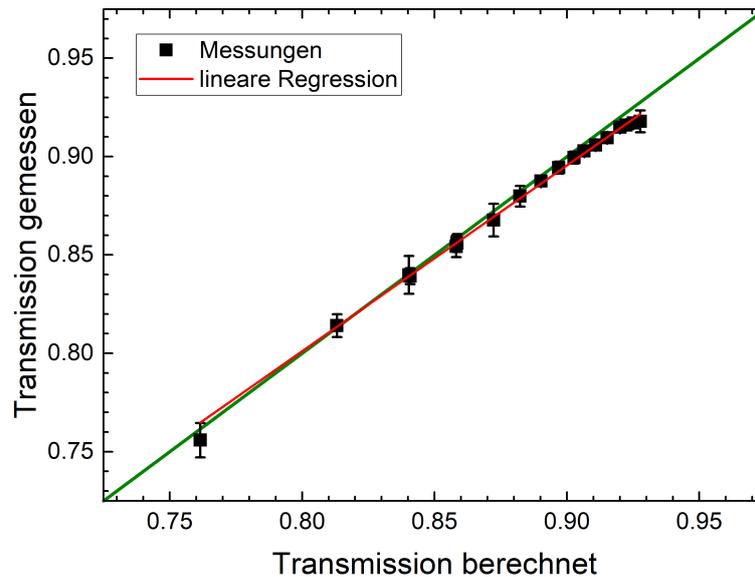


Abbildung 6.5: Auftragung gemessener gegen berechneter Transmission für Messungen mit dem ICOS-1-Filter-System im Strömungskanal sowie lineare Regression. Die grüne Linie stellt die ideale Übereinstimmung dar.

In Abb. 6.6 sind die gemessenen, mittleren Transmissionsverläufe sowie die daraus quantifizierten Lambda-Werte bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten gegen die Messzeit aufgetragen. Die gemessene Transmission fällt direkt nach Beginn der Eindüsung stark ab. Die Unterschiede in den Strömungsgeschwindigkeiten sorgen hier für einen zeitlichen Versatz des Abfalls von lediglich wenigen Millisekunden. Dem Einbruch der Transmission folgt ein Anstieg, welcher abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit ist und bedingt wird durch das Entfernen von CH_4 aus der Messposition. Dies dauert um so länger, je niedriger die Geschwindigkeit ist. Bei den langsamen Strömungsgeschwindigkeiten (schwarze und rote Kurve) ist erst kurz vor Beginn der nächsten Eindüsung das gesamte Methan entfernt. Demgegenüber benötigt dieser Vorgang bei den höheren Geschwindigkeiten (grüne und blaue Kurve) weniger als 100 ms.

Die Quantifizierung der λ -Werte in Abb. 6.7 wurde auf einen maximalen Wert von $\lambda = 10$ limitiert. Dies entspricht etwa 1% CH_4 und einem Transmissionsignal von $\approx 0,96$ unter den gegebenen Messbedingungen. Auch wenn höhere Transmissionsignale noch auflösbar wären, passt das gesetzte Limit zu typischen Motoranwendungen. Größere Werte als $\lambda = 10$ sind dort in der Regel nicht relevant. Aufgrund dieses Limits und der Definition des λ -Wertes (siehe Gl. 2.11) ist in Abb. 6.7 das zuvor anhand der Transmission beobachtete Verhalten nochmals stärker ausgeprägt. Bei der höchsten Strömungsgeschwindigkeit wird der Großteil des Methans innerhalb von 12 ms aus der Messstelle entfernt. Bei den niedrigeren Geschwindigkeiten sind es 320 ms bzw. 200 ms. Der anfängliche Einbruch erreicht $\lambda = 0,5$, was einer Konzentration von $\approx 17,4\%$ CH_4 entspricht, unabhängig von der Strömung.

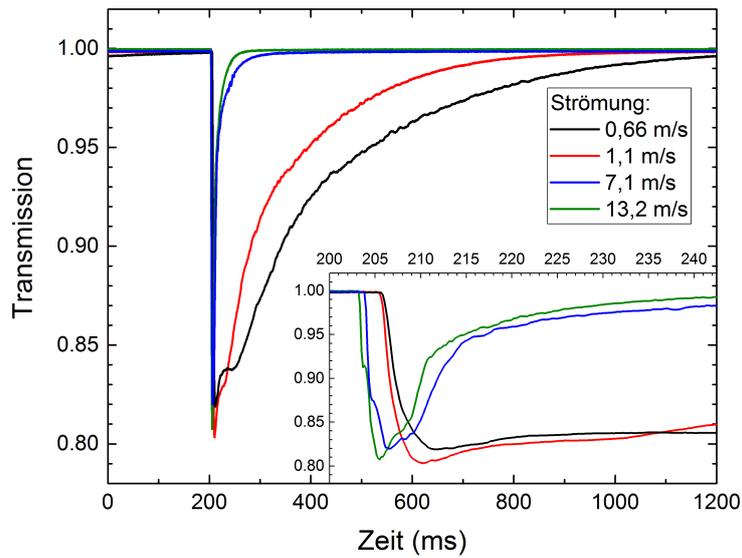


Abbildung 6.6: Verlauf der gemessenen Transmission bei Eindüsung von Methan in den Strömungskanal für unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten. Die Einfügung unten rechts zeigt eine Vergrößerung auf die Zeit kurz nach Beginn der Eindüsung.

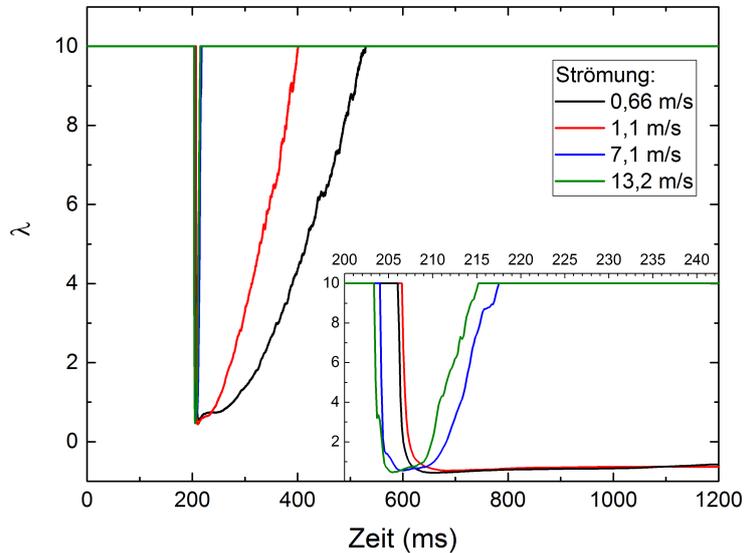


Abbildung 6.7: Verlauf des quantifizierten Lambda-Wertes bei Eindüsung von Methan in den Strömungskanal für unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten. Die Einfügung unten rechts zeigt eine Vergrößerung auf die Zeit kurz nach Beginn der Eindüsung.

6.2 Validierungsmessungen am Motor

Nach erfolgreicher Validierung des Messprinzips am Strömungskanal ist der nächste Schritt Messungen am Motor mit der Saugrohrsonde durchzuführen. Hierfür wird der unter Kap. 4.8 beschriebene und in Abb. 4.16 gezeigte modifizierte Einlasstrakt an Versuchsmotor 1 verwendet, welcher Validierungsmessungen ermöglicht. Die Zufuhr von Gas erfolgt aus einer Flasche mit vorgemischtem CH_4/N_2 -Gemisch äquivalent zu $\lambda = 4,06$ und $\lambda = 1,0$, sodass kein CO_2 oder H_2O im Messvolumen vorhanden sind. Die Kalibration der HITRAN-Berechnungen erfolgt anhand von Druckzellenmessungen des verwendeten 1-Filter-ICOS-Systems für die Methandetektion wie in Kap. 4.4 beschrieben. Hierfür werden nur die für die Saugrohrmessungen relevanten Messpunkte bis zu einer Transmission von $\approx 0,75$ betrachtet. Die Auftragung gemessener τ_{mess} gegen berechneter Transmission τ_{calc} in Abb. 6.8 zeigt in diesem Bereich ein lineares Verhalten mit Abweichungen zur idealen Geraden (grün). Eine lineare Regression (blau) liefert folgendes Ergebnis:

$$\tau_{\text{mess}} = 1,035(4) \cdot \tau_{\text{calc}} - 0,037(4). \quad (6.2)$$

Insbesondere ist hier zu beachten, dass die Daten zeigen, dass die Kalibration unabhängig von der Temperatur ist. Die Messungen bei 300 K und 473 K stimmen innerhalb der jeweiligen Fehlerbalken überein.

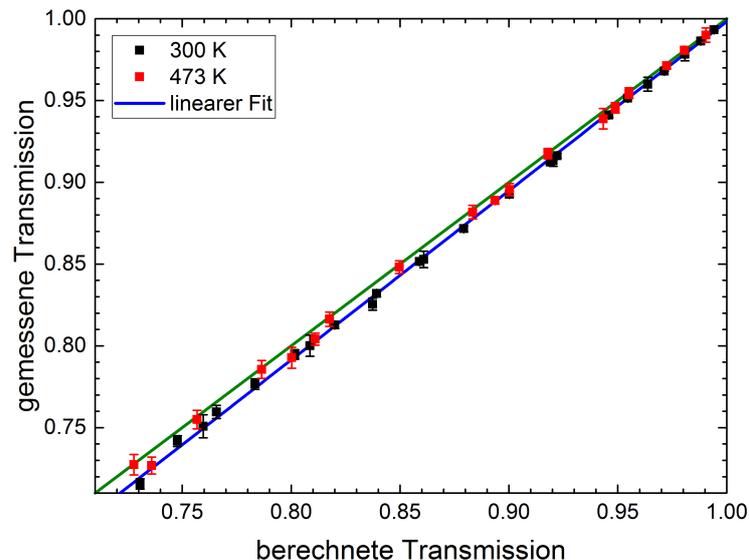


Abbildung 6.8: Kalibrationsdaten des 1-Filter-ICOS-Systems für Messungen mit der Saugrohrsonde bei zwei Temperaturen. Die grüne Linie zeigt die ideale Übereinstimmung zwischen gemessener und berechneter Transmission.

In Abb. 6.9 sind normierte Rohsignale der Detektionskanäle CH_4 und $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ gegen den Kurbelwinkel für eine Messung mit und ohne Methan aufgetragen. Es ist deutlich zu erkennen, dass das Signal Fluktuationen aufweist. Diese resultieren sehr wahrscheinlich aus den

Vibrationen des Motors welche sich auf das optische System der Saugrohrsonde übertragen. Die Fluktuationen ähneln sich in den beiden gezeigten Detektionskanälen, sodass der $\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O}$ -Kanal als Referenz zur Signalkorrektur benutzt wird. Für die Signalkorrektur würde üblicherweise der im Standard-ICOS-System vorhandene Referenzkanal benutzt werden, jedoch ist dieser im hier verwendeten, modifizierten ICOS-System nicht eingebaut. Daher wird hier als Korrekturfaktor das Verhältnis aus dem Signal des $\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O}$ -Kanals während der Messung zum Mittelwert dieses Signals während der Hintergrundmessung gebildet. Das Hintergrundsignal I_0 ist hierbei der Mittelwert des CH_4 -Signals während der Hintergrundmessung. Durch die Multiplikation mit dem Korrekturfaktor ergibt sich eine kurbelwinkel- bzw. zeitaufgelöste Signalkorrektur, deren Ergebnis die blaue Kurve in Abb. 6.9 beispielhaft darstellt. Diese Korrektur ist möglich, da bei Verwendung fester CH_4/N_2 -Gemische aus Gasflaschen kein CO_2 und H_2O vorhanden sind, die das Signal im $\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O}$ -Kanal beeinflussen könnten. Die hier gezeigten Kurven sind alle über 100 Zyklen gemittelt. In diesem Fall war kein Unterschied festzustellen, ob Signalkorrektur und Quantifizierung vor oder nach der Mittelung angewendet werden.

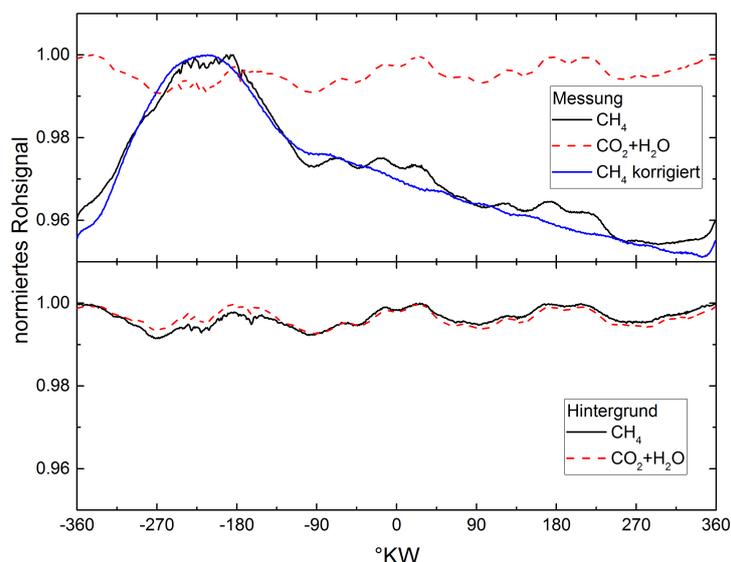


Abbildung 6.9: Normierte Rohsignale gegen Kurbelwinkel für die Detektionskanäle CH_4 und $\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O}$ jeweils für eine Messung mit (oben) und ohne Methan (unten).

In Abb. Abb. 6.10 sind die anhand der in den Validierungsmessungen gemessenen Signale quantifizierten λ -Werte für die $\lambda = 4,06$ (unten) und $\lambda = 1,0$ -Gemische (oben) gegen den Kurbelwinkel aufgetragen. Die grüne Linie zeigt den nominellen Wert der jeweiligen Gasmischung an. Bei beiden Messungen war es nicht möglich die Signalfuktuationen vollständig zu eliminieren. Dies könnte daran liegen, dass durch die Vibration die Einkopplung in die Detektionsfaser beeinflusst wird. Dadurch ergäbe sich ein wellenlängenabhängiger Effekt, sodass eine vollständige Korrektur eines Kanals durch einen anderen nicht möglich wäre. Trotzdem sind die vorhandenen Fluktuationen mit 0,3% bzw. 0,4% für $\lambda = 1,0$ und $\lambda = 4,06$ im Bereich von -90 bis 360 °KW verhältnismäßig klein.

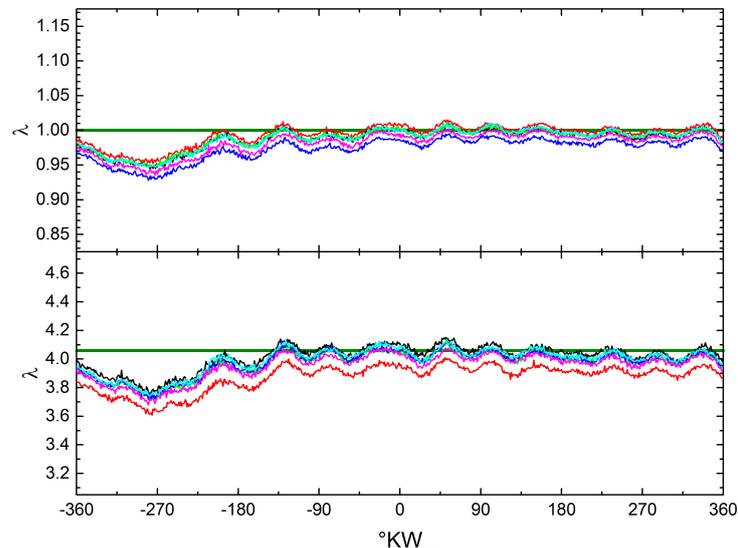


Abbildung 6.10: Quantifizierte λ -Werte aus den Validierungsmessungen gegen den Kurbelwinkel aufgetragen für fünf Messungen die jeweils über 100 Zyklen gemittelt wurden. Die nominellen Werte der Gasmischungen, $\lambda = 4,06$ (unten) und $\lambda = 1,0$ (oben) sind als grüne Linie eingezeichnet.

Des Weiteren ist in Abb. 6.10 zwischen -360 und -90 °KW ein Einbruch im quantifizierten λ -Wert sichtbar. Dieser resultiert vermutlich aus einer falsch angenommenen Temperatur in der Quantifizierung. Diese wird, wie beim Strömungskanal, als konstant angenommen, da über das im Saugrohr angebrachte Thermoelement nur eine mittlere Temperatur gemessen werden kann. Allerdings kommt es beim Öffnen der Einlassventile zu einem deutlichen Einbruch des Druckes um $\approx 30\%$ (siehe Abb. 6.11 oben), da aus der Gasflasche, welche das CH_4/N_2 -Gemisch bereitstellt, nicht schnell genug Gas nachgeliefert werden kann, um den Druck konstant zu halten. Auf Basis der HITRAN-Berechnungen kann abgeschätzt werden, dass ein Absinken der Temperatur um etwa 20 K den Einbruch im λ -Wert erklärt. Im Vergleich mit einem regulärem Motorbetrieb (siehe Abb. 6.11 unten) wird deutlich, dass dieses Verhalten eine spezielle Eigenheit der Validierungsmessungen ist. Daher ist der Einbruch im λ -Wert ein Artefakt der Messbedingungen. Dabei resultiert aus der falsch angenommenen Temperatur, wie oben beschrieben, nur ein kleiner Fehler in der quantifizierten Methandichte. Die Temperatur wirkt sich jedoch in größerem Maße auf die Berechnung der Gesamtgasdichte aus, welche zur Bestimmung des λ -wertes benötigt wird.

Die unterste, rote Kurve im unteren Teil von Abb. 6.10 weicht klar von den anderen Messungen ab. Die zu diesen Kurven gehörenden Transmissionswerte auf denen die in der Grafik gezeigten, quantifizierten λ -Werte beruhen liegen im Bereich von etwa 0,95. Damit ist die Quantifizierung des λ -wertes sehr sensitiv auf Änderung des Hintergrundsignals I_0 .

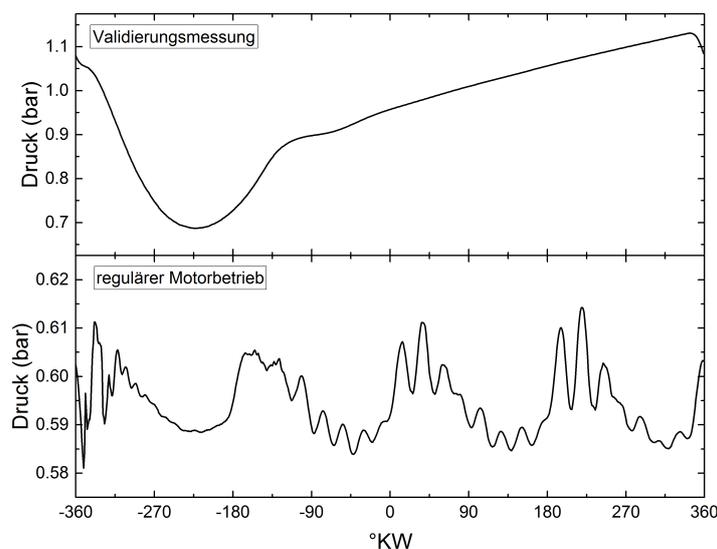


Abbildung 6.11: Druckverlauf im Saugrohr während eines Motorzyklus bei den Validierungsmessungen (oben) und beim regulären Motorbetrieb ohne modifizierten Ansaugtrakt (unten).

Die Intensität und das Spektrum der Lichtquelle variieren im Verlauf der Zeit aufgrund von Temperaturfluktuationen der Lampe. Dies beeinflusst die Berechnung der Transmissionswerte aus den gemessenen Signalen. Daher kann das wahre Hintergrundsignal vom eigentlich angenommenen abweichen, wenn die Zeit zwischen Hintergrund- und eigentlicher Messung zu lang wird (Größenordnung wenige Minuten). Diese Signalvariation kann durch andere Detektionskanäle nicht vollständig kompensiert werden. Im vorliegenden Fall reicht eine Änderung des I_0 -Signals um 0,15%, um die erwähnte Kurve in Abb. 6.10 auf das Niveau der anderen Kurven zu schieben. Diese Sensitivität auf das Hintergrundsignal ist eine spezielle Herausforderung der Validierungsmessungen. In Messungen mit Eindüsung des Methans kann das I_0 -Signal während des Zyklus zu Zeitpunkten bestimmt werden, an denen kein Methan in der Messstrecke vorhanden ist (z.B. nach Schließen der Einlassventile und vor Beginn der nächsten Eindüsung).

Der für die Messungen verwendete Prototyp der Saugrohrsonde leidet unter dem Problem von Reflexionen am eingebauten Saphirfenster. Die Reflexionen entstehen beim Übergang des IR-Lichts von Luft zu Saphir und umgekehrt auf dessen Weg vom Strahlteiler zum Messvolumen. Dadurch wird auf dem Detektor des ICOS-Systems ein zusätzliches Signal produziert, welches bis zu 25% des Gesamtsignals ausmachen kann. Durch gezielte Justage der Optik konnte dies auf 10-15% reduziert werden. Dabei wurden Strahlteiler und Linsen so justiert, dass das IR-Licht in einem leichten Winkel auf das Saphirfenster trifft. Weiterhin wurde die Höhe dieses Dunkelsignals vor und nach den Experimenten im Saugrohr gemessen und von den eigentlichen Messsignalen abgezogen. Jedoch kann es während der Messung im Saugrohr zu Schwankungen des Dunkelsignals kommen, welche so nicht korrigierbar sind. Diese Schwankungen erzeugen eine zusätzliche Unsicherheit auf den Ergebnissen der Validierungsmessungen. Dieses Problem wird im Prototyp zweiter Generation durch Verkipfung des Saphirfensters um 5° gelöst (siehe Kap. 6.4).

Um die Präzision der Messungen abzuschätzen, wurde der mittlere λ -Wert und das zugehörige 95%-Konfidenzintervall über alle Messwerte zu $\lambda = 3,96 \pm 0,10$ und $\lambda = 0,985 \pm 0,016$ bestimmt. Dies entspricht einer Präzision von $\approx 3\%$ bzw. $\approx 2\%$. Die Genauigkeit wird abgeschätzt, indem die Abweichung zum nominellen Wert berechnet und anschließend gemittelt wird. Daraus resultiert eine Genauigkeit von 2,5% bzw. 1,6% für $\lambda = 4,06$ bzw. $\lambda = 1,0$. Wird nur der Bereich ohne Beeinflussung durch den Temperatureinbruch (-90 bis 360 °KW) betrachtet verbessern sich diese Werte auf eine Präzision von $\lambda = 0,994 \pm 0,015$ sowie $\lambda = 4,01 \pm 0,10$ und eine Genauigkeit von 0,8% bzw. 1,4%.

6.3 Realbetrieb am Motor

Für diese Messungen wurden die Modifikationen am Ansaugtrakt aus Abb. 4.16 entfernt, sodass der Motor wieder im ursprünglichen Zustand läuft und Messungen mit Eindüsung von Methan möglich sind. Das heißt, durch das Saugrohr des Motors wird Frischluft angesaugt und die Zugabe von Methan erfolgt über den Gasinjektor im Saugrohr. Die Messposition bleibt gegenüber den Validierungsmessungen unverändert und liegt vom Gasinjektor stromabwärts in Richtung Einlassventil. Mit dieser Konfiguration ist es möglich die Funktion des Messsystems unter realen Betriebsbedingungen zu demonstrieren.

In Abb. 6.12 sind normierte Rohsignale des Detektors des CH_4 - und des $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ -Kanals gegen den Kurbelwinkel aufgetragen. Im Vergleich zu den Rohsignalen bei den Validierungsmessungen sind deutliche Unterschiede in den Signalfluktuationen erkennbar. Der Unterschied lässt sich durch den Unterschied im Motorbetrieb erklären, welcher eine andere Druckkurve (siehe Abb. 6.11 unten) und damit auch andere Vibrationen des Motors zur Folge hat. Beide in Abb. 6.12 gezeigten Detektionskanäle erfahren die gleichen, harmonisch wirkenden Variationen bei gleicher Frequenz und sehr ähnlicher Amplitude ($\approx 0,1\%$ Unterschied). Weiterhin ist eine Phasenverschiebung zwischen Hintergrund- und eigentlicher Messung zu beobachten, welche in der Grafik durch die blau gestrichelten Linien hervorgehoben ist. Diese Phasenverschiebung resultiert vermutlich aus dem unterschiedlichen Motorverhalten bei geschlepptem und gezündetem Betrieb mit Eindüsung (entsprechend Hintergrund- und eigentlicher Messung). Es wird die gleiche Signalkorrektur wie für die Validierungsmessungen verwendet. Da die Luft für den Motor aus dem Labor angesaugt wird ist anzunehmen, dass sich auf der Zeitskala einer Messung der CO_2 - und H_2O -Gehalt nicht ändert und das Signal damit keine sonstigen Variationen erfährt.

Zunächst wird die Wiederholbarkeit der Messungen überprüft. Dazu werden sechs Messungen zu je 100 Zyklen unter gleichbleibenden Motorbedingungen durchgeführt und gemittelt. In Abb. 6.13 sind die quantifizierten Stoffmengenanteile gegen den Kurbelwinkel als Ergebnis der Messungen aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die Kurven nur wenig voneinander abweichen. Im Vergleich zu den Validierungsmessungen wird hier statt des λ -Wertes der Stoffmengenanteil gezeigt, um auch Variationen in Bereichen geringer CH_4 -Dichten sichtbar zu machen. Der rasche Anstieg und anschließende Abfall des Stoffmengenanteils im Bereich von etwa -340 bis -270 °KW lässt darauf schließen, dass nach der Einspritzung eine breite Methanwolke das Messvolumen durchläuft und dann in den Brennraum gesogen wird, wodurch der Stoffmengenanteil im weiteren Verlauf auf nahezu Null sinkt.

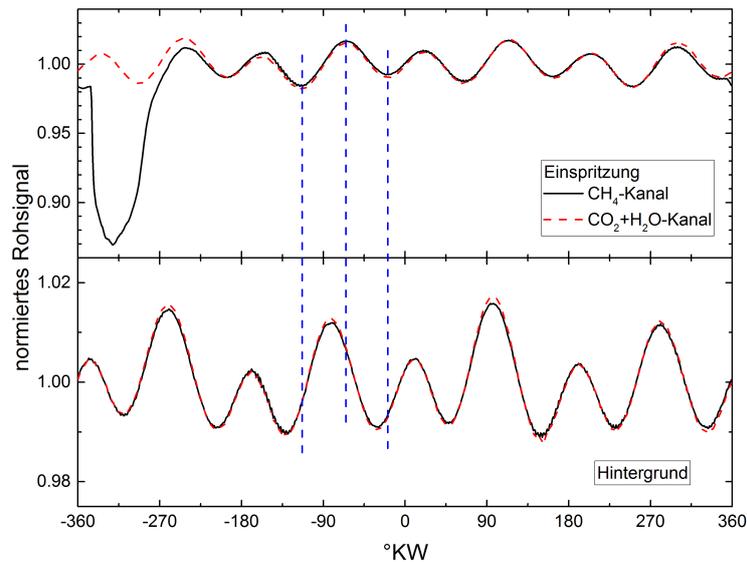


Abbildung 6.12: Signalfluktuationen im Saugrohr bei regulärem Motorbetrieb bei Messung mit Einspritzung von Methan (oben) und während der Hintergrundmessung ohne Methan (unten). Die blau gestrichelten Linien dienen der Hervorhebung der Phasenverschiebung zwischen den Signalen.

Um die Möglichkeiten des Messsystems zur Unterscheidung unterschiedlicher Motorbetriebsbedingungen zu zeigen, werden als nächstes die Einspritzparameter variiert. Wieder werden pro Messung 100 Zyklen aufgenommen und gemittelt. Im oberen Teil von Abb. 6.14 sind wieder die quantifizierten Stoffmengenanteile gegen den Kurbelwinkel bei Variation der Einspritzdauer gezeigt. Die eingestellten Einspritzdauern resultieren nach der λ -Sonde im Motor in λ -Werten von $\lambda = 0,96, 1,0$ und $1,1$. Die leicht unterschiedliche Breite der Methanwolke resultiert direkt aus den unterschiedlichen Einspritzdauern. Da alle Einspritzdauern zu brennbaren Gemischen führen, sind die Unterschiede in den gemessenen λ -Kurven eher klein, aber trotzdem sichtbar, was die Zeitauflösung des Messsystems unterstreicht. Im unteren Teil der Abb. 6.14 ist eine Variation des Einspritzbeginns gezeigt während der Motor in stöchiometrischem Betrieb ($\lambda = 1$) lief. Die unterschiedlichen Startzeiten der Einspritzung resultieren entsprechend in unterschiedlichen Zeiten, an denen die Methanwolke das Messvolumen im Saugrohr durchläuft. Bei einer Verschiebung des Einspritzbeginns auf -320 °KW, was dem Öffnungszeitpunkt des Einlassventils entspricht, ist eine Veränderung der Form der Methanwolke sichtbar. Dies lässt auf eine Beeinflussung der Gemischbildung im Saugrohr schließen. Insgesamt ist jedoch zu vermuten, dass die Vermischung zwischen Luft und Methan im Saugrohr in den hier durchgeführten Messungen gering ausfällt, da sonst keine so klar begrenzte Methanwolke sichtbar wäre.

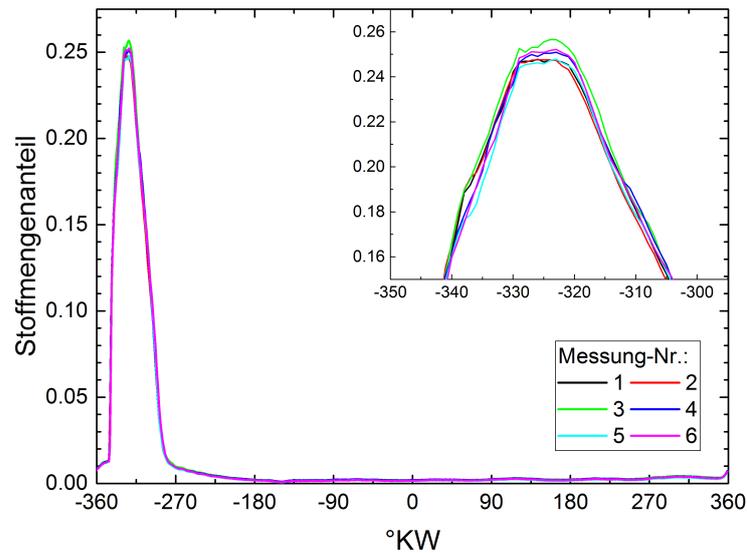


Abbildung 6.13: Quantifizierter Stoffmengenanteil während eines Zyklus bei regulärem Motorbetrieb mit Eindüsung von Methan für sechs Messungen zu je 100 Zyklen. Die Einfügung zeigt eine Vergrößerung auf das Maximum der Methanwolke.

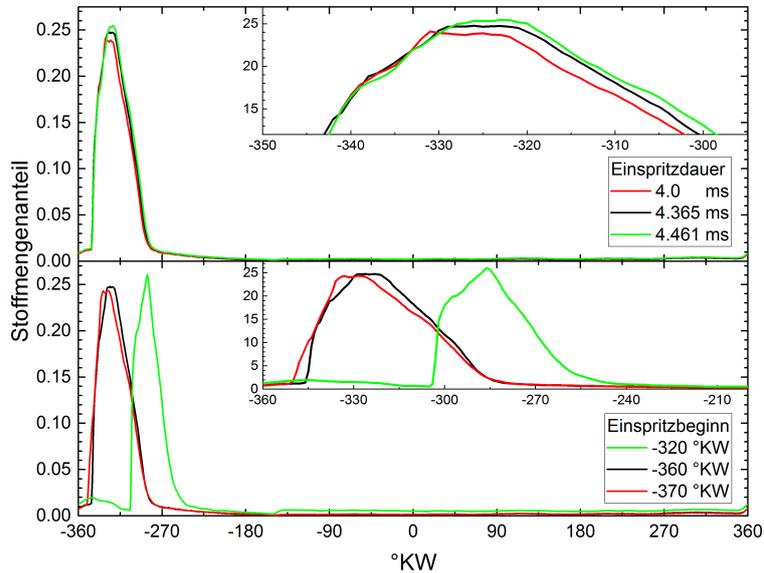


Abbildung 6.14: Quantifizierter Stoffmengenanteil bei regulärem Motorbetrieb unter Variation der Einspritzparameter. Für jede Messung wurden 100 Zyklen aufgenommen und gemittelt. Die Einfügung zeigt eine Vergrößerung auf den Bereich der Methanwolke.

6.4 Prototyp 2. Generation

Wie in Kap. 6.2 erwähnt hat die 1. Generation des Saugrohrsensoren-Prototyps ein Problem durch Reflexionen am Saphirfenster. Diese sorgen für ein zusätzliches Dunkelsignal auf dem Detektor, um welches die Signale korrigiert werden müssen, um eine Quantifizierung vornehmen zu können. Bei der 2. Generation der Saugrohrsonde wurde das Saphirfenster um 5° verkippt eingebaut, sodass die Rückreflexe von der Fensteroberfläche nicht mehr zum Detektionssystem gelangen. Nach der Justage der Optik wurde entsprechend überprüft, dass das Dunkelsignal, also das Signal auf den Detektoren ohne Retroreflektor im Strahlengang nur dem Rauschen des Detektionssystems entspricht.

Bei Messungen mit dem Prototyp 2. Generation kam ein gegenüber den Messungen mit dem Prototyp 1. Generation leicht verändertes ICOS-System zum Einsatz. Dieses ICOS-System besitzt einen Referenzkanal, welcher für die Signalkorrektur verwendet werden kann. Da dies bedeutet, dass der optische Aufbau der Detektionseinheit anders ist, wurden neue Kalibrationsmessungen durchgeführt. Vor den Messungen am Motor wurden daher Kalibrationsmessungen an einer Druckzelle durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Kalibration sind in Kap. 5.2 beschrieben und die Kalibrationsparameter finden sich in Gl. 5.1. Im Gegensatz zu den vorherigen Validierungsmessungen am Motor wird hier bei der Kalibration der betrachtete Bereich der Transmission nicht beschränkt. Dementsprechend ist die Kalibrationsfunktion ein Polynom 3. Ordnung und damit die gleiche wie bei anderen Anwendungsfällen des ICOS-Systems. Dies erlaubt eine konsistente Bewertung des Systems über Experimente mit unterschiedlichen Sonden hinweg.

Mit dem Prototypen der 2. Generation wurden an Versuchsmotor 2 (siehe Kap. 4.8) Validierungsmessungen durchgeführt. Dafür wurden über Massenflussregler Luft/Methan-Gemische entsprechend unterschiedlicher λ -Werte eingestellt. Vor jeder Messung mit Methan erfolgte eine Messung ohne Methan, um das Hintergrundsignal I_0 zur Berechnung der breitbandigen Transmission (siehe Gl. 4.1) bestimmen zu können. Die Messungen wurden bei einem mittleren Saugrohrdruck von 790 mbar, einer Motordrehzahl von 1500 U/min und einer mittleren Temperatur im Saugrohr von 22°C durchgeführt. Dynamische Druckänderungen werden am Prüfstand erfasst und fließen in die Auswertung ein, wohingegen die Temperatur jedoch nur im Mittel bekannt ist und daher für die Auswertung als konstant angenommen wird. Jede Messung besteht aus einer Mittelung über 100 Zyklen und wird dreimal wiederholt.

Die Signalkorrektur und die Quantifizierung des λ -Wertes erfolgen anhand der Einzelzyklen. Als Endergebnis werden die λ -Werte der Einzelzyklen über alle gemessenen Zyklen gemittelt. Die Signalkorrektur erfolgt auf die gleiche Art und Weise wie in Kap. 6.2 beschrieben. Allerdings wird hier der Referenzkanal als Korrektursignal verwendet. In Abb. 6.15 sind als Ergebnis der Quantifizierung der Verlauf des λ -Wertes über den Motorzyklus zusammen mit dem nominell eingestellten λ -Wert (blaue Linie) gezeigt. Bei allen Messungen ergibt sich kurz nach Zyklusbeginn ein starker Abfall im λ -Wert durch das Öffnen der Einlassventile und daraufhin eine kontinuierliche Zunahme im Laufe des Zyklus bei geschlossenem Einlass. Der Verlauf des λ -Wertes wird durch periodische Schwankungen überlagert.

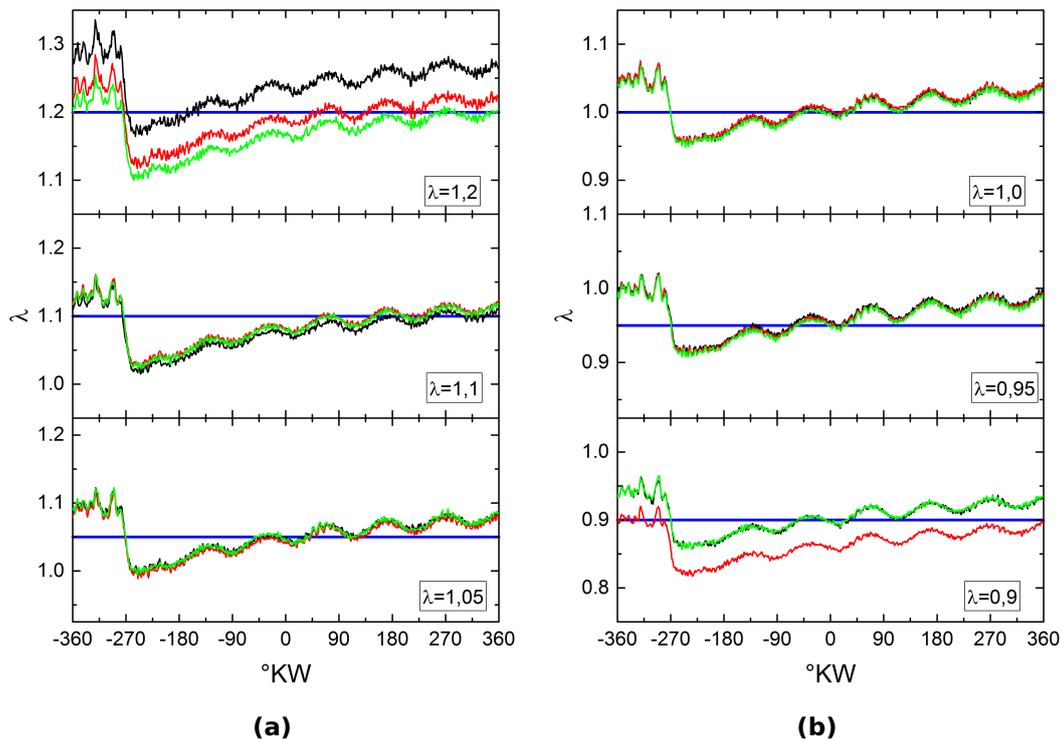


Abbildung 6.15: Validierungsmessungen am Versuchsmotor 2 mit dem Saugrohrsensor 2. Generation für unterschiedliche λ -Werte, welche per MFC eingestellt wurden. Jede Farbe repräsentiert eine Messung zu 100 Zyklen. Der nominell eingestellte λ -Wert ist als blaue Linie dargestellt.

Die Einlassventile öffnen bei -334 °KW, sodass sich zu diesem Zeitpunkt ein starker Druckabfall und eine langsamere Zunahme nach Schließen der Einlassventile ergibt. Zur Veranschaulichung ist in Abb. 6.16 eine typische Druckkurve für diese Messungen gezeigt. Die Vermutung liegt nahe, dass durch die Druckänderung eine dynamische Temperaturänderung entsteht, welche hier nicht erfasst werden kann. Da es sich bei Versuchsmotor 2 um einen Einzylinder-Transparentmotor handelt, ist dieser Effekt vergleichbar mit den Validierungsmessungen des Prototypen der 1. Generation am modifizierte Ansaugtrakt von Versuchsmotor 1.

Die einzelnen Messungen in Abb. 6.15 liegen mit Ausnahme von zwei Messreihen sehr gut übereinander, was für eine gute Reproduzierbarkeit spricht. Abweichungen ergeben sich, wie bei den vorherigen Validierungsmessungen durch die Problematik einer korrekten I_0 -Bestimmung. Hier können kleine Abweichungen in I_0 in der Größenordnung von 0,5% für die beobachteten Abweichungen sorgen. Die Genauigkeit der Messungen wird hier als Abweichung zwischen gemessenem und per MFC eingestellten λ -Wert berechnet. Die Präzision berechnet sich als Mittelwert aus der relativen Standardabweichung der Einzelzyklen bezogen auf den gemessenen λ -Wert zu jedem °KW im Zyklus. Basierend auf den hier gezeigten Ergebnissen ergeben sich über den gesamten Zyklus und

alle Messungen gemittelt eine Genauigkeit von 1,3% und eine Präzision von 2%. Ohne Mittelung über den gesamten Zyklus ergibt sich im Mittel eine maximale Abweichung von 7,1%. Zur Verbesserung der Genauigkeit ist eine Anwendung der 2-Filter-Methode bei Messungen im Saugrohr empfehlenswert. Hierfür müsste allerdings die Genauigkeit der Temperaturbestimmung deutlich über 20 K liegen. Diese Größenordnung konnte für den Temperaturabfall in den Validierungsmessungen bestimmt werden (siehe Kap. 6.2).

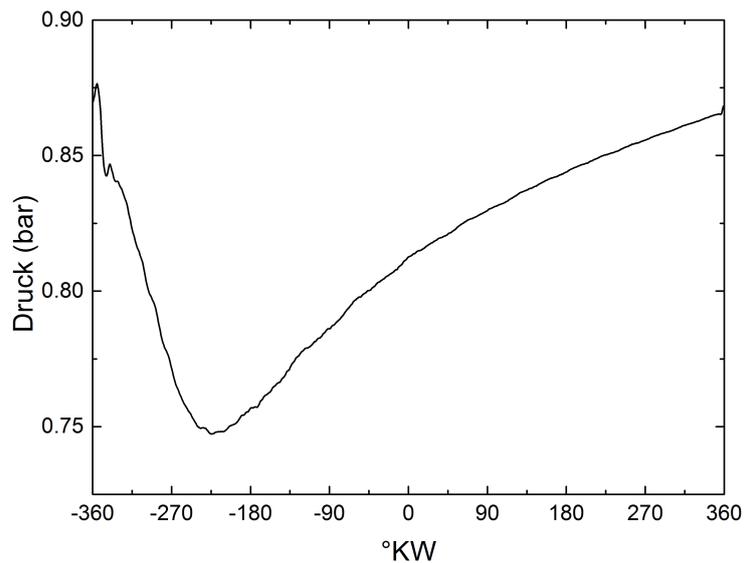


Abbildung 6.16: Typische Druckkurve im Saugrohr bei den Validierungsmessungen an Versuchsmotor 2 mit dem Prototyp 2. Generation der Saugrohrsonde.

7 Quantifizierung an der Rapid Compression Machine

Die Messungen an der Rapid Compression Machine (RCM) dienen der Validierung der Quantifizierungsstrategie für Methan mittels der 2-Filter-Methode. Die RCM bietet hierfür sehr definierte Bedingungen, da ein vorgemischtes Gas in eine evakuierte Messkammer eingeleitet werden kann. Weiterhin können an der RCM motornahe Bedingungen nachgestellt werden, da die Verdichtung des Gasgemisches wie beim Motor über die Hubbewegung eines Kolbens in einem abgeschlossenen Zylinder abläuft und ein entsprechender Druck- und Temperaturbereich vermessen werden kann. Der Ablauf der Experimente ist im Detail in Kap. 4.7 beschrieben. Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse der Messungen mit dem ICOS-Temperature-System dargestellt. Dadurch kann das gemessene Temperaturverhalten mit den Ergebnissen des 2-Filter-ICOS-Systems abgeglichen werden. Anschließend werden die Ergebnisse der Messungen an unterschiedlichen CH_4/N_2 -Mischungen dargestellt, um damit die Funktion des 2-Filter-Systems zu bewerten.

7.1 ICOS-Temperature-Messungen

Die Messungen mit dem ICOS-Temperature-System wurden sowohl in Durchlichtgeometrie (kurz LOS-Sonde, engl. für line of sight) als auch mit einer Zündkerzensonde (kurz M12-Sonde) durchgeführt. Gleichzeitige Messungen mit beiden Sonden waren nicht möglich. Daher wurden die Messungen unter gleichen Bedingungen aber an unterschiedlichen Versuchstagen durchgeführt. Die M12-Sonde besitzt die gleiche Messgeometrie wie das 2-Filter-ICOS-System: einen halboffenen Spiegelkäfig neben einer funktionstüchtigen Zündkerze. Daher ist ein direkter Vergleich des gemessenen Temperaturverhaltens möglich. Weiterhin ist aus dem Vergleich zwischen den Messungen mit LOS- und M12-Sonde eine Bewertung des Einflusses der Messgeometrie auf die Gastemperatur möglich.

Da das Messprinzip des ICOS-Temperature-Systems auf der Absorption von IR-Licht durch Wasser beruht (siehe Kap. 4.6), ist es notwendig gasförmiges Wasser in die Messkammer der RCM einzubringen. Zusätzlich ist ein Trägergas notwendig, um über einen entsprechenden Startdruck durch die Kompression den gewünschten Maximaldruck von 40 bar zu erreichen. Als Trägergas wurde ein CH_4/N_2 -Gemisch äquivalent zu $\lambda = 0,9$ (10,5% CH_4) gewählt. Über das in der Zuleitung zur Messkammer der RCM verbaute Septum (siehe Kap. 4.7) wurde mittels einer Spritze 0,05 - 0,15 ml Wasser zugegeben. Eine exakte Dosierung der Menge an Wasserdampf in der RCM war aufgrund von Verlusten durch Kondensation in den Zuleitungen zur Messkammer nicht möglich. Weiter fehlte auch die Möglichkeit den Partialdruck des Wasserdampfes in der Messkammer zu bestimmen. Daher wurde die eingespritzte Menge anhand vorhergehender Testmessungen mit Blick auf das vom ICOS-Temperature-System gemessenen Signals eingestellt. Der temperatu-

abhängige Dampfdruck des Wassers stellt eine Obergrenze für die maximal mögliche Menge an Wasserdampf in der Messkammer dar. Diese Obergrenze wurde über eine Variation der eingespritzten Wassermenge versucht zu erreichen, um ein möglichst hohes Signal-Rausch-Verhältnis zu erhalten. Die RCM wurde für die Messungen nacheinander auf 30 °C, 60 °C und 90 °C konditioniert. Der Startdruck betrug 1 bar, sodass am Ende der Kompression ein Maximaldruck von ≈ 40 bar erreicht wurde. Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit wurde jede Messung fünfmal durchgeführt.

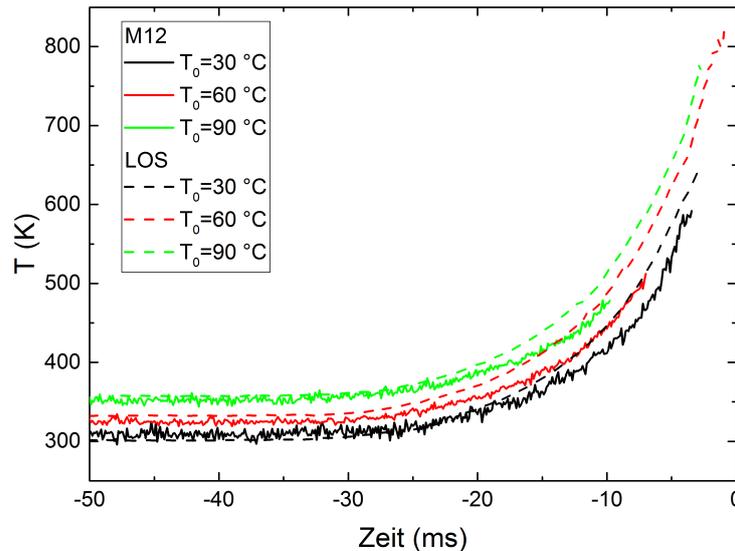


Abbildung 7.1: Gemessene Temperatur in K in der RCM über die Zeit für Messungen mit LOS- und M12-Sonde des ICOS-Temperature Systems und verschiedene Konditionierungstemperaturen in °C der RCM. Die durchgezogenen Linien gehören zu Messungen der M12-Sonde, die gestrichelten zur LOS-Sonde.

In Abb. 7.1 sind mit der LOS- und der M12-Sonde gemessene Temperaturen gegen die Messzeit für unterschiedliche Konditionierungstemperaturen der RCM aufgetragen. Die Messzeit wurde dabei aus dem simulierten Kurbelwinkelsignal des ICOS-Systems und der daraus folgenden Zeitauflösung berechnet, wobei der Zeitpunkt des Maximaldrucks als Nullpunkt gesetzt wurde. Im Verlauf der Messungen kam es zu Signalschwankungen. Insbesondere bei der M12-Sonde waren diese so stark, dass das durch die Kamera des ICOS-Temperature-Systems gemessene Signal auf nahezu Null fiel, sodass eine Bestimmung der Temperatur ab einem gewissen Zeitpunkt in der Kompression nicht mehr möglich war. Dementsprechend fehlen Datenpunkte in Abb. 7.1 ab einem gewissen Zeitpunkt in der Messung. Zu Beginn der Messung von etwa -50 bis -35 ms ist der Druck nahezu konstant. Nach diesem quasi-statischen Bereich steigt der Druck bis zum Zeitpunkt 0 ms auf den Maximaldruck an. Anhand der Daten in Abb. 7.1 ist erkennbar, dass die eingestellte Anfangstemperatur im quasi-statischen Bereich gut mit der gemessenen Temperatur übereinstimmt. Die Abweichung beträgt im Mittel $\approx 5,6$ K gegenüber dem

nominellen Wert. Die gemessene Temperatur weicht zwischen LOS- und M12-Sonde im quasi-statischen Bereich im Mittel um ≈ 7 K ab. Außerdem ist anhand der Grafik zu sehen, dass die Temperatur bei Messungen mit der M12-Sonde langsamer ansteigt, als bei Messungen mit der LOS-Sonde. Die Abweichung beträgt bei $t = -10$ ms im Mittel 40 K. Die LOS-Sonde zeigt überdies bedingt durch die größere Absorptionsstrecke, ein deutlich besseres Signal-Rausch-Verhältnis. Der Unterschied im gemessenen Temperaturverlauf ist ein klarer Hinweis auf einen Einfluss des Spiegelkäfigs auf die Gastemperatur im Messvolumen. Es ist anzunehmen, dass der Spiegelkäfig zu Beginn der Messungen die gleiche Temperatur wie das umgebende Gas besitzt. Aufgrund der Wärmekapazität des Metalls heizt sich dieses langsamer auf als das umgebende Gas und entzieht diesem Wärme. Effektiv resultiert dies in einer Kühlung des Gases im Messvolumen und einer gemessenen Temperatur, die niedriger ist als die globale Temperatur in der Messkammer der RCM, welche von der LOS-Sonde erfasst wird.

Um die Temperaturmessungen weiter zu untersuchen, wurde das Modell einer polytropen Verdichtung (siehe Gl. 2.6) an die Daten angepasst. Zur Bestimmung von Startdruck und -temperatur wurden über 50 Messpunkte im quasi-statischen Bereich Druck und Temperatur gemittelt. Anschließend wurde der Polytropenexponent so angepasst, dass der berechnete Temperaturverlauf eine möglichst hohe Übereinstimmung mit den Messdaten hat. Der Vergleich zwischen Messungen mit der LOS-Sonde und einer polytropen Verdichtung in Abb. 7.2 zeigt, dass die Messungen einer polytropen Verdichtung mit einem Exponenten von etwa $n = 1,41$ im Mittel folgen. In den Kurven sind zudem leichte Sprünge erkennbar, die auf einen Fehler in der Auswertung hindeuten. Der ermittelte Polytropenexponent entspricht in etwa einem adiabatischen Kompressionsvorgang ohne Wärmeverluste unter Annahme eines idealen, zweiatomigen Gases, für den $n = 1,4$ gilt [57]. Diese Annahme erscheint insofern berechtigt, dass Stickstoff als zweiatomiges Gas etwa 89% des Gemisches in der RCM ausmacht.

Die mit der M12-Sonde gemessene Temperatur in Abb. 7.3 folgt hingegen im Mittel einer polytropen Verdichtung mit einem Exponenten von $n = 1,35$. Dies entspräche einem Temperaturverlauf mit Wärmeverlusten z.B. über die Außenwände der RCM. Die M12-Sonde misst jedoch nur die Temperatur innerhalb des Messvolumens und Strömungen, welche für eine stetige Durchmischung des Gases sorgen, sind in der RCM nicht vorhanden. Zusätzlich messen die LOS- und die M12-Sonde die Temperatur unter abgesehen von der Messgeometrie gleichen Bedingungen. Entsprechend gibt der Unterschied im Polytropenexponenten zwischen LOS- und M12-Sonde den Einfluss des Spiegelkäfigs auf die Messung der Temperatur wieder. Wie oben angesprochen kann der Spiegelkäfig einen kühlenden Effekt auf das Gas im Messvolumen haben, was beim Vergleich mit einer polytropen Verdichtung Wandwärmeverlusten entspricht. Soll also die globale Temperatur erfasst werden, muss die LOS-Sonde verwendet werden und ein entsprechender, optischer Zugang zur Messkammer wird benötigt. Für die Quantifizierung des λ -Wertes ist hingegen die Temperatur im Messvolumen, d.h. im Spiegelkäfig nötig. Daher muss die mit dem 2-Filter-ICOS-System gemessene Temperatur mit den Messungen der M12-Sonde des ICOS-Temperature-Systems verglichen werden.

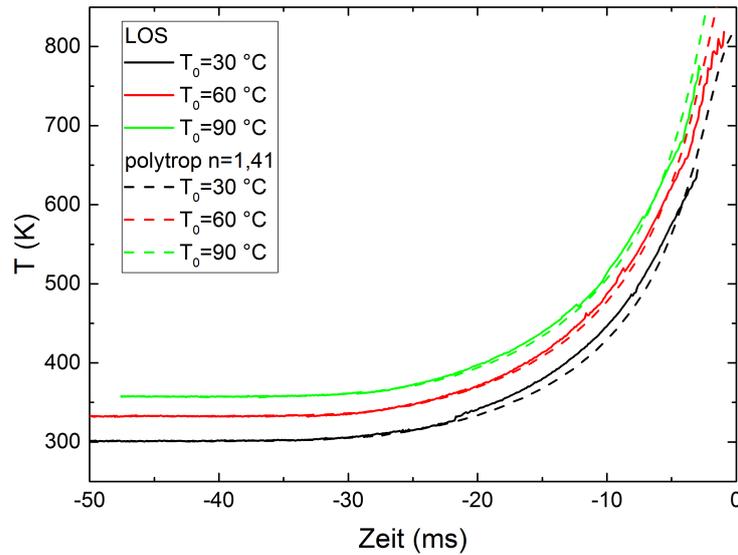


Abbildung 7.2: Gemessene Temperatur der LOS-Sonde (durchgezogene Linie) und polytrop berechnete Temperatur mit $n = 1,4$ (gestrichelt) für Messungen in der RCM.

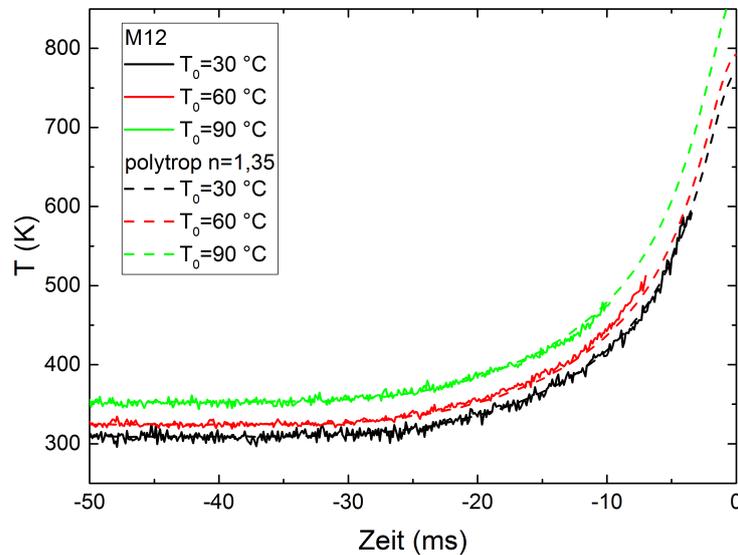


Abbildung 7.3: Gemessene Temperatur der M12-Sonde (durchgezogene Linie) und polytrop berechnete Temperatur mit $n = 1,32$ (gestrichelt) für Messungen in der RCM.

7.2 Validierungsmessungen 2-Filter-ICOS-System

Nach der Untersuchung der Temperaturmessungen und des Einflusses des Spiegelkäfigs auf diese, wird nun die Quantifizierung des λ -Wertes mit der 2-Filter-Methode betrachtet. Dafür wurden drei unterschiedliche, vorgemischte Gase in der RCM vermessen. Für die Messungen kommt der justierbare optische Aufbau mit der Filterkombination 3485-3420 zum Einsatz, wie in Kap. 5.3 beschrieben. Die angewendete Kalibration anhand von Druckzellenmessungen ist in Kap. 5.4 dargestellt. Der optische Aufbau wird in Verbindung mit einem ICOS-System betrieben, sodass der dort verbaute Referenzkanal zur Signalkorrektur verwendet werden kann. Als Startdruck wurde 2,5 bar gewählt, woraus ein Maximaldruck von etwa 65 bar resultierte. Wieder wurde jede Messung fünfmal wiederholt, um die Reproduzierbarkeit zu gewährleisten. Details zum Ablauf der hier vorgestellten Messungen an der RCM finden sich in Kap. 4.7.

Für die Auswertung der Messungen ist eine in-situ Kalibration des Hintergrundsignals I_0 notwendig. Wie in Kap. 6.2 beschrieben ist die Quantifizierung des λ -Wertes bei Transmissionen nahe an Eins empfindlich auf kleine Variationen in I_0 . Da zwischen der Hintergrundmessung bei evakuierter Messkammer und der Messung während der Kompression in der RCM etwa 2 Minuten vergehen, kann es zu Abweichungen zwischen dem gemessenen und dem wahren Wert von I_0 kommen. Dadurch ergäbe sich ein Fehler bei der Berechnung der breitbandigen Transmission, aus der Temperatur und Dichte bestimmt werden. Dies ist ebenfalls anhand der Druckzellenmessungen erkennbar, wo der Fehler in der Bestimmung der Konzentration zum Teil an einer fehlerbehafteten Einschätzung des I_0 -Signals liegt (siehe Kap. 5.4 und Abb. 5.16). Bei 2,5 bar in der Druckzelle, was dem Startdruck in der RCM entspricht, beträgt der mittlere Fehler in der Konzentration etwa 5,0% was einem Fehler im λ -Wert von etwa 5,6% entspricht. In Abb. 7.4 ist der quantifizierte λ -Wert gegen die Zeit bei Variation von I_0 für eine Messung mit $\lambda = 0,9$ aufgetragen. Die durch eine Änderung des I_0 -Wertes hervorgerufene Änderung im quantifizierten λ -Wert ist im Bereich vor der Kompression (bis etwa -20 ms) deutlich größer als während der Kompressionsphase (-20 ms bis 0 ms). Vor der Kompression ergibt sich eine Variation um etwa 30% zwischen minimalem und maximalem I_0 wohingegen die Variation beim Maximaldruck lediglich etwa 2% beträgt. Damit ist eine in-situ Kalibration des I_0 -Signals auf den Bereich vor der Kompression möglich. In diesem Bereich ist die Kompressionsrate sehr gering, sodass Druck und Temperatur über einen im Vergleich zur Kompressionsphase relativ langen Zeitraum nahezu konstant sind. Damit üben Druck und Temperatur keinen dynamischen Einfluss auf die Quantifizierung des λ -Wertes aus und es herrschen quasi-statische Bedingungen. Dieser quasi-statische Bereich erstreckt sich hier in den hier gezeigten Messungen von -40 ms bis -20 ms ist aber eigentlich um ein Vielfaches länger. Die Messdaten wurden für die Auswertung beschnitten, um den relevanten Bereich besser darstellen zu können. Weiterhin befindet sich das Gas in einem Druck- und Temperaturbereich, welcher durch Druckzellenmessungen abgedeckt wird und in dem die Quantifizierung des λ -Wertes validiert ist (siehe Kap. 5.4). Zur in-situ Kalibration des Hintergrundsignals I_0 wird dieses bei Auswertung der Messungen um $\pm 0,9\%$ variiert und so angepasst, dass im quasi-statischen Bereich der RCM-Messung der quantifizierte λ -Wert im Mittel die kleinstmögliche Abweichung zum nominellen Wert des verwendeten, vorgemischten Gases aufweist.

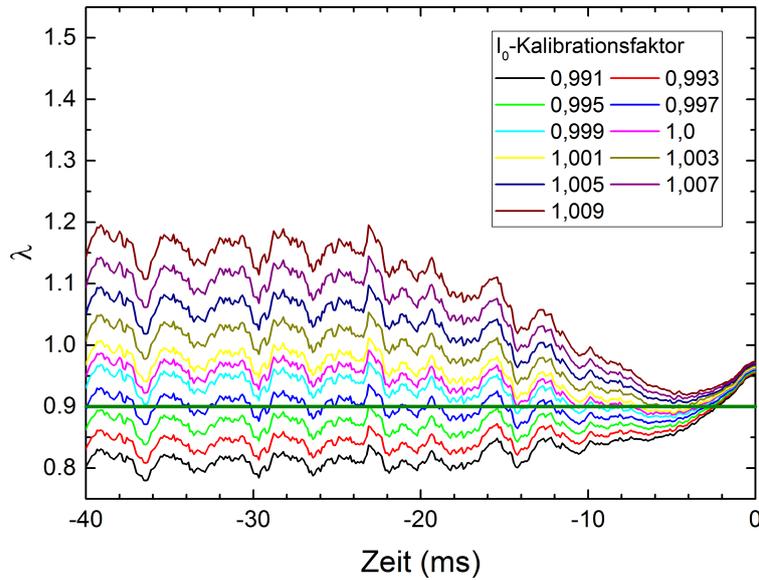


Abbildung 7.4: Quantifizierte λ -Werte für eine Messung bei $\lambda = 0,9$ (horizontale, grüne Linie) unter Variation des Hintergrundsignals I_0 als Beispiel für die in-situ I_0 -Kalibration.

Im Vergleich zu Motormessungen können an der RCM nicht mehrere Zyklen nacheinander aufgenommen werden, um diese dann zu mitteln. Jede Messung ist daher äquivalent zur Messung eines einzelnen Motorzyklus und hat deswegen verglichen mit gemittelten Messungen ein höheres Rauschen in den gemessenen Transmissionen. Um das Signalrauschen zu verkleinern, werden die Signale durch Anwendung eines gleitenden Mittelwertes über 10 Datenpunkte geglättet. Außerdem müssen, ähnlich wie bei Messungen mit der Saugrohrsonde am Motor (Kap. 6.2) Signalvariationen, welche nicht durch Absorption sondern durch z.B. Vibrationen des optischen Systems entstehen, korrigiert werden. Hierfür steht der Referenzkanal des angeschlossenen ICOS-Systems zur Verfügung. In Abb. 7.5 sind normierte Rohsignale der Detektoren mit den Filtern 3420, 3485 und dem Referenzfilter (schwarz, grün und rot) für drei Messungen mit trockener Luft in der RCM dargestellt. Die Signale wurden auf das mittlere Signal im quasi-statischen Bereich normiert. Anhand der Auftragung wird deutlich, dass die Signale der unterschiedlichen Detektionskanäle den gleichen Verlauf zeigen, jedoch mit teilweise leicht abweichender Amplitude. Dies zeigt, dass der Referenzkanal grundsätzlich zur Signalkorrektur benutzt werden kann, diese aber evtl. fehlerbehaftet ist, da es zu einer zu starken oder zu schwachen Korrektur kommen kann.

Nachdem festgestellt wurde, dass der Referenzkanal grundsätzlich zur Signalkorrektur benutzt werden kann, muss eine passendes Vorgehen dafür gefunden werden. In Abb. 7.6 sind die Transmissionskurven der Filter der CH_4 -Kanäle und des Referenzkanals aufgetragen sowie zwei aus der HITRAN-Datenbank berechnete CH_4 -Spektren bei 300 K und 700 K für 40 bar. Es ist deutlich erkennbar, dass der Spektralbereich des Referenzfilters einen Teil des Methanspektrums abdeckt. Bei höherer Temperatur wird dieser Bereich durch die Besetzung höherer Rotationsbanden des Methans entsprechend größer. Das

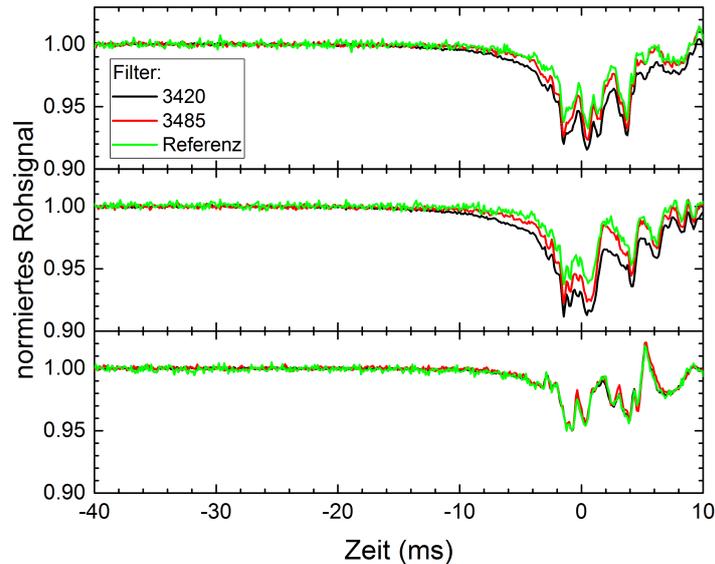


Abbildung 7.5: Vergleich normierter Rohsignale aus den Detektionskanälen der Filter 3485, 3420 und des Referenzfilters (schwarz, rot, grün) bei drei Messungen mit trockener Luft in der RCM. Jeder der drei Graphen stellt eine Messung dar.

heißt das Signal des Referenzkanals wird durch die Absorption des Methans beeinflusst, sodass dies bei der Signalkorrektur berücksichtigt werden muss. Die Wahl eines Referenzfilters, dessen Transmissionskurve zu höheren Wellenzahlen verschoben ist, würde dieses Problem nicht lösen können, da im Bereich von ungefähr 3500 cm^{-1} bis 4000 cm^{-1} eine Absorptionsbande von Wasser liegt. Wasser ist zwar in den hier vorgenommenen Messungen in der RCM nicht vorhanden, aber im Motor Teil der Ansaugluft und des Restgases nach der Verbrennung. Daher ergäbe sich auch im Bereich höherer Frequenzen ein Einfluss auf das Signal im Referenzkanal.

Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz zur Lösung des dargelegten Problems der Signalkorrektur mittels des Referenzkanals besteht darin den Einfluss von Methan auf das Signal des Referenzkanals zu berechnen und entsprechend zu korrigieren. Daher wird mit den für Methan aus der HITRAN-Datenbank berechneten Absorptionsquerschnitten eine Look-up-Tabelle für die aus der Absorption von Methan resultierende Transmission im Referenzkanal abhängig von Druck, Temperatur und Dichte berechnet (analog zu Kap. 4.3.2). Mit dieser Look-up Tabelle kann über einen iterativen Prozess aus dem Signal des Referenzkanals ein Korrektursignal berechnet werden. Die Auswerteprozedur ist in Abb. 7.7 schematisch dargestellt. Zunächst wird aus den Transmissionen τ_1 und τ_2 der beiden CH_4 -Kanäle über die übliche Auswertestrategie der 2-Filter-Methode Dichte ρ und Temperatur T des Methans bestimmt (siehe Kap. 4.3.3). Über die Look-up-Tabelle für den Referenzkanal und den gemessenen Druck p wird die durch das Methan im Referenzkanal zu erwartende Transmission τ_{CH_4} berechnet. Die tatsächlich gemessene Transmission im Referenzkanal τ_{Ref} wird durch die berechnete Transmission τ_{CH_4} geteilt und anschließend mit dem Mittelwert im quasi-statischen Bereich normiert. Das so erhaltene Signal

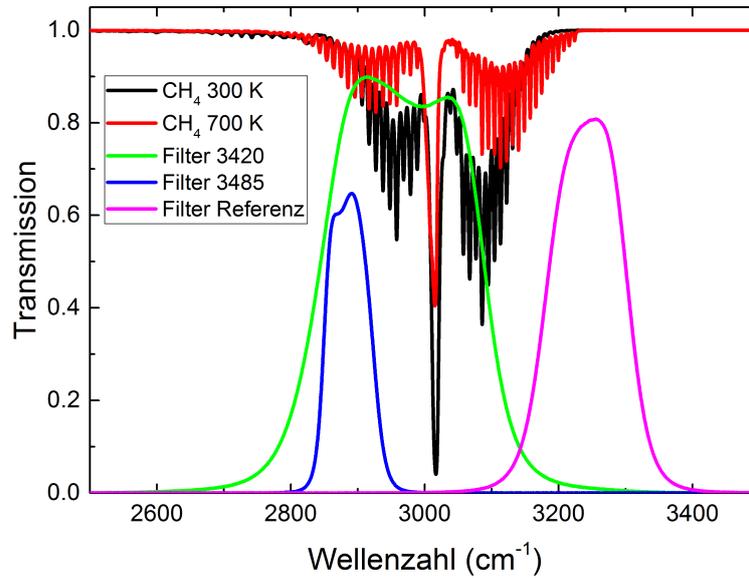


Abbildung 7.6: Transmissionskurven der Filter 3485 und 3420 zur Bestimmung von Methandichte und Temperatur und des Referenzfilters sowie aus der HITRAN-Datenbank berechnetes Spektren von Methan bei 300 K und 700 K.

stellt das Korrektursignal τ_{korr} dar mit dem die in den CH₄-Kanälen gemessene Transmission korrigiert wird. Die unterschiedlichen Signale sind zur Veranschaulichung in Abb. 7.8 für eine Messung in der RCM gezeigt. Die korrigierten Transmissionen der beiden CH₄ Kanäle τ'_1 und τ'_2 werden berechnet, indem die zu Beginn ermittelten Transmissionen durch das Korrektursignal geteilt werden. Mit den korrigierten Transmissionen startet dann wieder die Ermittlung von Dichte und Temperatur und eine erneute Berechnung des Korrektursignals. Dieser iterative Prozess wird fünfmal durchgeführt und konvergiert üblicherweise schon nach drei Schritten. Nach 5 Iterationen stehen die finale Dichte und Temperatur fest woraus dann Gesamtgasdichte sowie λ -Wert und Stoffmengenanteil x berechnet werden.

Für die Berechnung des Korrektursignals ist zuvor die Kalibration der Look-up-Tabelle für den Referenzkanal erforderlich. Der Referenzfilter ist in einem ICOS-System eingebaut, welches ursprünglich für den Test der 2-Filter-Methode mit der Filterkombination 3329-3552 angedacht war, wie in Kap. 5.3 beschrieben. Allerdings konnte dies aufgrund der Lieferung schlechter Detektoren nicht eingesetzt werden. Daher wurde auf den justierbaren optischen Aufbau mit der Filterkombination 3420-3485 zurückgegriffen, welcher an das ICOS-System gekoppelt wurde. Die Messungen, welche zur Kalibration des Referenzkanals genutzt werden, wurden allerdings mit dem ICOS-System ohne angekoppelten optischen Aufbau durchgeführt. Aus organisatorischen Gründen konnten keine neuen Kalibrationsmessungen durchgeführt werden. Allerdings sollte die Kalibration des Referenzkanals für das ICOS-System und den justierbaren, optischen Aufbau gleich sein, da der Filter 3420 aus dem optischen Aufbau den Filter 3329, welcher im ICOS-System dem Referenzkanal spektral am nächsten liegt, komplett überdeckt, wie in Abb. 4.8 zu sehen

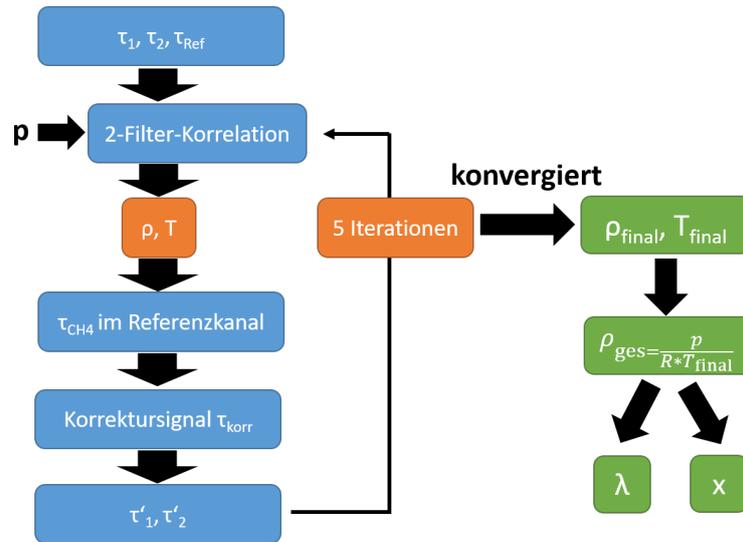


Abbildung 7.7: Schaubild der Auswertung mit iterativer Signalkorrektur. Aus der über die 2-Filter-Korrelation bestimmten Dichte und Temperatur wird die zu erwartende Transmission im Referenzkanal berechnet. Damit kann ein Korrektursignal bestimmt werden, mit der die Transmission der CH₄-Kanäle korrigiert wird. Nach 5 Iterationen ist das finale Ergebnis erreicht.

ist. Es gibt jedoch eine Überschneidung der Filterkurven für den Filter 3420 und den Referenzfilter, wie in Abb. 7.6 sichtbar. Diese Überschneidung wird bei Berechnung der Look-up-Tabelle berücksichtigt, da der Filter 3420 im Strahlengang der Detektionskaskade vor dem Referenzfilter platziert ist. Die Druckzellenmessungen zur Kalibration wurden bei den gleichen Parametern wie in Kap. 5.3 beschrieben durchgeführt. Abb. 7.9 zeigt die gemessenen gegen die berechnete Transmission für den Referenzfilter als Resultat der Druckzellenmessungen. Die Messungen wurden gemittelt und als Fehler das 95% Konfidenzintervall berechnet. Die Daten zeigen ein lineares Verhalten, welches von der idealen Übereinstimmung (grüne Linie) abweicht. Innerhalb der Fehlerbalken ist die Kalibration temperaturunabhängig. Als Kalibrationsfunktion wird eine Gerade mit Fixpunkt (1,1) unter Berücksichtigung aller Daten angefüttet (blaue Linie).

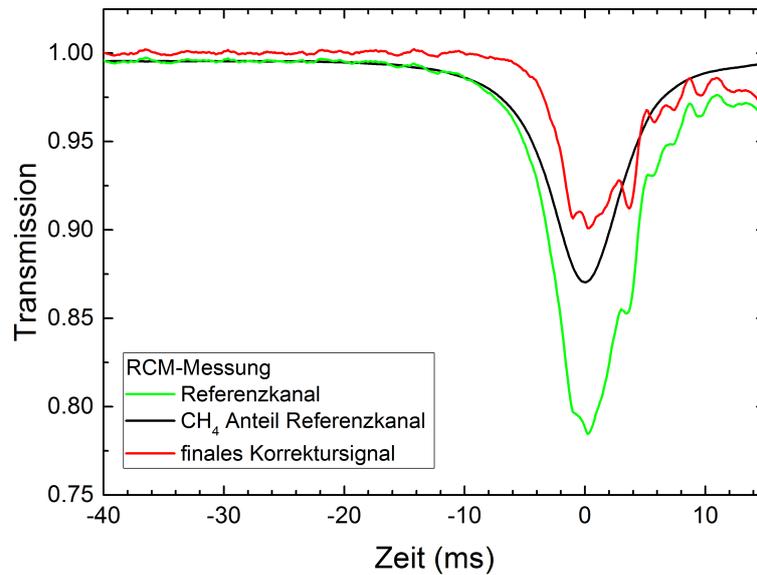


Abbildung 7.8: Gemessene Transmission im Referenzkanal (grün) für eine Messung in der RCM sowie das daraus berechnete Korrektursignal (rot) und der Anteil an der gemessenen Transmission durch die Absorption von Methan (schwarz).

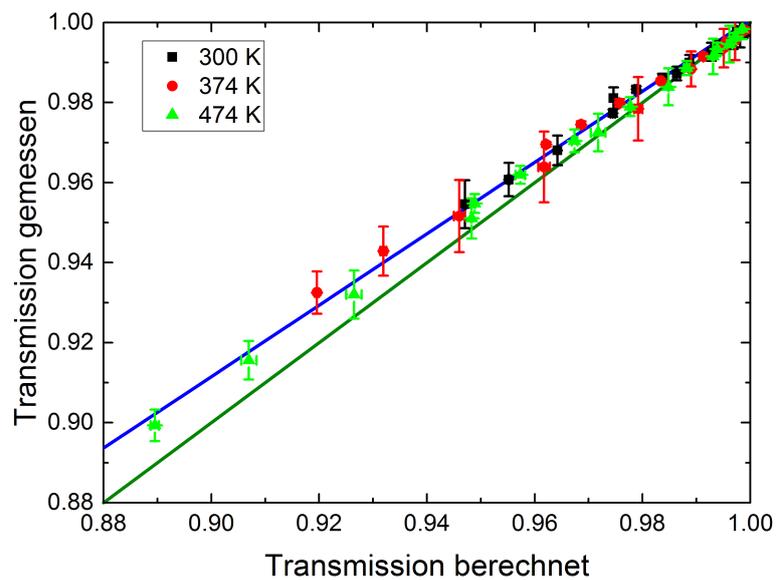


Abbildung 7.9: Gemessene gegen berechnete Transmission aus Druckzellenmessungen für den Referenzfilter zur Bestimmung einer Kalibrationsfunktion (blau). Die grüne Linie zeigt die ideale Übereinstimmung.

Nachdem das Vorgehen bei der Auswertung der Messungen dargestellt wurde, folgt nun die Betrachtung der Messergebnisse. Dabei wird auf die Unterschiede zwischen einer Kalibration der CH_4 -Kanäle mit und ohne Fixpunkt bei (1,1) eingegangen (siehe Kap. 5.4). In Abb. 7.10 sind Druck p , Temperatur T und λ -Wert gegen die Zeit für fünf Messungen in der RCM bei einer CH_4/N_2 -Gasmischung äquivalent zu $\lambda = 1,0$ bei Nutzung einer Kalibration mit Fixpunkt aufgetragen. Die Ergebnisse der anderen zwei benutzten Gasmischungen sind sehr ähnlich und finden sich im Anhang, siehe Abb. B.1 und Abb. B.2. Bei den hier gezeigten Experimenten betrug der Startdruck 2,5 bar und der Maximaldruck bei $t = 0$ beträgt etwa 65 bar. Für den Vergleich zwischen den Messergebnissen und einer polytropen Verdichtung wurden Startdruck und -temperatur über eine Mittelung der Werte im Bereich bis -30 ms bestimmt. Die Temperatur folgt dem Verlauf einer polytropen Verdichtung mit einem Polytropenexponenten von $n = 1,32$. Bei $t = 0$ ergibt sich eine Abweichung zwischen Messung und polytroper Verdichtung von etwa 16 K. Gründe für diese Abweichung können Ungenauigkeiten in der Messung oder der HITRAN-Datenbank sein, was in der Diskussion näher beleuchtet wird.

Mit dem ermittelten Polytropenexponenten ist das Temperaturverhalten ähnlich wie bei den ICOS-Temperature-Messungen (siehe Abb. 7.3). Der direkte Vergleich zwischen den mit dem ICOS-Temperature-System und der 2-Filter-Methode gemessenen Temperaturen in Abhängigkeit von der Zeit ist in Abb. 7.11 gezeigt. Die mit dem ICOS-Temperature-System gemessene Temperatur steigt dabei schneller an, als die Temperatur, welche mit der 2-Filter-Methode bestimmt wurde. Die maximale Abweichung der Temperatur beträgt etwa 50 K bei $t = -3$ ms. Bei diesem direkten Vergleich muss berücksichtigt werden, dass die Messungen nicht unter vollständig identischen Bedingungen stattfanden. Bei den Messungen mit dem ICOS-Temperature-System betrug der Startdruck 1 bar und der Enddruck etwa 40 bar. Dahingegen lag der Startdruck bei Messungen mit der 2-Filter-Methode bei 2,5 und der Enddruck bei etwa 65 bar. Durch diese unterschiedlichen Bedingungen resultieren entsprechend Unterschiede im zeitlichen Verlauf und im Maximalwert der Temperatur. Daher ist der Vergleich beider Messungen mit einem polytropen Verhalten aufschlussreich. Bei beiden Messungen weicht die mit einer Zündkerzensonde gemessene Temperatur vom adiabatischen Verhalten ab, was auf einen Einfluss der Messgeometrie auf die Temperatur im Messvolumen hindeutet.

Bei der Temperatur in Abb. 7.10 fällt außerdem auf, dass diese zu Beginn mit ≈ 313 K etwas über der Konditionierungstemperatur von 303 K liegt. Die leicht erhöhte Temperatur kann an einem systematischen Messfehler liegen, oder daran, dass die RCM zuvor auf eine höhere Temperatur konditioniert wurde und noch nicht vollständig abgekühlt war. Aus den Druckzellenmessungen (siehe Abb. 5.19) ist ersichtlich, dass der Temperaturfehler bei 2,5 bar für 9,51% CH_4 ($\lambda = 1,0$) im Mittel ± 11 K beträgt. Somit liegt die beobachtete Abweichung innerhalb der Messgenauigkeit des Systems. Die quantifizierten Lambda-Werte schwanken im quasi-statischen Bereich um den nominellen Wert. Nach Beginn der Kompression bei etwa $t = -14$ ms ergibt sich eine systematische Abweichung zu niedrigeren λ -Werten. Ab etwa $t = -4$ ms steigt der λ -Wert wieder an, sodass sich am Ende der Kompression eine systematische Abweichung nach oben ergibt. Alle Schwankungen und Abweichungen des λ -wertes bleiben im Rahmen eines Fehlerintervalls von $\pm 5\%$, was in Abb. 7.10 durch die graue Fläche veranschaulicht wird und damit die Genauigkeit der Messung widerspiegelt. Zur Bestimmung der Präzision wird die Standardabweichung

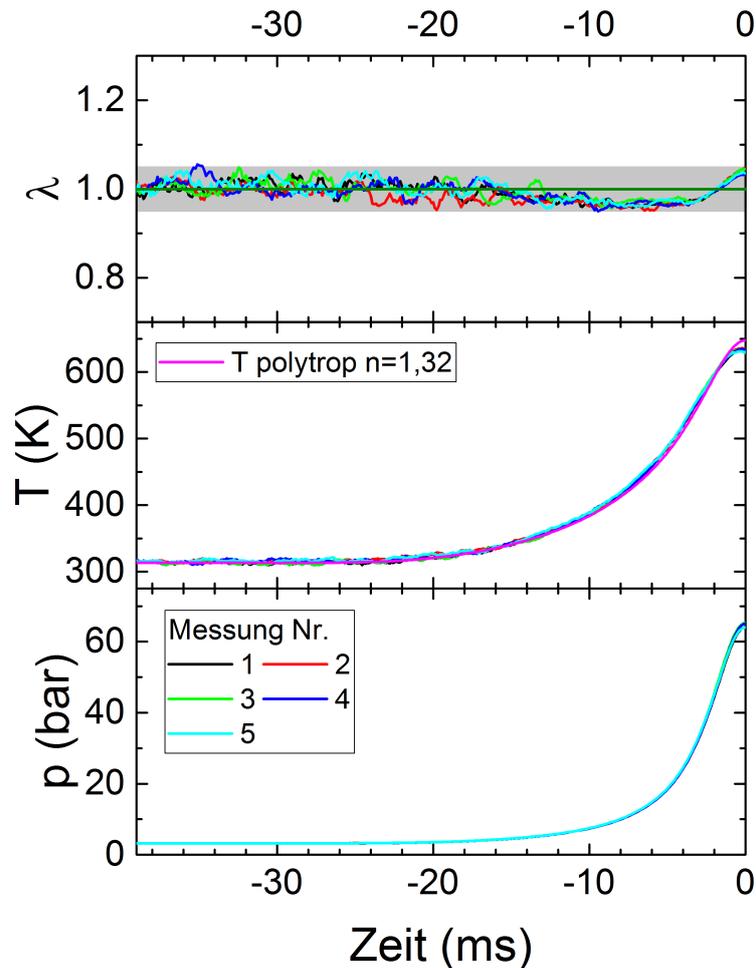


Abbildung 7.10: Ergebnisse der RCM-Messungen mit dem 2-Filter-System für Druck p , Temperatur T und λ bei einem Gasgemisch von $\lambda = 1,0$ und einer Kalibration der CH_4 -Kanäle mit Fixpunkt bei (1,1) sowie polytrop berechnete Temperatur. Die graue Fläche entspricht einem Fehlerintervall von $\pm 5\%$.

zwischen den Werten der einzelnen Messreihen zu jedem Zeitpunkt im Bereich der Kompression ($t = -20$ ms bis $t = 0$) berechnet. Diese Standardabweichung wird ins Verhältnis zum mittleren λ -Wert über die fünf Messreihen an jedem Zeitpunkt gesetzt und anschließend gemittelt. Diese Berechnung ergibt eine Präzision von $\approx 1,5\%$. Anschaulich lässt sich die gute Präzision daran erkennen, dass die einzelnen Kurvenverläufe in der Kompression sehr dicht beieinander liegen.

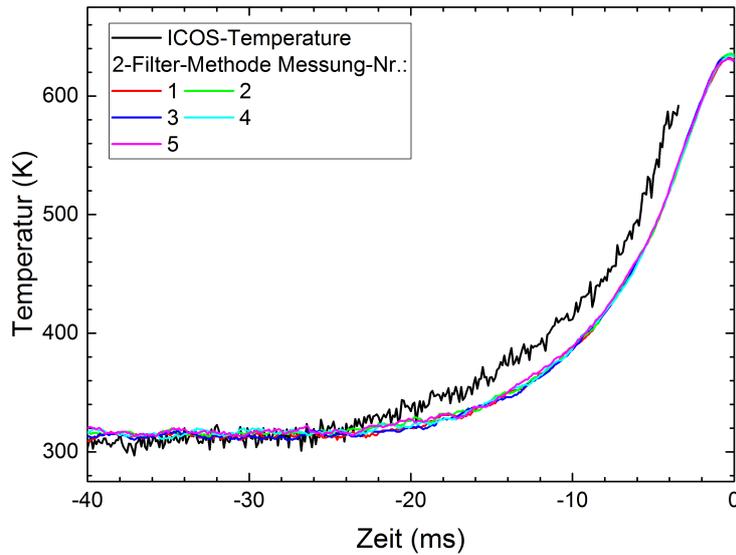


Abbildung 7.11: Vergleich zwischen gemessenen Temperaturen in der RCM zwischen ICOS-Temperatur-System und der 2-Filter-Methode bei $\lambda = 1, 0$.

Im nächsten Schritt sollen Messungen, die mit einer Kalibration ohne Fixpunkt ausgewertet wurde, betrachtet werden. Das sonstige Vorgehen bei der Auswertung ist das gleiche wie zuvor. Druck p sowie quantifizierte Temperatur T und λ -Wert für die gleichen Messungen wie im vorherigen Abschnitt sind in Abb. 7.12 gezeigt. Die Ergebnisse der anderen Gasmischungen finden sich im Anhang in Abb. B.3 und Abb. B.4. Bis auf leichte Unterschiede zur Auswertung bei Kalibration mit Fixpunkt ergibt sich der gleiche Temperaturverlauf wie zuvor. Im quasi-statischen Bereich der Messung sind die λ -Werte gegenüber einer Kalibration mit Fixpunkt leicht höher, aber immer noch im 5%-Fehlerintervall. Zur Kompression ergibt sich ein sichtbarer Unterschied im Verlauf des λ -wertes. Bei der Kalibration mit Fixpunkt ist die systematische Abweichung nach unten ab etwa $t = -14$ ms größer. Hier ergibt sich auch eine leicht größere Abweichung zum polytropen Temperaturverlauf gegenüber der Kalibration mit Fixpunkt. Alles in allem ergibt die Kalibration mit Fixpunkt bei (1,1) bessere Ergebnisse. Daher wird diese im Folgenden zur Auswertung der Motormessungen verwendet.

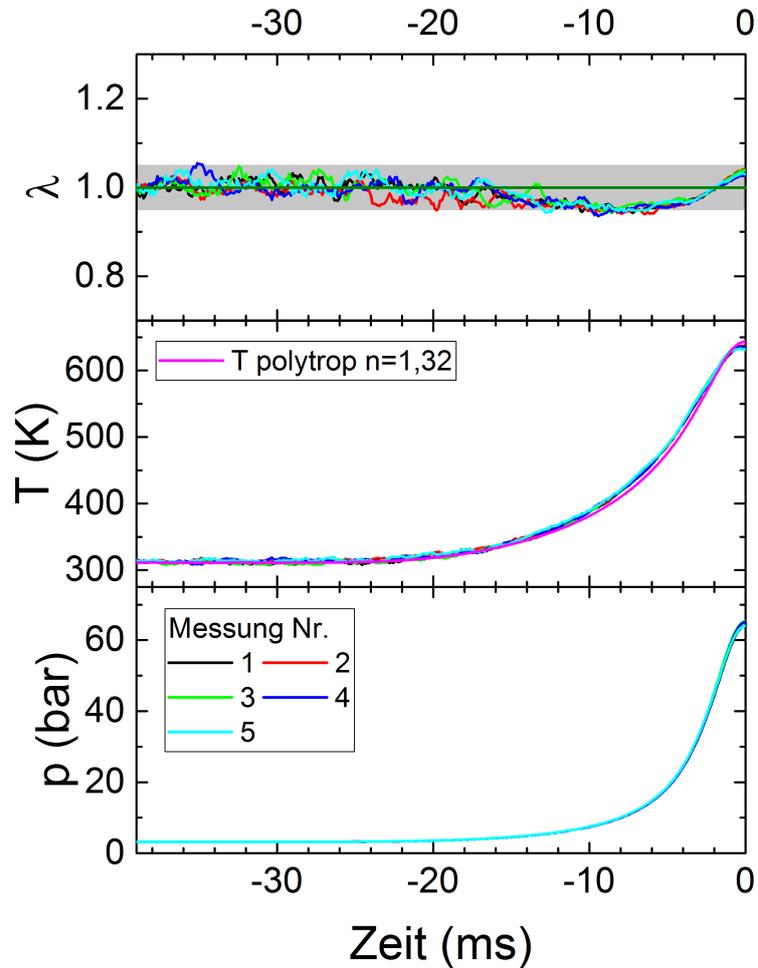


Abbildung 7.12: Ergebnisse der RCM-Messungen mit dem 2-Filter-System für Druck p , Temperatur T und λ bei einem Gasgemisch von $\lambda = 1,0$ und einer Kalibration der CH_4 -Kanäle ohne Fixpunkt sowie polytrop berechnete Temperatur. Jede Farbe gehört zu einer Messung und die graue Fläche entspricht einem Fehlerintervall von $\pm 5\%$.

8 Quantifizierung im Brennraum

Im vorherigen Kapitel wurde die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Quantifizierungsstrategie an Messungen in einer RCM validiert. Da das Messsystem für den Einsatz in Motoren vorgesehen ist, werden in diesem Kapitel Messungen in Versuchsmotor 2 (siehe Kap. 4.8) dargestellt, mit denen das Messsystem und der Auswertungsalgorithmus unter realistischen Bedingungen erprobt wird. Bei diesen Messungen kommt der Zündkerzensensor zusammen mit dem 2-Filter-System im justierbaren, optischen Aufbau zum Einsatz. Der Test des Saugrohrsensors im Motor mit dem 1-Filter-ICOS-System wurde schon in Kap 6.2 beschrieben. Zur Durchführung von Validierungsmessungen werden Luft- und Kraftstoffzufuhr (Methan 4.5), wie in Kap. 4.8 beschrieben, über MFCs geregelt. Eine Vormischstrecke sorgt für ein homogenes Gasgemisch. Mit diesem Aufbau ist eine schrittweise Annäherung des Experiments an den realen Motorbetrieb möglich. Es werden zunächst bei geschlepptem Motor, d.h. bei externem Antrieb der Kurbelwelle, über die MFCs unterschiedliche λ -Werte eingestellt und mit dem 2-Filter-System gemessen. Anschließend werden die Experimente unter gleichen Bedingungen in gezündetem Betrieb, d.h. ohne externen Antrieb, wiederholt. Als letztes wird der Kraftstoff über einen Injektor ins Saugrohr eingedüst. Die Eindüsung von Methan bildet den Realbetrieb ab und die Funktionalität des Messsystems kann entsprechend beurteilt werden. Messungen mit dem ICOS-Temperature-System im Versuchsmotor dienen dazu das gemessene Temperaturverhalten mit den Messungen des 2-Filter-Systems abzugleichen.

8.1 Temperaturmessungen am Motor

In diesem Abschnitt wird auf die Messungen mit dem ICOS-Temperature-System eingegangen. Diese dienen dazu den Einfluss des Spiegelkäfigs auf die Messung der Temperatur weiter zu untersuchen, wie schon an der RCM geschehen (siehe Kap. 7.1). Zusätzlich kann das beobachtete Temperaturverhalten mit den Messungen des 2-Filter-Systems in späteren Abschnitten abgeglichen werden.

Das ICOS-Temperature-System wurde an Versuchsmotor 2 sowohl mit der LOS-Sonde in Durchlichtgeometrie, als auch mit der M12-Sonde benutzt. Die gemessenen Temperaturen im geschleppten Motorbetrieb sind in Abb. 8.1 zusammen mit berechneten Temperaturen gegen den Kurbelwinkel aufgetragen. Die berechneten Temperaturen basieren auf einer polytropen Verdichtung (siehe Gl. 2.6) und wurden wie bei den RCM-Messungen (siehe Kap. 7.1) unter Variation des Polytropenexponenten an die Daten angepasst. Anhand der Grafik ist zu erkennen, dass die Messungen mit unterschiedlichen Sonden unterschiedliche Temperaturverläufe ergeben, ähnlich wie bei den RCM-Messungen. Die unterschiedlichen Einlasstemperaturen (Bereich von -360 °KW bis -180 °KW) ergeben sich dadurch, dass die Messungen durchgeführt wurden, nachdem der Motor schon eine gewisse Zeit, auch in gezündetem Betrieb, gelaufen ist. Dementsprechend hat sich der Zündkerzensensor erwärmt, sodass das Gas im Messvolumen erwärmt wird. Die mit der LOS-Sonde gemessene

Einlasstemperatur von ≈ 301 K im Mittel ist etwas höher als die Temperatur, welche am Motorprüfstand per Thermoelement im Ansaugtrakt gemessen wurde. Diese betrug ≈ 297 K und liegt damit im Rahmen der Messgenauigkeit des Systems von 20 K laut Angabe der LaVision GmbH. Der mit der LOS-Sonde gemessene Temperaturverlauf lässt sich, wie schon bei Messungen in der RCM, durch eine polytrope Verdichtung (siehe Gl. 2.6) mit einem Polytropeneexponenten von $n = 1,4$ beschreiben. Währenddessen passt der per M12-Sonde gemessene Temperaturverlauf zu einem Polytropenexponenten von $n = 1,28$. Als Starttemperatur T_0 und -druck p_0 wurden jeweils die mittleren Werte im Einlassbereich gewählt. Damit zeigt das Messsystem ein ähnliches Verhalten wie schon an der RCM beobachtet (siehe Kap. 7.1). Die LOS-Sonde misst ein adiabatisches Temperaturverhalten, während die M12-Sonde bedingt durch die thermische Masse des Spiegelkäfigs einen geringeren Temperaturanstieg misst. Im Gegensatz zur RCM erwärmt sich der Zündkerzensensor durch den laufenden Betrieb, weswegen bei Messungen mit der M12-Sonde die Starttemperatur höher ist als bei Messungen mit der LOS-Sonde.

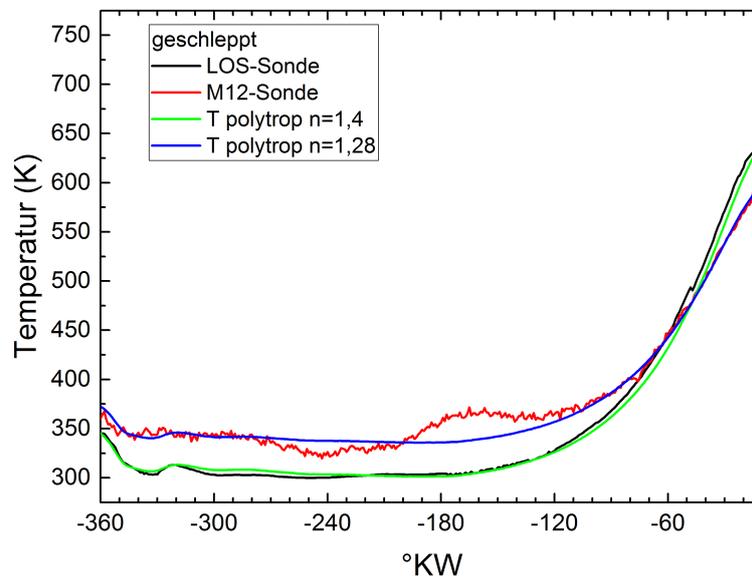


Abbildung 8.1: Temperaturen im geschleppten Motorbetrieb gemessen mit dem ICOS-Temperature System mit M12- bzw. LOS-Sonde, sowie polytrop berechneter Temperaturverlauf angepasst an die Messdaten.

Im gezündeten Betrieb ergibt sich für den Vergleich zwischen LOS- und M12-Sonde ein ähnliches Bild wie bei den geschleppten Messungen. Die Unterschiede zwischen den Sonden sind jedoch deutlicher ausgeprägt und Abweichungen zum polytropen Temperaturverlauf werden sichtbar. In Abb. 8.2 sind mit LOS- und M12-Sonde gemessene Temperaturen gegen den Kurbelwinkel aufgetragen. Es sind je drei Messungen im gezündeten Betrieb mit MFCs für $\lambda = 1,0$ von Zyklusbeginn bis zur Zündung bei -10° KW gezeigt. Auffällig ist die sehr hohe Temperatur von $\approx 600 - 700$ K zu Beginn des Zyklus, welche von beiden Sonden gemessen wird und durch die Expansion des Kolbenvolumens und das Öffnen der Einlassventile bei -334° KW stark abfällt. Durch die Verbrennung entsteht heißes Restgas

welches im Auslasstakt, bedingt durch das Kompressionsvolumen des Kolbens nicht vollständig in den Auslass geschoben werden kann. Das nach Schließen der Auslassventile im Zylinder verbliebene Restgas sorgt für stark erhöhte Temperaturen. Die Temperatur sinkt, sobald nach dem Öffnen der Einlassventile Frischluft in den Zylinder strömt und sich mit dem Restgas vermischt. Zu Beginn der Kompression liegt die Temperatur laut LOS-Sonde bei ≈ 336 K und damit über der oben erwähnten Einlasstemperatur von ≈ 297 K. Der weitere Temperaturverlauf entspricht wieder einer polytropen Verdichtung mit $n = 1,4$ wie schon in den geschleppten Messungen. Allerdings liegt die gemessene Temperatur ab etwa -30 °KW bis zur Zündung unter der polytropen Temperatur. Mit der M12-Sonde werden im Einlasstakt nach der Vermischung von Frischluft und Restgas gegenüber der LOS-Sonde höhere Temperaturen von ≈ 435 K gemessen. Dies zeigt, dass sich der Spiegelkäfig im gezündeten Betrieb durch die Verbrennung stark aufheizt und ein entsprechend hoher Wärmeübertrag an das umliegende Gas stattfindet. Der Anstieg der Temperatur entspricht einer polytropen Verdichtung mit $n = 1,26$, ähnlich wie in den geschleppten Messungen. Die Abweichung zu einer polytropen Verdichtung mit $n = 1,28$ beträgt maximal 4% am OT. Das heißt auch hier erwärmt sich der Spiegel und somit das Gas im Messvolumen langsamer als das restliche Gas im Zylinder. Ab etwa -30 °KW bis zur Zündung liegt wie bei der LOS-Sonde die gemessene Temperatur unterhalb der polytropen. Ein weiterer Unterschied zwischen den Messungen mit M12- und LOS-Sonde ist die Temperaturspitze bei etwa -180 °KW. Hier erhöht sich die mit der M12-Sonde gemessene Temperatur von etwa -210 °KW an sehr schnell um etwa 100 K und fällt bis etwa -150 °KW wieder auf das ursprüngliche Niveau. Dies kann ein Effekt der Gasströmung im Zylinder sein. Frischluft und Restgas sind zum Zeitpunkt der Temperaturspitze noch nicht notwendigerweise homogen gemischt. Im entsprechenden Kurbelwinkelbereich durchläuft der Kolben den unteren Totpunkt und die Einlassventile schließen kurz zuvor bei -184 °KW. Am unteren Totpunkt ist die Geschwindigkeit des Kolbens am geringsten und zusätzlich strömt nach Schließen der Einlassventile kein Gas mehr in den Zylinder ein. Dadurch verlangsamt sich die Bewegung der Gase im Zylinder. Beide Effekte, inhomogene Mischung von Restgas und Frischluft sowie langsame Gasbewegung, können dafür sorgen, dass eine Wolke heißen Restgases das Messvolumen relativ langsam durchströmt und für den starken Temperaturanstieg sorgt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die LOS-Sonde des ICOS-Temperature-Systems die globale Temperatur gemittelt über den Zylinderdurchmesser misst, während die M12-Sonde die lokale Temperatur innerhalb des Messvolumens, d.h. im Spiegelkäfig nahe der Zündkerze, wiedergibt. Weiterhin unterscheiden sich die globale und lokale Temperatur stark voneinander, sodass für die Quantifizierung der Methandichte unbedingt die lokale Temperatur bekannt sein muss. Diese ist für die Berechnung der lokalen Gasdichte im Messvolumen notwendig, um aus der gemessenen Methandichte Konzentration und λ -Wert berechnen zu können (siehe Gl. 4.3). Anhand der Temperaturmessungen wird zudem deutlich, dass sich das Temperaturverhalten einer einfachen Modellierung entzieht. Für die Berechnung der Temperatur über eine polytrope Verdichtung müssen Starttemperatur und Polytropenexponent bekannt sein. Ohne die hier vorgestellten Temperaturmessungen ist es nicht möglich diese Informationen zu erhalten. Des Weiteren können sich je nach Motorbetrieb Effekte wie die Temperaturspitze im gezündeten Betrieb (siehe Abb. 8.2) ergeben. All dies zusammen verdeutlicht, dass die Anwendung einer 2-Filter-Methode zur gleichzeitigen Messung von Methandichte und Temperatur im Messvolumen notwendig zur korrekten Quantifizierung des λ -Wertes ist.

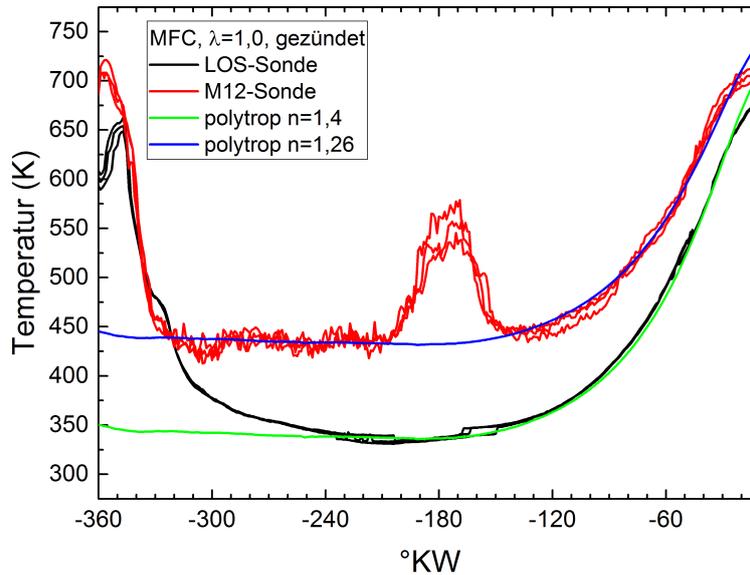


Abbildung 8.2: Temperaturen in gezündetem Motorbetrieb für je drei Messungen gemessen mit dem ICOS-Temperature System mit M12- bzw. LOS-Sonde, sowie polytroper Temperaturverlauf angepasst an die Messdaten.

8.2 Validierungsmessungen am Motor

Nachdem im vorherigen Abschnitt das Temperaturverhalten am Motor und die Unterschiede zwischen M12- und LOS-Sonde untersucht wurden, wird im Folgenden die Bestimmung des λ -Wertes durch Messungen mit dem 2-Filter-ICOS-System betrachtet. Dazu dienen zunächst Messungen mit dem justierbaren, optischen Aufbau im geschleppten Motorbetrieb. Die Zusammensetzung des Gasgemisches wird über MFCs kontrolliert und der Motor läuft etwa 150 Zyklen in statischem Betrieb bevor die Messungen gestartet werden. Der Zylinder sollte daher vollständig mit dem eingestellten Gemisch aus Luft und Methan gefüllt sein. Vor Beginn jeder Messung wird eine Hintergrundmessung in geschlepptem Betrieb ohne Methanzufuhr durchgeführt, um das Hintergrundsignal I_0 zu bestimmen. Analog zu den RCM-Messungen wird auch hier eine in-situ Kalibration des I_0 -Signals vorgenommen. Die Kalibration erfolgt hierbei auf einen gemittelten λ -Wert im Bereich von -360 °KW bis -200 °KW. In diesem Bereich sind Druck und Temperatur nahezu konstant und die Empfindlichkeit des quantifizierten λ -Wertes auf eine Änderung des I_0 -Signals ist sehr hoch. Da der Druck mit ≈ 1 bar niedriger ist als am Beginn der RCM-Messungen sind die Methandichten niedriger und die Empfindlichkeit ist höher, als in Abb. 7.4 dargestellt. Daher ist eine Variation des Hintergrundsignals um $\pm 0,5\%$ und bei einer der Messungen um $0,9\%$ ausreichend für die in-situ Kalibration.

Mit Hilfe der MFCs wurden λ -Werte von $\lambda = 0,95$, $\lambda = 1,0$ und $\lambda = 1,1$ eingestellt und dem Motor in geschlepptem Betrieb zugeführt. Mit dem 2-Filter-System wurden jeweils 100 Zyklen gemessen und die Signale vor der Auswertung gemittelt, um ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis zu erhalten. Jede Messung wurde dreimal wiederholt. Die

Messungen erfolgten immer kurz nach Messungen im gezündeten Betrieb, sodass der Spiegelkäfig des Zündkerzensensors evtl. eine höhere Temperatur als bei reinem Schleppbetrieb hat (siehe Abb. 8.1). Die Auswerteprozedur folgt dem gleichen Schema wie bei den RCM-Messungen. Die gemessene Temperatur und der λ -Wert sind für die Messungen bei $\lambda = 1,0$ zusammen mit dem am Prüfstand gemessenen Druck in Abb. 8.3 gegen den Kurbelwinkel bis zum oberen Totpunkt (OT) dargestellt. Die weiteren Messungen für $\lambda = 1,1$ und $\lambda = 0,95$ zeigen qualitativ die gleichen Ergebnisse und sind im Anhang in Abb. C.1 und Abb. C.2 gezeigt. In Abb. 8.3 beträgt der Druck im Einlasstakt nach Öffnen der Einlassventile bei -334 °KW etwa 0,9 bar und steigt am OT auf maximal etwa 11,5 bar. Die Temperatur beträgt im Einlasstakt zwischen 290 K und 340 K. Die Unterschiede zwischen den Messungen sind durch unterschiedliche Zeitabstände zwischen gezündeten und geschleppten Messungen bedingt. Die hier gezeigten Messungen fanden teilweise parallel zu Messungen mit laserinduzierter Fluoreszenz (LIF) statt, durch welche es hin und wieder zu Unterbrechungen im Ablauf der Messungen kam. Daher sind die Zeiten zwischen einzelnen Messungen teilweise unterschiedlich, sodass der Motor zu Beginn der Messungen unterschiedlich warm sein kann. Die Temperaturverläufe der einzelnen Messungen gleichen sich ab etwa -60 °KW immer weiter an und folgen dann weitgehend einem polytropen Temperaturverlauf mit $n = 1,28$. Die Starttemperatur für die polytrophe Berechnung wurde über eine Mittelung im Bereich von -330 °KW bis -180 °KW über alle Messungen festgelegt. Der Temperaturverlauf entspricht damit den Messungen mit dem ICOS-Temperature-System in Abb. 8.1. In beiden Fällen ist die gemessene Temperatur am OT unterhalb der berechneten Temperatur. Bei den gezeigten Messungen ist außerdem erkennbar, dass das Temperaturmaximum 5-10 °KW vor OT liegt und damit gegenüber der polytropen Berechnung verschoben ist.

Der quantifizierte λ -Wert schwankt bis etwa -120 °KW um den eingestellten Wert mit einer maximalen Abweichung von etwa 12%. Dabei sorgt vor allem das Rauschen für die sichtbaren Abweichungen zum eingestellten λ -Wert. Ab etwa -120 °KW fällt der λ -Wert und erreicht ab etwa -60 °KW bis zum OT bei 0 °KW eine konstante, systematische Abweichung, wobei das Rauschen deutlich abnimmt. In diesem Bereich beträgt die mittlere Genauigkeit, also die Abweichung vom per MFCs eingestellten λ -Wert im Mittel über alle Messungen 7,2%. Die Präzision, also die Standardabweichung der quantifizierten λ -Werte bezogen auf den mittleren λ -Wert im Bereich ab -60 °KW bis zum OT beträgt 0,6%. Die systematische Abweichung bei gleichzeitig sehr hoher Präzision legt nahe, dass eine Optimierung des Systems und der Auswertestrategie eine Verbesserung der Genauigkeit möglich macht, sodass dann ein Messsystem mit hoher Präzision und Genauigkeit verfügbar wäre. Möglichkeiten für Optimierungen liegen unter anderem im mechanischen Aufbau des Systems, welcher durch den Einbau der verwendeten Filter in ein ICOS-System verbessert werden kann. Ein mechanisch stabilerer Aufbau würde auch eine Verbesserung der Genauigkeit der Kalibration bewirken. Zusätzlich ist eine Untersuchung von Fehlereinflüssen auf die Auswertung durch Ungenauigkeiten in der HITRAN-Datenbank empfehlenswert. Diese Möglichkeiten werden in der Diskussion näher betrachtet.

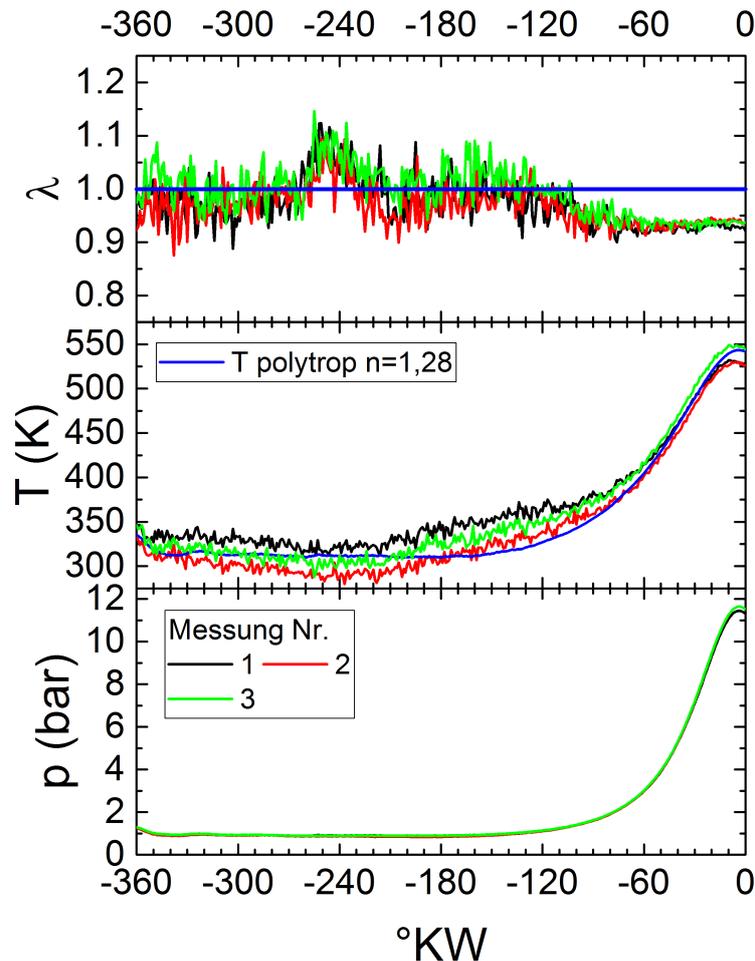


Abbildung 8.3: Messungen an Versuchsmotor 2 in geschlepptem Betrieb bei $\lambda = 1,0$ eingestellt über MFCs. Gezeigt sind λ -Wert, Temperatur T und Druck p für den Kurbelwinkelbereich von Zyklusbeginn bis zum OT für drei Messungen über je 100 Zyklen gemittelt.

Nach der Betrachtung von geschleppten Messungen folgen nun Messungen im gezündeten Betrieb bei analogem Vorgehen in Durchführung und Auswertung. Die einzige Ausnahme bildet die Bestimmung des Hintergrundsignals I_0 , welches im Zyklus bestimmt wird. Dafür wird das maximale Signal im Kurbelwinkelbereich von Beginn des Zyklus bis zum Öffnen der Einlassventile (bei -334 $^{\circ}$) und im Auslasstakt von 200 $^{\circ}\text{KW}$ bis 360 $^{\circ}\text{KW}$ bestimmt. Anschließend wird das Signal in einem Bereich von ± 2 $^{\circ}\text{KW}$ um das Maximum gemittelt und als Wert für I_0 gesetzt. In Abb. 8.4 sind der gemessene Druck p sowie die aus den Messdaten quantifizierte Temperatur T und der λ -Wert für drei Messungen bei $\lambda = 1,0$ von Zyklusbeginn bis zur Zündung bei -10 $^{\circ}\text{KW}$ gezeigt. Jede Messung besteht aus 100 Zyklen über welche gemittelt wurde. Die weiteren Messungen bei $\lambda = 1,1$ und $\lambda = 0,95$ zeigen ähnliche Kurvenverläufe und sind im Anhang in Abb. C.3 und Abb. C.4 zu

finden. Die Druckkurve in Abb. 8.4 verläuft völlig analog zum Druck in den geschleppten Messungen. Unterschiede ergeben sich erst nach der Zündung durch das Verbrennen des Methans, was für das Messsystem nicht von Interesse und daher in den Grafiken nicht gezeigt ist.

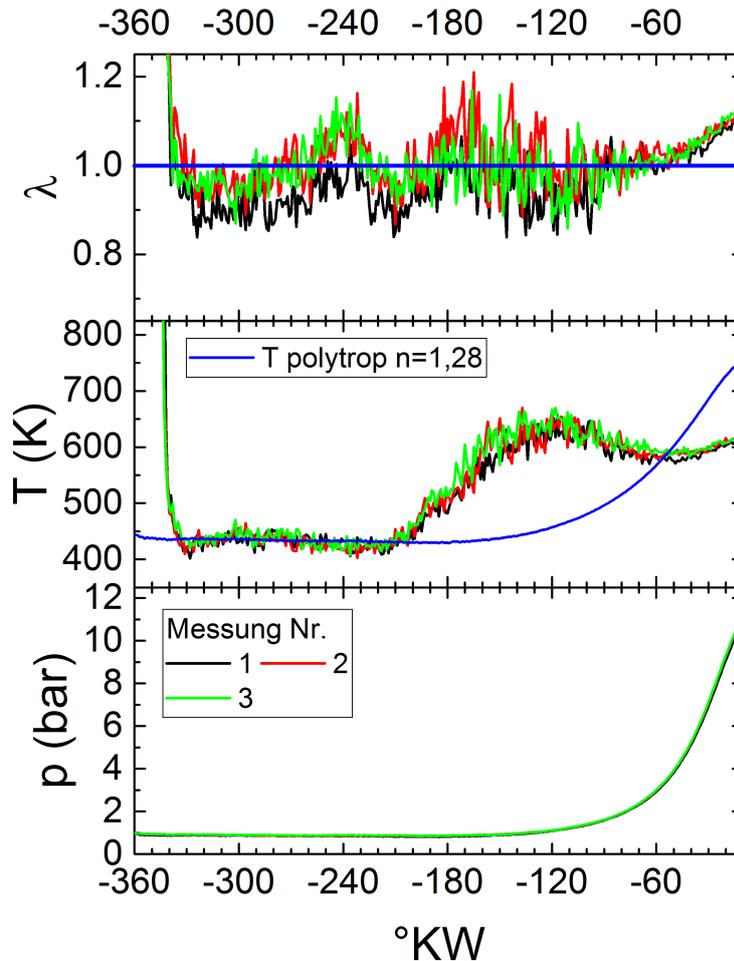


Abbildung 8.4: Messungen an Versuchsmotor 2 in gezündetem Betrieb bei $\lambda = 1,0$ eingestellt über MFCs. Gezeigt sind λ -Wert, Temperatur T und Druck p für den Kurbelwinkelbereich von Zyklusbeginn bis zur Zündung für drei Messungen über je 100 Zyklen gemittelt. Zusätzlich sind ein polytroper Temperaturverlauf und der nominelle λ -Wert als blaue Linie eingezeichnet.

Der Temperaturverlauf zeigt deutliche Abweichungen vom polytropen Verhalten, welches in den geschleppten Messungen zu sehen ist. Zu Beginn des Zyklus ist die Temperatur in den gezündeten Messungen mit über 800 K sehr hoch, was zwei Gründe hat. Zum einen ist durch die stattfindende Verbrennung zu Beginn des Zyklus heißes Restgas im Zylinder vorhanden. Dieses wird im Auslasstakt nicht vollständig aus dem Zylinder entfernt.

Sobald sich die Einlassventile öffnen, strömt ein kälteres Gasgemisch aus Frischluft und Methan ein, vermischt sich mit dem Restgas und die Temperatur sinkt. Allerdings erreicht die Temperatur im Einlasstakt (-360 °KW bis -180 °KW) mit $\approx 430\text{ K}$ deutlich höhere Werte (etwa 100 K mehr) als im geschleppten Betrieb. Der zweite Grund für die sehr hohe Temperatur zu Zyklusbeginn ist, dass vor dem Öffnen der Einlassventile bei -334 °KW bis auf etwaige minimale, nicht verbrannte Reste, kein Methan im Zylinder vorhanden ist. Daher schlägt, da die Transmission dann sehr nahe an eins liegt, die Temperaturbestimmung entweder fehl oder es kommt im Allgemeinen, bei sehr geringen Methandichten, zu einer Überschätzung der Temperatur. Im weiteren Verlauf des Zyklus steigt die Temperatur kurz vor Erreichen des unteren Totpunktes bei -180 °KW an und erreicht im Laufe der Kompression etwa 650 K . Ab -120 °KW sinkt die Temperatur wieder leicht um etwa 70 K und steigt dann von -50 °KW bis zur Zündung wieder fast auf das vorherige Niveau an. Dieser Temperaturverlauf weicht deutlich von einem polytropen Verhalten mit Polytropenexponent $n = 1,28$ aus den geschleppten Messungen ab, welches als blaue Linie in Abb. 8.4 Mitte gezeigt ist. Startdruck und -temperatur wurden über eine Mittelung der Messdaten im Bereich von -300 °KW bis -240 °KW bestimmt.

Die Abweichungen des Temperaturverlaufs vom polytropen Verhalten können durch den Einfluss des Spiegelkäfigs der ICOS-Zündkerzensonde verursacht werden, wie schon in Kap. 8.1 angesprochen. Zusätzlich kommen hier Einflüsse aufgrund der Gasströmung im Zylinder und die Vermischung des eingelassenen Methan-Luft-Gemisches mit dem Restgas im Zylinder zum Tragen. Das Restgas heizt den Spiegelkäfig der Sonde auf, wodurch die Temperatur vor der Kompression ein sehr hohes Niveau erreicht. Zum unteren Totpunkt hin verlangsamt sich die Strömung im Zylinder, da die Geschwindigkeit des Kolbens am unteren Totpunkt minimal wird und die Einlassventile bei -184 °KW schließen. Damit nimmt auch die Durchströmung des Spiegelkäfigs in der Zündkerzensonde ab, sodass das Gas im dortigen Volumen stärker aufgeheizt wird. Der Unterschied zu den Messungen mit dem ICOS-Temperature-System (siehe Abb. 8.2) sind jedoch signifikant und die Gründe dafür nicht direkt ersichtlich. Eine direkte Vergleichbarkeit der Messungen ist schwierig, da diese mit einem Abstand von 2 Wochen aufgenommen wurden. Der Verlauf des λ -Wertes ist allerdings ein Indiz dafür, dass die Temperaturbestimmung in Bereich von -180 °KW bis -60 °KW richtige Ergebnisse liefert.

Nach dem Öffnen der Einlassventile schwankt der λ -Wert um den nominell eingestellten Wert (horizontale, blaue Linie in Abb. 8.4 oben). Die Abweichungen vom nominellen Wert sind dabei auf Signalrauschen zurückzuführen und geben keinen Anlass einen systematischen Fehler zu vermuten. Ab etwa -60 °KW steigt der λ -Wert bis zur Zündung an, wobei das Rauschen deutlich geringer wird und es ergibt sich eine systematische Abweichung. Die Abweichung zwischen gemessenem und eingestelltem λ -Wert beträgt am Zündzeitpunkt im Mittel $7,6\%$ über alle Messungen. Die systematische Abweichung kann durch Fehler in der Bestimmung der Temperatur in diesem Kurbelwinkelbereich bedingt sein. Im gleichen Bereich, in dem der λ -Wert immer weiter vom nominellen Wert abweicht, steigt auch die Abweichung zwischen der gemessenen und der berechneten Temperatur. Gleichzeitig homogenisiert sich zur Zündung hin die Mischung aus Methan-Luft-Gemisch und Restgas. Letzteres wird vom Messsystem nicht erfasst und kann daher bei der Berechnung des λ -Wertes aus den Signalen nicht berücksichtigt werden. Dabei würde vorhandenes Restgas den Anteil an Frischluft in der Gesamtdichte verringern, was eine Reduzierung

des berechneten λ -Wertes zur Folge hätte. Dementsprechend würde der λ -Wert in Abb. 8.4 in die richtige Richtung korrigiert werden. Zusammengefasst erscheint das Messsystem in der Lage zu sein λ -Werte über weite Teile des Motorzyklus korrekt zu bestimmen und Abweichungen der Temperatur vom polytropen Verhalten korrekt zu erfassen. Zur Zündung hin ergibt sich jedoch eine systematische Abweichung des λ -Wertes, welche ihre Ursache in der bestimmten Temperatur und/oder in der Nichterfassung des Restgasanteils haben kann.

8.3 Realbetrieb am Motor

In diesem Abschnitt werden Messungen mit dem 2-Filter-ICOS-System bei normalen Motorbetrieb an Versuchsmotor 2, d.h. mit Eindüsung von Methan ins Saugrohr, vorgenommen. Die Einstellung unterschiedlicher λ -Werte erfolgt über die im Abgastrakt des Motors verbaute Lambdasonde. Bei Messungen mit der Lambdasonde kann es zu größeren Messungenauigkeiten bzw. systematischen Abweichungen vom gemessenen zum wahren Lambdawert kommen. Daher wurde zunächst bei Motorbetrieb mit MFCs der von der Lambda-Sonde gemessene Wert mit den Einstellungen der MFCs verglichen. Entsprechend wurden dann im Motorbetrieb mit Einspritzung die Einspritzzeiten angepasst und konstant gehalten, sodass λ -Werte von 0,95, 1,0 und 1,1 erreicht wurden. Messungen und Quantifizierung verlaufen nach dem gleichen Schema wie bei den Messungen mit MFCs im gezündeten Betrieb, welche im vorherigen Abschnitt beschrieben wurden. Es werden je drei Messungen zu 100 Zyklen, über welche vor der Auswertung gemittelt wird, durchgeführt. Eine Übersicht über den gemessenen Druck p , sowie quantifizierte Temperatur T und λ -Wert ist in Abb. 8.5 für den Kurbelwinkelbereich von Zyklusbeginn bis zur Zündung für die Messungen bei $\lambda = 1,0$ gezeigt. Die Messungen bei $\lambda = 0,95$ und $\lambda = 1,1$ zeigen qualitativ gleiche Verläufe und sind im Anhang in Abb. C.5 und Abb. C.6 zu finden.

Der Temperaturverlauf in Abb. 8.5 ist vergleichbar mit den Messungen mit MFCs in gezündetem Betrieb, jedoch ergeben sich Unterschiede im Verlauf des λ -Wertes. Zu Beginn des Einlasstaktes ist die Methandichte sehr gering, sodass keine Temperaturbestimmung möglich ist und dementsprechend auch keine Quantifizierung des λ -Wertes. Methan wird in das Saugrohr eingespritzt, wobei die Einspritzung beim Öffnen der Einlassventile bei -334 °KW endet. Ab -315 °KW sinkt der λ -Wert stark ab und steigt nach Durchlaufen eines Minimums von etwa $\lambda = 0,35$ bei etwa -275 °KW wieder stark an. Nach dem Öffnen der Einlassventile strömt zunächst Luft in den Zylinder dicht gefolgt von einer Methanwolke, welche das Messvolumen an der Zündkerze durchtritt. Die Methandichte ist nach dem Anstieg kurze Zeit wieder so gering, dass keine Quantifizierung möglich ist. Ab etwa -220 °KW sinkt der λ -Wert wieder, die Kompression im Zylinder beginnt und das Methan-Luft-Gemisch homogenisiert sich. Die Homogenisierung ist daran zu erkennen, dass sich der λ -Wert immer mehr dem eingestellten globalen Wert von $\lambda = 1,0$ annähert. Dementsprechend wird auch das Signal besser und das Rauschen geringer. Ab etwa -60 °KW ist das Gemisch homogen und etwa $\lambda = 1,0$ erreicht. Kurz vor der Zündung ab etwa -25 °KW steigt der λ -Wert dann wieder etwas über den eingestellten Wert an. Die Temperatur zeigt dabei ab etwa -180 °KW einen analogen Verlauf wie bei den Messungen mit MFCs im gezündeten Betrieb. Die Temperatur steigt mit Beginn der Kompression stark an und hält dieses Niveau bis auf das Durchlaufen eines kleinen Minimums vor der Zündung.

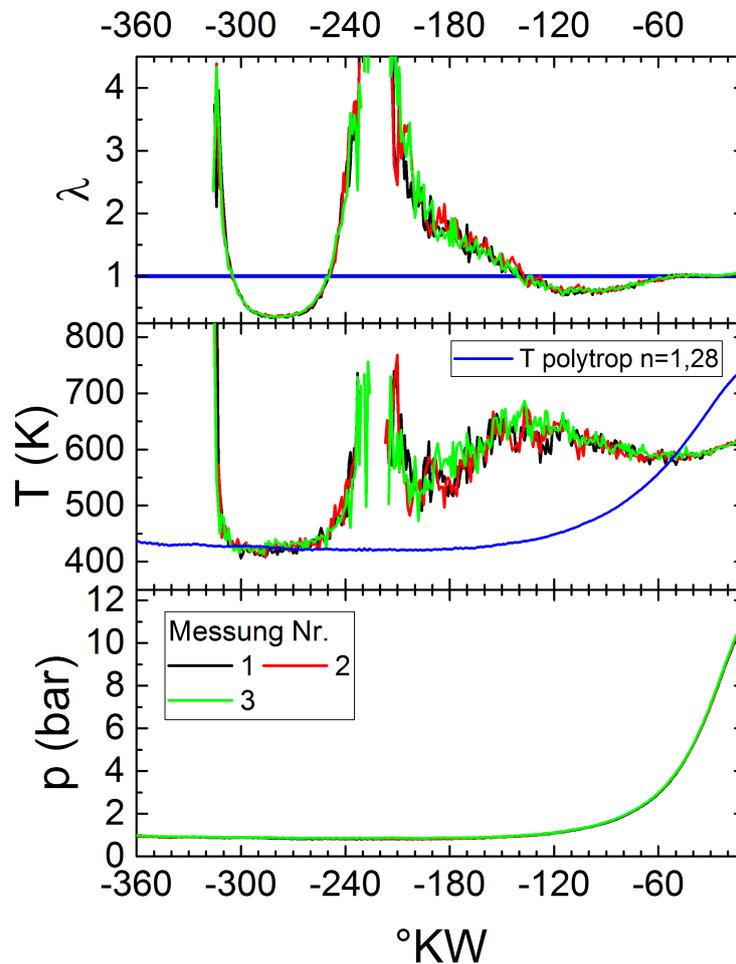


Abbildung 8.5: Messungen an Versuchsmotor 2 in gezündetem Betrieb bei $\lambda = 1,0$ mit konstanter Einspritzdauer. Gezeigt sind λ -Wert, Temperatur T und Druck p für den Kurbelwinkelbereich von Zyklusbeginn bis zur Zündung für drei Messungen über je 100 Zyklen gemittelt. Polytroper Temperaturverlauf und nomineller λ -Wert sind als blaue Linie eingezeichnet.

Der Verlauf des λ -Wertes in der Endphase der Kompression ist in Abb. 8.6 im Detail zusammen mit der Temperatur gezeigt. Es ist zu erkennen, wie sich der λ -Wert immer mehr dem eingestellten Wert annähert, diesen ab etwa -60 °KW erreicht, nahezu konstant bleibt und dann ab etwa -25 °KW nochmals steigt bis auf $\lambda \approx 1,08$ zum Zündzeitpunkt bei -10 °KW. Die Gründe für die Abweichung des gemessenen vom nominellen λ -Wert sind sehr wahrscheinlich die gleichen wie schon bei den Messungen mit vorgemischtem Gas per MFCs. Die Vermischung mit Restgas und dessen Einfluss auf die Berechnung der Frischluftmenge bei der Quantifizierung des λ -Wertes ist nicht berücksichtigt und die

Temperaturbestimmung kann Fehler enthalten. Weiterhin muss beachtet werden, dass der lokale λ -Wert an der Zündkerze zum Zündzeitpunkt vom globalen λ -Wert abweichen kann. Der lokale λ -Wert ist unbekannt, abhängig vom Verlauf der Gemischbildung und beeinflusst die Verbrennung. Dieser Zusammenhang ist ein Grund für den Einsatz der in der vorliegenden Arbeit entwickelten Messtechnik.

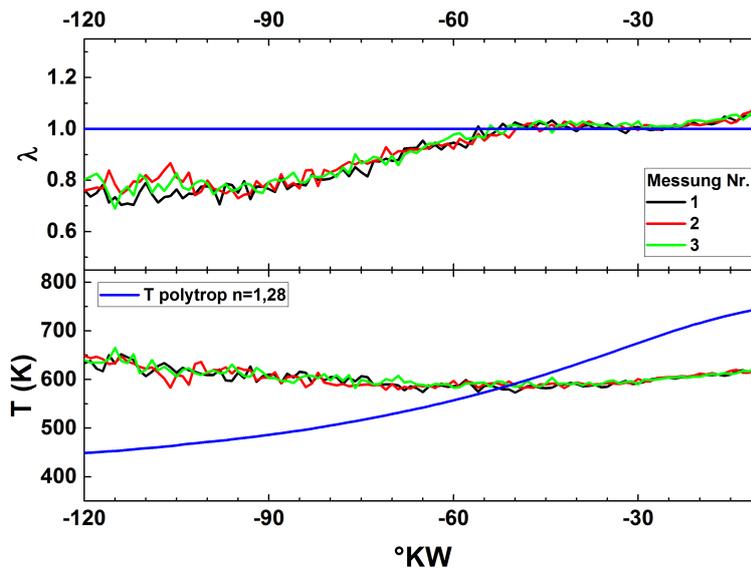


Abbildung 8.6: Messungen an Versuchsmotor 2 in gezündetem Betrieb bei $\lambda = 1,0$ mit konstanter Einspritzdauer. Gezeigt sind λ -Wert, Temperatur T und Druck p für den Kurbelwinkelbereich von -120 °KW bis zur Zündung für drei Messungen über je 100 Zyklen gemittelt sowie der nominelle λ -Wert als blaue Linie.

Alle bisher dargestellten Messungen wurden mit Methan 4.5 als Kraftstoff durchgeführt, um definierte Bedingungen zum Testen der Quantifizierungsstrategie zu gewährleisten. Bei normalem Motorbetrieb wird jedoch standardmäßig Erdgas (CNG, engl. compressed natural gas) verwendet, das zum Großteil (83-99 Vol-% bei H-Gas) aus Methan besteht, allerdings noch weitere Bestandteile enthält. Die weiteren Bestandteile sind Stickstoff (0,5-3 Vol-%), Kohlendioxid (<1,5 Vol-%) und weitere Kohlenwasserstoffe wie Ethan (<12 Vol-%), Propan (0,1-1 Vol-%) und Butan (0,1-1 Vol-%). Die Angaben entstammen einem Datenblatt der AirLiquide GmbH für H-Gas [58]. Bei den genannten Bestandteilen werden vor allem die zusätzlichen Kohlenwasserstoffe einen Einfluss auf die Quantifizierung ausüben, da diese im gleichen Wellenzahlbereich wie Methan Licht absorbieren. Aus diesem Grund wird sich ein Transmissionsspektrum aus der Überlagerung der Absorptionslinien aller vorhandener Kohlenwasserstoffe ergeben, woraus gegenüber reinem Methan eine andere, breitbandige Transmission resultiert. Da die genaue Zusammensetzung des Erdgases, welches für Messungen im Motor verwendet wird, Schwankungen unterworfen ist, ist eine allgemeingültige Kalibration durch Druckzellenmessungen im Vorfeld der Motor-messungen wie bei Methan kaum möglich. Durch diese Unterschiede zwischen Methan

und CNG ist es sinnvoll die Quantifizierung anhand von Messungen im Motor mit CNG zu testen.

Die Motormessungen werden bei Einspritzung von Methan 4.5 oder Erdgas für λ -Werte von $\lambda = 1,1$, $\lambda = 1,0$ und $\lambda = 0,95$ durchgeführt. Durchführung und Auswertung laufen analog zu den oben gezeigten Messungen bei Einspritzung von Methan. Die Messungen erfolgen hier mit dem von der LaVision GmbH aufgebauten 2-Filter-ICOS-System, in welches die Filterkombination 3329-3552 eingebaut wurde. Dieses System hat aufgrund schlechter Detektoren ein schlechteres Signal-Rausch-Verhältnis als der justierbare optische Aufbau, der in allen anderen Messungen verwendet wurde (siehe Kap. 5.3). Allerdings konnten aufgrund zeitlicher Engpässe Vergleichsmessungen von CNG und Methan mit dem justierbaren optischen Aufbau an Versuchsmotor 2 nicht mehr durchgeführt werden. Zur teilweisen Kompensation des hohen Signalrauschens werden die Daten vor der Auswertung mittels eines gleitenden Mittelwertes über je 5 Datenpunkte geglättet. Erst diese Glättung der Signale macht eine Auswertung möglich, da bei zu starkem Rauschen der Auswertealgorithmus der 2-Filter-Methode (siehe Kap. 4.3.3) unabhängig vom verwendeten Kraftstoff nicht funktioniert. Das bedeutet, dass mit Hilfe der Signale der beiden Filter kein übereinstimmendes Paar aus Temperatur und Dichte gefunden wird. In Abb. 8.7 sind der Druck p und die aus den Signalen bestimmte Temperatur T und der λ -Wert für Methan (schwarz) und CNG (rot) sowie der nominelle λ -Wert (blaue Linie) gezeigt. Fehlende Datenpunkte in T und λ entstehen durch ein Fehlschlagen des Auswertealgorithmus. Die Messungen bei $\lambda = 1,1$ und $\lambda = 0,95$ zeigen einen ähnlichen Verlauf und sind im Anhang in Abb. C.7 und Abb. C.8 zu sehen. Der Verlauf des λ -Wertes stimmt qualitativ mit den entsprechenden Messungen mit der Filterkombination 3485-3420 überein (siehe Abb. 8.5). Allerdings ist das Rauschen trotz Glättung größer, wodurch auch die Streuung der λ -Werte größer ist und der Auswertealgorithmus teilweise fehlschlägt. Die größere Streuung ist vor allem im Temperaturverlauf gut zu erkennen, in dem an einigen Punkten (zwischen -310 und -250 °KW) die quantifizierte Temperatur für CNG starke Sprünge bis auf 1000 K zeigt, was die Grenze der Datenbank, welcher der Auswertung zugrunde liegt, markiert. In diesem Bereich im Zyklus ist der Signalhub verglichen mit dem Rauschen so groß, dass zu erwarten wäre, dass der Auswertealgorithmus korrekt funktioniert, wie dies für Methan gegeben ist. Dass dies bei CNG nicht der Fall ist, deutet darauf hin, dass hier die spektroskopischen Unterschiede zwischen Methan und CNG einen Fehler in der Auswertung produzieren. Diese Fehler lassen sich auf Basis des aktuellen Vorgehens nur vermeiden, wenn die spektroskopischen Eigenschaften für das im Experiment verwendete CNG bekannt sind, um eine entsprechende Kalibration vornehmen zu können. Dies ist allerdings, wie oben schon angemerkt, kaum realisierbar.

Weiterhin schlägt die Auswertung für CNG im Bereich von etwa -150 bis etwa -80 °KW teilweise fehl. An einigen wenigen Punkten in diesem Bereich schlägt auch die Auswertung bei Methan fehl. Daher ist anzunehmen, dass diese Fehler in der Auswertung eher auf ein schlechtes Signal-Rausch-Verhältnis, als auf die spektroskopischen Unterschiede zwischen Methan und CNG zurückzuführen sind. Im Allgemeinen zeigt der quantifizierte λ -Wert für CNG qualitativ den gleichen Verlauf wie für Methan, wobei die Werte für CNG systematisch nach unten abweichen.

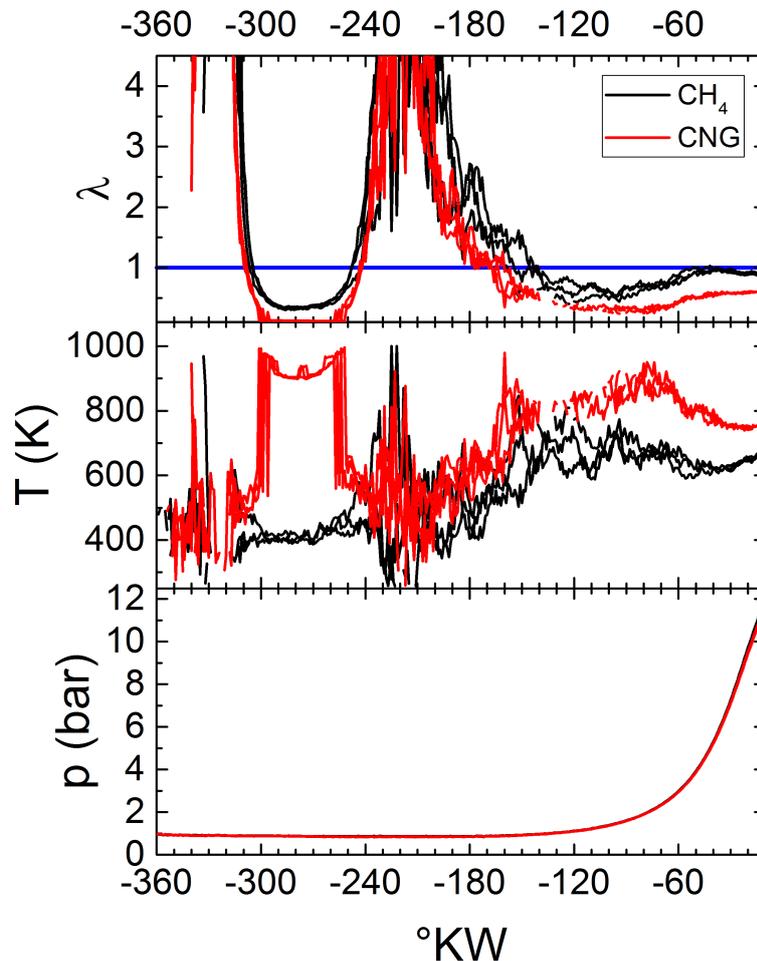


Abbildung 8.7: Vergleichsmessungen von Methan 4.5 und CNG an Versuchsmotor 2 in gezündetem Betrieb bei $\lambda = 1,0$ mit konstanter Einspritzdauer. Gezeigt sind λ -Wert, Temperatur T und Druck p für den Kurbelwinkelbereich von Zyklusbeginn bis zur Zündung für Methan (schwarz) und CNG (rot). Es wurden je drei Messungen zu 100 Zyklen aufgenommen, die blaue Linie zeigt den eingestellten λ -Wert an.

Der Messbereich von -120 °KW bis zur Zündung bei -10 °KW ist in Abb. 8.8 im Detail für Temperatur T und λ -Wert gezeigt. Für beide Kraftstoffe, Methan und CNG, wird der λ -Wert ab etwa -40 °KW nahezu konstant. Dabei zeigen sich im Verlauf für Methan leichte Schwankungen und bei CNG ein leichter Anstieg bis zur Zündung. Insgesamt zeigen jedoch beide Verläufe eine systematische Abweichung gegenüber dem nominellen Wert zu niedrigeren Werten. Über alle Messungen gemittelt ergibt sich für Methan eine Abweichung von etwa 8% und für CNG von etwa 41% im Bereich ab -40 °KW bei einer Präzision von 3,0% bzw. 2,7%. Aufgrund der ähnlichen Verläufe für Methan und CNG und der systema-

tischen Abweichung erscheint eine in-situ Kalibration anhand eines definierten λ -Wertes möglich. Anhand der gezeigten Motormessungen für CNG könnte ein Kalibrationsfaktor als Verhältnis aus nominellem und gemessenem λ -Wert im Kurbelwinkelbereich kurz vor der Zündung bestimmt werden. Dieser würde dann an die quantifizierten λ -Werte multipliziert werden, um diese zu korrigieren. Dieses Vorgehen muss jedoch unter mehreren Aspekten kritisch untersucht werden. Der erste kritische Punkt ist, dass die in-situ Kalibration nicht das Fehlschlagen des Auswertalgorithmus im Einlasstakt verhindern, was dafür sorgt, dass in diesem Teil des Zyklus λ -Werte falsch quantifiziert werden. Hier kommen die spektroskopischen Unterschiede zwischen Methan und CNG zum Tragen. Diese Unterschiede erfordern eine Kalibration der Berechnungen auf das in den Messungen genutzte CNG analog zu den Kalibrationsmessungen, die an Druckzellen mit Methan vorgenommen wurden (siehe Kap. 5.4). Wenn die Kalibration für CNG erfolgreich ist, sodass der Auswertalgorithmus keine Fehlschläge mehr zeigt, können geringe Unterschiede in der Zusammensetzung des CNG vermutlich durch die erwähnte in-situ Kalibration ausgeglichen werden. Der zweite kritische Punkt ist, dass die in-situ Kalibration nur funktionieren kann, wenn in einem Bereich bis kurz vor der Zündung ein homogenes Gemisch mit bekanntem, lokalen λ -Wert vorliegt. Wie oben schon erwähnt, kann der lokale λ -Wert vom globalen abweichen wozu noch der Messfehler des Systems hinzukommt. Außerdem ist, abhängig von den Betriebsparametern des Motors, nicht zwingend zu erwarten, dass das Gemisch zum Zündzeitpunkt homogen ist.

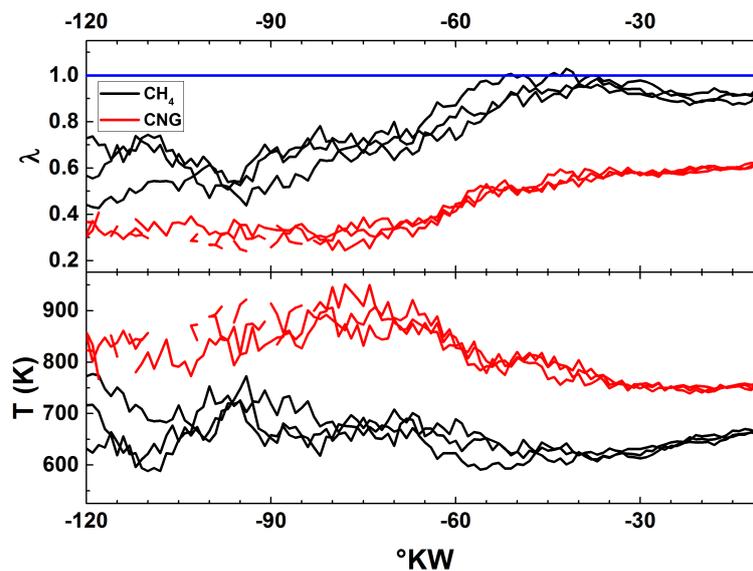


Abbildung 8.8: Vergleichsmessungen von Methan und CNG an Versuchsmotor 2 in gezündetem Betrieb bei $\lambda = 1,0$ mit konstanter Einspritzdauer. Gezeigt sind λ -Wert, Temperatur T und Druck p für den Kurbelwinkelbereich von -120 °KW bis zur Zündung für Methan (schwarz) und CNG (rot). Es wurden je drei Messungen zu 100 Zyklen aufgenommen, die blaue Linie zeigt den eingestellten λ -Wert an.

Um die Anwendbarkeit der Messmethode bei Nutzung von CNG als Kraftstoff zu verbessern, wurden erste Versuche unternommen, die Kalibration der für Methan berechneten Look-up-Tabelle anzupassen. Hierfür wurde von den Kalibrationsmessungen ausgegangen, welche für die Auswertung der in Abb. 8.7 gezeigten Messungen am 2-Filter-ICOS-System mit den Filtern 3552 und 3329 durchgeführt wurden. Um die Variation der Kalibration zu vereinfachen wurde eine lineare Funktion $\tau_{mess} = m \cdot \tau_{calc} + 1 - m$ mit Fixpunkt bei (1,1) ähnlich wie in Kap. 5.3 an die Kalibrationsdaten angefügt. Die erhaltenen Parameter sind

$$\text{Filter 3552: } m_{3552} = 1.036(1)$$

$$\text{Filter 3329: } m_{3552} = 0.999(1).$$

Ausgehend von diesen Parametern wurde m_{3552} in Schritten von 0.01 in einem Bereich von ± 0.2 variiert und auf die Auswertung angewendet. Die beste Übereinstimmung zwischen den quantifizierten λ -Werten von CNG und Methan ergibt sich bei $m_{3552} = 1,15$ für die Auswertung der Messungen mit CNG. Die Auswertung der Messungen mit Methan erfolgt mit den Standard-Parametern. In Abb. 8.9 sind die für CNG anhand der veränderten Kalibration quantifizierte Temperatur T sowie der λ -Wert zusammen mit den Ergebnissen für Methan aus Abb. 8.7 gegen den Kurbelwinkel aufgetragen sowie eine blaue Linie für den nominellen Wert von $\lambda = 1,0$ eingezeichnet. Die Daten für $\lambda = 0,95$ und $\lambda = 1,1$ sehen qualitativ sehr ähnlich aus und befinden sich im Anhang in Abb. C.9 und Abb. C.10.

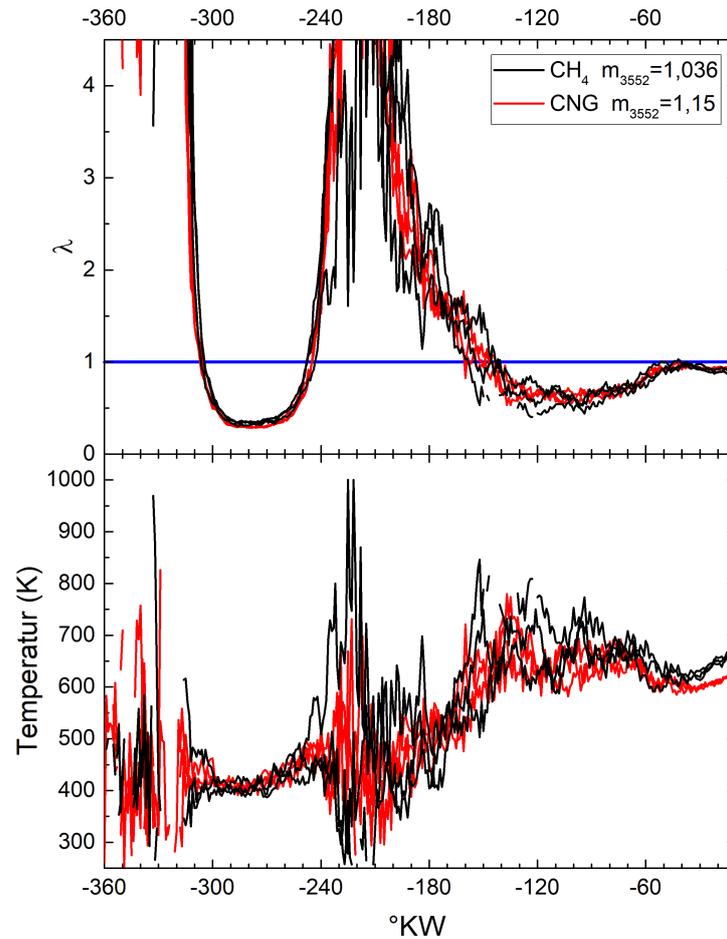


Abbildung 8.9: Vergleichsmessungen von Methan und CNG bei veränderter Kalibration an Versuchsmotor 2 in gezündetem Betrieb bei $\lambda = 1,0$ mit konstanter Einspritzdauer. Gezeigt sind λ -Wert und Temperatur T für den Kurbelwinkelbereich bis zur Zündung für Methan (schwarz) und CNG (rot). Es wurden je drei Messungen zu 100 Zyklen aufgenommen, die blaue Linie zeigt den eingestellten λ -Wert an.

Anhand der Abb. 8.9 ist zu erkennen, dass die Kurvenverläufe für Methan und CNG innerhalb der Schwankungen der Kurvenverläufe übereinstimmen. Allein für die Temperatur ist ab etwa -40 °KW eine Abweichung für CNG zu niedrigeren Temperaturen feststellbar. Der Bereich von -120 °KW bis zur Zündung ist im Detail in Abb. 8.10 dargestellt. Auch hier ist zu erkennen, dass der Verlauf des λ -Wertes für Methan und CNG innerhalb des Rauschens quantitativ gleich ist. Das bedeutet eine Anpassung der Kalibration auf CNG ausgehend von Berechnungen für Methan erscheint prinzipiell möglich. Die Änderungen am Parameter m_{3552} sind dabei jedoch relativ groß und die Übertragbarkeit auf unter-

schiedliche Arten von CNG muss getestet werden. Weiterhin scheint die Anpassung eines einzigen Kalibrationsparameters nicht vollständig auszureichen, wie die Abweichungen im Temperaturverlauf verdeutlichen. Zusätzlich bleiben die generellen Probleme dieser Anpassung auf Basis einer in-situ Kalibration, wie weiter oben erwähnt, bestehen.

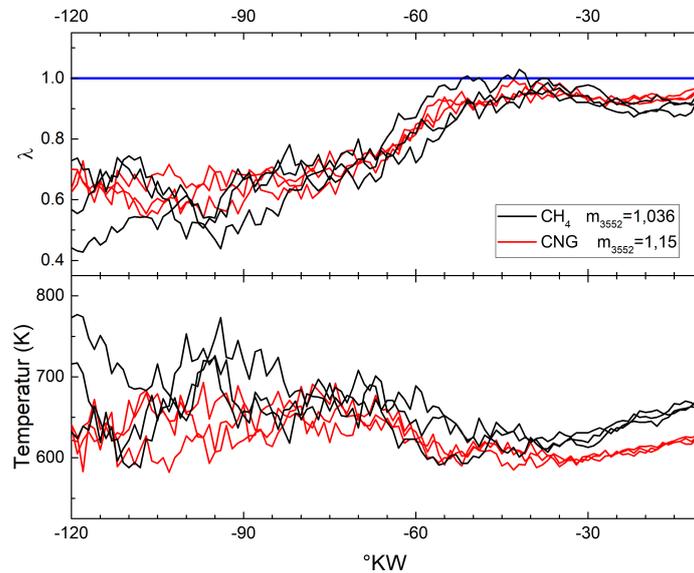


Abbildung 8.10: Vergleichsmessungen von Methan und CNG bei veränderter Kalibration an Versuchsmotor 2 in gezündetem Betrieb bei $\lambda = 1,0$ mit konstanter Einspritzdauer. Gezeigt sind λ -Wert und Temperatur T für den Kurbelwinkelbereich von -120 °KW bis zur Zündung für Methan (schwarz) und CNG (rot). Es wurden je drei Messungen zu 100 Zyklen aufgenommen, die blaue Linie zeigt den eingestellten λ -Wert an.

9 Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der in den einzelnen Kapiteln gezeigten Messungen diskutiert. Die teilweise schon in den Einzelkapiteln dargestellte Bewertung der Messergebnisse werden dafür hier zusammengeführt und gegebenenfalls ergänzt. Schlussendlich führt dies zu einer Bewertung der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Messtechnik und zu Ansätzen für deren Weiterentwicklung.

Die grundsätzliche Untersuchung des Absorptionsverhaltens von Methan über Messungen per FTIR-Spektroskopie und 1-Filter-ICOS-System in Kap. 5.1 liefert zwei Erkenntnisse. Erstens ergeben sich durch den in dieser Arbeit gemachten Ansatz einer breitbandigen Absorptionsmesstechnik Abhängigkeiten der gemessenen Transmission von Druck und Temperatur. Diese sind zum einen bedingt durch die Nutzung von Bandpassfiltern und zum anderen durch die spektroskopischen Eigenschaften von Methan in Hinblick auf Änderungen von Druck und Temperatur. Zweitens liefern die Berechnungen auf Basis der HITRAN-Datenbank leichte Abweichungen zu den Messungen per FTIR-Spektrometer. Gerade im betrachteten Druckbereich von 5 bis 40 bar können die Abweichungen durch Ungenauigkeiten in der HITRAN-Datenbank entstehen, da die Bestimmung korrekter Druckverbreiterungskoeffizienten und Linienintensitäten stets mit Unsicherheiten behaftet ist [50, 59]. Nichtsdestotrotz erscheinen die Berechnungen auf Basis der Datenbank gut genug, um die in dieser Arbeit entwickelte Quantifizierungsstrategie darauf aufzubauen, wie die weiteren Experimente zeigen.

Die Messungen in Druckzellen mit dem 1-Filter- und 2-Filter-System in Kap. 5.2-5.4 zeigen, dass kleine Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Transmissionen durch eine Kalibration ausgeglichen werden können. Die Kalibration beruht auf einer Anpassung der Daten mit einer linearen oder polynomen Funktion, je nachdem welche die Messungen am besten beschreibt. Dabei ist zu vermuten, dass die Abweichungen zwischen Theorie und Experiment unter anderem durch in der Berechnung nicht berücksichtigte, optische Komponenten des Systems wie z.B. Linsen und Saphir-Fasern in der Zündkerzensonde, zu Stande kommen. Ein Indiz dafür ist, dass die Abweichungen zwischen Messung und Berechnung größer ist, je breitbandiger der betrachtete Filter ist. Je breiter der Filter, umso mehr Absorptionslinien des Methanspektrums werden von der Transmissionskurve einer optischen Komponente beeinflusst und umso mehr wirkt sich dies in der breitbandigen Transmission aus. Dieser Effekt ist im Vergleich der Kalibrationsmessungen des schmalbandigen Filters 3485 mit dem breitbandigen Filter 3420 sichtbar in Kap. 5.4. Bei Filter 3485 liegen gemessenen und berechnete Transmissionen deutlich dichter an der idealen Übereinstimmung als bei Filter 3420. Eine weitere Quelle für Abweichungen zwischen berechneter und gemessener Transmission kann die Stellung der Filter im Strahlengang sein. Die Bandpassfilter sind im Messsystem verkippt eingebaut, was dafür sorgt, dass sich deren Transmissionskurve gegenüber senkrechtem Lichteinfall verschiebt. Bestehen leichte Unterschiede im Einfallswinkel zwischen der Messung der Transmissionskurve im

FTIR-Spektrometer und im Messsystem sorgt dies für unterschiedliche Transmissionen in Messung und Berechnung. Beim ICOS-System wird dieses Problem dadurch umgangen, dass die Filter vor der Messung im FTIR-Spektrometer in einen Metallhalter eingeklebt werden und anschließend mit dem Halter in das ICOS-System eingebaut werden. So sollten unterschiedliche Verkippungen weitgehend vermieden werden. Beim justierbaren optischen Aufbau, der bei Messungen in der RCM (siehe Kap. 7) und in Versuchsmotor 2 (siehe Kap. 8) verwendet wurde, besteht diese Möglichkeit jedoch nicht. Daher muss eine finale Bewertung der Messtechnik mit einem gegenüber dem justierbaren optischen Aufbau mechanisch stabileren ICOS-System erfolgen. Zusätzlich können die im vorherigen Absatz erwähnten Ungenauigkeiten in der HITRAN-Datenbank zu Abweichungen zwischen Messungen und Berechnungen führen.

Es wäre ideal den vollständigen spektralen Einfluss des optischen Aufbaus zu kennen, sodass keine Kalibration mehr nötig wäre. Allerdings stellt sich die Frage in wie weit dies mit Blick auf den angedachten Einsatzort des Messsystems praktikabel und möglich ist. Je nach verwendeter Zündkerzensonde oder Faser können sich leichte Unterschiede in der spektralen Transmission ergeben, sodass bei einem Wechsel dieser Komponenten neue Kalibrationsmessungen mit dem gesamten System notwendig wären. Weiterhin können bedingt durch Ein- und Ausschrauben der Fasern beim Aufbau des Systems für Messungen leicht unterschiedliche mechanische Stellungen der Fasern von Messung zu Messung entstehen. Die unterschiedliche Stellung der Faser hätte einen Einfluss auf die Einkopplung des Lichtes in die Faser, was ebenfalls einen spektralen Einfluss ausüben und damit die Kalibration ändern würde [19]. Um eine optimale Genauigkeit des Systems zu erreichen, kann es daher notwendig werden Kalibrationsmessungen direkt vor Beginn der eigentlichen Messungen mit dem kompletten System durchzuführen. Diese Kalibration könnte evtl. über Messungen im jeweiligen Versuchsmotor zusätzlich zu vorher durchgeführten Messungen in Druckzellen geschehen.

Anhand von Messungen mit der Saugrohrsonde im Strömungskanal und in den Versuchsmotoren 1 und 2 in Kap. 6 wurde gezeigt, dass die Quantifizierung von Methan innerhalb einer Genauigkeit von 7,1% funktioniert. Hierbei ist zu beachten, dass bei den Validierungsmessungen ein zeitlicher Versatz (1-2 Minuten) zwischen Hintergrund- und eigentlicher Messung besteht. Dieser Versatz kann zu Abweichungen zwischen gemessenem und wahren Hintergrundsignal I_0 aufgrund von Intensitätsschwankungen der Lichtquelle kommen. Diese Intensitätsschwankungen entstehen durch thermische Variationen im Lichtquellengehäuse und beeinflussen auch das Emissionsspektrum der Lichtquelle. Daher kann diese Variation nicht vollständig über eine Korrektur mit Hilfe des Referenzkanals ausgeglichen werden. Aus diesem Grund kommt es teilweise zu systematischen Abweichungen zwischen einzelnen Messungen, da eine in-situ Kalibration wie bei Messungen in der RCM oder im Versuchsmotor nicht möglich ist. Bei Einsatz des Messsystems unter realen Bedingungen, d.h. bei Eindüsung von Methan, wird I_0 direkt bei der Messung in Bereichen des Motorzyklus ohne Methan erfasst, sodass eine korrekte I_0 -Bestimmung gewährleistet ist.

Durch die Validierungsmessungen mit der Saugrohrsonde hat sich herausgestellt, dass ein limitierender Faktor für die Genauigkeit der Messungen die Annahme einer konstanten Temperatur ist, die für die Auswertung dieser Messungen mangels besserer Informationen

gemacht werden musste. Anhand der Druckkurven konnte abgeschätzt werden, dass eine Temperaturvariation innerhalb eines Zyklus in der Größenordnung von etwa 20 K vorhanden sein muss. Temperaturänderungen haben im Allgemeinen eine geringere Auswirkung auf die Bestimmung der Methandichte als auf die Berechnung der Gesamtgasdichte, welche benötigt wird, um den λ -Wert zu berechnen. In den für das Messsystem angedachten Einsatzszenarien kann es außerdem zu deutlich höheren Temperaturvariationen im Saugrohr kommen, als hier beobachtet. Je nach Einstellung der Ventilsteuerzeiten des jeweiligen Motors kann es zu Rückströmungen heißen Restgases in das Saugrohr und damit auch in das Messvolumen kommen. Aus diesen Gründen ist es sinnvoll die 2-Filter-Methode auch für Messungen im Saugrohr zu adaptieren. Dafür ist eine Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses erforderlich, was durch Optimierung der Filter, Detektoren und der Lichtquelle geschehen kann und Gegenstand weiterer Entwicklungsarbeit über den Rahmen dieser Arbeit hinaus ist. Weiterhin ist es notwendig die Stabilität des mechanischen Designs der Saugrohrsonde zu verbessern, um Fluktuationen der Detektorsignale weiter zu minimieren. In den Messungen beobachtete Fluktuationen der Signale können zwar teilweise mit Hilfe des Referenzkanals korrigiert werden, jedoch ist die Korrektur nicht vollständig und fügt dem Signal ein zusätzliches Rauschen durch das Signalrauschen des Referenzkanals hinzu.

Durch die Entwicklung der 2-Filter-Methode kann neben der Methandichte gleichzeitig die Temperatur gemessen werden. Zur Validierung der Temperaturmessung wurden Messungen mit dem ICOS-Temperature-System durchgeführt (siehe Kap. 7.1 und Kap. 8.1). Mit Hilfe dieser Messungen konnte am Motor und an der RCM das mit der 2-Filter-Methode gemessene Temperaturverhalten weitgehend bestätigt werden. Dazu diente neben dem direkten Vergleich der Temperaturkurven eine Anpassung des Modells einer polytropen Verdichtung an die Messdaten. Außerdem hat sich gezeigt, dass die gemessene Temperatur je nach optischem Aufbau, d.h. bei Verwendung von LOS- oder M12-Sonde, unterscheidet. Im Allgemeinen steigt die Temperatur in der Kompression, sowohl in der RCM als auch im Versuchsmotor, bei Messungen mit der M12-Sonde langsamer an, als bei Messungen mit der LOS-Sonde. Dieser Effekt lässt sich auf den metallenen Spiegelkäfig des Zündkerzensensors zurückführen und durch die Anpassung einer polytropen Verdichtung über unterschiedliche Polytropenexponenten teilweise quantifizieren. Außerdem misst die M12-Sonde in Wandnähe, wo es zu Wärmeverlusten kommen kann, welche von einer LOS-Sonde nicht erfasst werden können. Die Anpassung einer polytropen Verdichtung an die Messdaten der RCM-Messungen ist schwierig, da durch Signalverluste nur Teile der Kompression zur Verfügung stehen. Daher sollten die exakten Werte der Polytropenexponenten bei allen Messungen nicht überbewertet werden, insbesondere nicht im Vergleich mit den 2-Filter-Messungen. Vielmehr ist wichtig zu erkennen, dass die Tendenzen im Temperaturverhalten gleich sind und sich die beiden Messsysteme dadurch gegenseitig validieren.

Bei Betrachtung der Messungen mit MFCs an Versuchsmotor 2 fällt auf, dass die mit dem 2-Filter-System gemessene Temperatur im geschleppten Betrieb qualitativ den gleichen Temperaturverlauf wiedergeben wie das ICOS-Temperature-System. Im Vergleich dazu ist im gezündetem Betrieb der mit dem 2-Filter-System gemessene Temperaturverlauf deutlich anders. Bei diesem Vergleich ist zu beachten, dass zwischen den ICOS-Temperature- und den 2-Filter-Messungen ein Abstand von 2 Wochen lagen. In dieser Zeit mussten

Reparaturen an Versuchsmotor 2 vorgenommen werden. Die Kolbenringe mussten unter anderem auf Grund von Verschleiß ausgetauscht werden. Die genauen Auswirkungen auf das Verhalten des Motors sind schwer zu beziffern. Unterschiede in den Messungen vor und nach den Reparaturen sind direkt anhand der Rohsignale der Detektoren der ICOS-Systeme sichtbar. Bei den Signalen vor den Reparaturen ist das Korrektursignal, welches aus dem Referenzkanal bestimmt wird, größer, was auf Verschmutzungseffekte hindeutet. Erhöhte Verschmutzung kann durch undichte Kolbenringe entstehen, wodurch eine größere Menge Öl in den Brennraum gelangt, welches Licht im gleichen Wellenzahlbereich wie Methan absorbiert und damit die Messungen beeinflussen kann. Ein weiterer Einflussfaktor kann die Stellung des Spiegelkäfigs relativ zur Strömung sein. Je nach dem, ob eine Öffnung oder ein Metallsteg des Käfigs von der Gasströmung angeblasen wird, kann sich der Wärmeübertrag auf den Metallkäfig unterscheiden. Durch Änderungen im Wärmeübertrag ändert sich auch das mit der M12-Sonde gemessene Temperaturverhalten. Leider war es nicht möglich Messungen mit dem ICOS-Temperature-System und der M12-Sonde nach den Reparaturen durchzuführen. So muss eine vollständige Erklärung der unterschiedlichen Temperaturverläufe ausbleiben. Allerdings erscheint der Temperaturverlauf, den das 2-Filter-System misst dahingehend sinnvoll, dass, bis auf Abweichungen in der Endphase der Kompression, der korrekte λ -Wert gemessen wird.

Die Messungen des λ -Wertes mit der 2-Filter-Methode in der RCM und in Versuchsmotor 2 (siehe Kap. 7.2 und Kap. 8.2) zeigen, dass die entwickelte Quantifizierungsstrategie mit hoher Präzision (0,7-1,5%) und guter Genauigkeit (5-7%) funktioniert, allerdings noch systematische Abweichungen zu hohen Drücken und Temperaturen vorhanden sind. Bei Betrachtung der Validierungsmessungen muss beachtet werden, dass sich der Messfehler, der am Motor eingesetzten MFCs auf die Einstellung eines λ -Wertes auswirkt. Über eine Fehlerfortpflanzung lässt sich ein Fehler im λ -Wert von etwa 1,8% berechnen. Das heißt, dass anhand der vorliegenden Messungen die Genauigkeit des Messsystems höchstens auf 1,8% bestimmt werden kann. Der MFC für Methan wurde bei Durchflüssen von etwa 0,6 kg/h betrieben, was weniger als 10% des maximalen Durchflusses von 7 kg/h beträgt. In diesem Bereich kann es neben den üblichen Messfehlern zu systematischen Abweichungen im Durchfluss kommen. Weitere systematische Abweichungen können durch Ungenauigkeiten in der HITRAN-Datenbank entstehen, wie weiter oben angesprochen. Eine weitere Ursache für systematische Abweichungen können Ungenauigkeiten in der Kalibration sein wie schon bei der Diskussion der Druckzellenmessungen erwähnt. Ungenauigkeiten in der Kalibration und der Datenbank wirken sich auf die Bestimmung der Methandichte und der Temperatur aus. Gerade letztere hat einen großen Einfluss auf die Berechnung des λ -Wertes. Daher ist es auffällig, dass systematische Abweichungen im λ -Wert immer mit Abweichungen zwischen gemessener und polytrop berechneter Temperatur einher gehen. Dabei ist bekannt, dass es bei Nutzung der HITRAN-Datenbank zur Temperaturbestimmung über spektral aufgelöste Messungen zu Überschätzungen der Temperatur durch ungenaue Berechnung der Druckverbreiterung kommt [60, 61]. Die Auswirkung dieser Effekte auf breitbandige Transmissionsmessungen muss daher im Detail untersucht und bewertet werden.

Zur Sicherstellung einer gleichbleibenden Kalibration des Systems ist die mechanische Stabilität des verwendeten justierbaren optischen Aufbaus für Messungen mit der 2-Filter-Methode ein wichtiger Faktor. Für die Messungen an der RCM und an Versuchsmotor

2 musste der optische Aufbau über weite Strecken transportiert werden. Ein Aus- und Wiedereinbau der Filter hat, wie an Druckzellenmessungen zu sehen ist, direkte Auswirkungen auf die Kalibration, da sich die Stellung der Filter im Strahlengang und somit deren Transmissionskurve leicht verändert. Daher ist es möglich, dass sich durch den Transport das optische System geringfügig ändert, sodass die zuvor ermittelte Kalibrationsfunktion nicht mehr vollkommen korrekt ist. Für eine abschließende Beurteilung der Genauigkeit des Systems ist es daher notwendig ein mechanisch stabiles ICOS-System mit zur verwendeten Filterkombination passenden Detektoren aufzubauen und zu testen. Hierdurch sollten mechanische Änderungen am optischen System durch Transport vermieden werden.

Bei der Berechnung des λ -Wertes anhand der gemessenen Methandichte wird in dieser Arbeit der Anteil an Restgas, welches durch die Verbrennung entsteht, vernachlässigt, da dieser mit dem verwendeten System nicht gemessen werden konnte. Dies sollte eine Überschätzung der Frischluftmenge zur Folge haben, sodass der berechnete λ -Wert ebenfalls überschätzt wird. In gezündeten Messungen an Versuchsmotor 2 sind sowohl bei Nutzung der MFCs als auch bei Eindüsung von Methan kurz vor der Zündung Abweichungen des λ -Wertes nach oben zu sehen. Das ICOS-System ermöglicht prinzipiell die Messung von Restgas über die Messung der Absorption von H_2O und CO_2 bei $2,7 \mu\text{m}$. Da die Auswertung der Signale jedoch auf einer empirischen Kalibration beruht, funktioniert diese nur in gewissen Grenzen mit hinreichender Genauigkeit. Weiterhin war es leider technisch nicht möglich parallel Messungen des Restgases mit Messungen des 2-Filter-Systems durchzuführen. Um die bestmögliche Messgenauigkeit zu erreichen, ist eine Weiterentwicklung der Restgasbestimmung sowie eine Kombination mit dem 2-Filter-System notwendig. Diese Kombination erfordert eine Erweiterung des ICOS-Systems von vier auf fünf Messkanäle. Mit diesem erweiterten ICOS-System könnten zeitaufgelöste Messungen des Restgasanteils mit Messungen der Methandichte kombiniert werden, um den Frischluftanteil im Messvolumen korrekt zu berechnen und die Genauigkeit der Berechnung des λ -Wertes zu erhöhen.

Bei den Messungen mit dem 2-Filter-ICOS-System in Versuchsmotor 2 wurden außerdem Messungen mit laserinduzierter Fluoreszenz (LIF) von Mitarbeitern der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Sebastian Kaiser aus dem Institut für Verbrennung und Gasdynamik (IVG) der Universität Duisburg-Essen durchgeführt. Genauer wurden Fuel-Air-Ratio-LIF-Messungen (FARLIF) mit Anisol, welches Methan als fluoreszierender Tracer beigemischt wurde, durchgeführt. FARLIF erlaubt eine direkte Bestimmung des λ -Wertes ohne Beeinflussung durch Restgas basierend auf Annahmen bezüglich der Fluoreszenzlöschung durch Sauerstoff [33, 62]. Die LIF-Messungen des IVG dienen der Entwicklung einer bildgebenden Messtechnik, welcher in einer Ebene des Kolbens die räumliche Verteilung des λ -Wertes bei Nutzung von Erdgas sichtbar macht. Daher bietet sich ein Vergleich zwischen den Messungen mit dem LIF-System und dem 2-Filter-ICOS-System an. Hierbei ist zu beachten, dass mit dem LIF-System keine kompletten Motorzyklen aufgenommen werden können, da das System eine maximale Aufnahmezeit von 25 Hz besitzt. Daher wurden bei LIF-Messungen über mehrere Zyklen an festen Kurbelwellenwinkeln jeweils 20 Aufnahmen gemacht und gemittelt. Anschließend wurde der λ -Wert in einem kleinen Bereich direkt neben dem Zündkerzensensor von ähnlicher Größe wie der Spiegelkäfig gemittelt. Die ermittelten λ -Werte in gezündetem Betrieb bei Eindüsung von Methan und

einem nominellen Wert von $\lambda = 1,1$ sind in Abb. 9.1 gegen den Kurbelwinkel von Zyklusbeginn bis zur Zündung bei -10°KW aufgetragen. Die Bestimmung der λ -Werte beruht dabei auf völlig unterschiedlichen physikalischen Prinzipien. Daher kann der qualitativ und quantitativ sehr ähnliche Verlauf der λ -Werte als gegenseitige Verifizierung für beide Messsysteme angesehen werden.

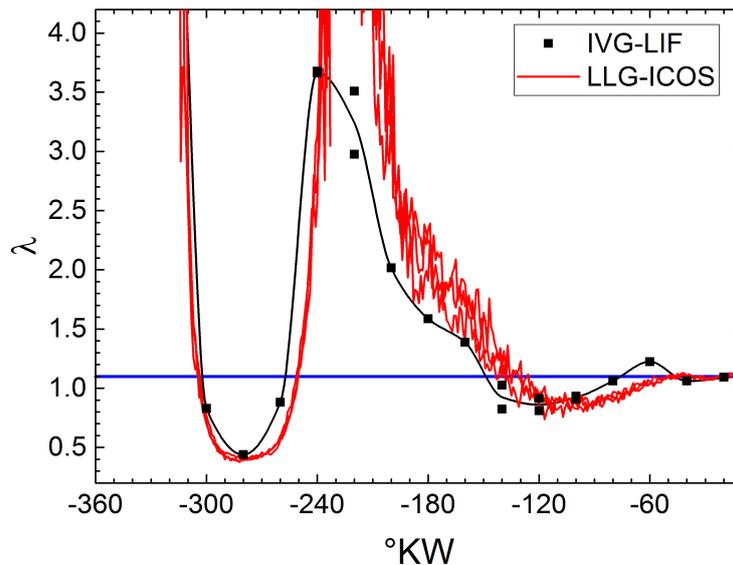


Abbildung 9.1: Verlauf der λ -Werte bei Eindüsung von Methan gemessen mit LIF und bei drei Messungen zu je 100 Zyklen des 2-Filter-ICOS-Systems. Der nominelle Wert von $\lambda = 1,1$ ist als blaue Linie eingezeichnet. Die schwarze Kurve stellt eine Interpolation der Messdaten des IVG dar.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Auswertestrategie beruht auf den spektroskopischen Eigenschaften von Methan, da dieses ein definiertes System darstellt. Damit ist das System prinzipiell in der Lage an üblichen Erdgasmotoren eingesetzt zu werden, wenn Methan als Kraftstoff verwendet wird. Zur Bewertung der Funktion des Systems mit Erdgas wurden Vergleichsmessungen zwischen der Eindüsung von Methan und Erdgas durchgeführt (siehe Kap. 8.3). Diese Messungen haben gezeigt, dass eine Übertragung des Auswertalgorithmus von Methan auf Erdgas prinzipiell möglich ist. Die spektroskopischen Eigenschaften von Erdgas weichen durch die Anteile längerkettiger Kohlenwasserstoffe von Methan ab, sodass es zu systematischen Abweichungen zwischen eingestelltem und gemessenem λ -Wert kommt. Weiterhin schlägt aus dem gleichen Grund der Auswertalgorithmus im Einlasstakt bei hohen Kraftstoffdichten und teilweise auch in der Kompression fehl. Die Ursache für das Fehlschlagen im Einlasstakt liegt sehr wahrscheinlich daran, dass für Erdgas entsprechend der geänderten spektroskopischen Eigenschaften, eine andere Kalibrationsfunktion notwendig ist. Diese unterschiedliche Eigenschaften scheinen sich gerade im Bereich niedriger Drücke (etwa 1 bar) und moderater Temperaturen (etwa 400 K) bemerkbar zu machen. Ein verbessertes Signal-Rausch-Verhältnis könnte unter

Umständen die Fehlschläge der Auswertung in der Kompression verhindern, da diese in geringerem Maße auch bei Methan auftauchen. Für beide Kraftstoffe, CNG und Methan, wäre ein um einen Faktor 5-10 höheres Signal optimal.

Allerdings muss zusätzlich beachtet werden, dass die Zusammensetzung von Erdgas nicht fest definiert ist. An jedem Versuchsmotor und auch zu unterschiedlichen Zeiten am gleichen Versuchsmotor wird die Zusammensetzung des genutzten Erdgases variieren. Entsprechend ist zu untersuchen, welche Art der Kalibration zur Anpassung an Erdgas notwendig ist. Eine Strategie kann sein das System an Druckzellenmessungen mit Erdgas im Labor vorzukalibrieren, analog dem Vorgehen bei Methan. Dafür wäre es sinnvoll unterschiedliche Sorten von Erdgas mit bekannter Zusammensetzung in Druckzellenmessungen mit einem ICOS-System zu vermessen und mit Berechnungen für Methan zu vergleichen. Dies würde Aufschluss über die Sensitivität der Auswertung auf die Zusammensetzung geben. Dabei ist es wichtig, dass die Erdgassorten unterschiedliche Zusammensetzungen in Hinblick auf die Kohlenwasserstoffe aufweisen. Anschließend kann eine Kalibration für eine der Erdgassorten auf die Quantifizierung der Messungen an anderen Sorten angewendet werden, um den Auswertalgorithmus zu testen. Wenn dann die Auswertung nicht mehr fehlschlägt, muss untersucht werden, ob sich die anhand unterschiedlicher Erdgassorten quantifizierten λ -Werte über einen einfachen Faktor ineinander überführen lassen. Erst dann sind die Voraussetzungen geschaffen, um eine in-situ Kalibration am Motor zu testen.

Wie eine in-situ Kalibration anhand von Motormessungen vorgenommen werden kann, ist am Vergleich der λ -Verläufe von Methan und Erdgas erkennbar (siehe Abb. 8.7 und Abb. 8.8). Dort, wo die Auswertung für CNG funktioniert scheinen die Kurven für Methan und Erdgas durch einen Kalibrationsfaktor aufeinander anpassbar zu sein. Dieser kann am Motor für einen Betriebspunkt durch die Einstellung eines λ -Wertes von Eins und der Bestimmung der Abweichung der quantifizierten λ -Kurve kurz vor Zündung ermittelt werden. Dieses Vorgehen wird aktuell beim ICOS-System für Ottomotoren mit Benzin als Kraftstoff verwendet. Dies funktioniert allerdings nur, wenn für den Betriebspunkt eine Übereinstimmung des lokalen λ -Wertes an der Zündkerze mit dem globalen λ -Wert zu erwarten ist. Dieser Umstand ist nicht immer gegeben und gerade ein Grund für den Einsatz der in dieser Arbeit entwickelten Messtechnik. Sollte das Vorgehen mit vorheriger Kalibration an Druckzellen nicht funktionieren bleibt als Alternative eine Kalibrationsstrategie über Druckzellenmessungen direkt am Motorprüfstand kurz vor den Messungen am Motor mit den entsprechenden Erdgas durchzuführen. Mittels dieser Messungen kann für das zum Zeitpunkt der Messungen verfügbare Erdgas eine Kalibrationsfunktion bestimmt werden. Da hier die Zusammensetzung des Erdgases unbekannt wäre und somit der Vergleich mit Berechnungen schwierig ist, muss auch diese Strategie getestet werden.

Weiterhin ist davon auszugehen, dass die Unterschiede in der Kalibration von Erdgas und Methan einen Einfluss auf den qualitativen Verlauf der λ -Werte haben. Das heißt eine Anpassung der λ -Werte für Erdgas über einen Kalibrationsfaktor (siehe vorheriger Absatz) würde einen Kurvenverlauf produzieren, welcher Abweichungen zum wahren Verlauf aufweisen kann. Daher könnte ein alternatives Vorgehen zur Quantifizierung von Erdgas die Anpassung der Kalibrationsparameter für die Look-up-Tabelle sein, wie am Ende von Kap. 8.3 dargestellt. Ausgehend von Berechnungen und Kalibrationsmessungen

für Methan wird einer der Kalibrationsparameter so angepasst, dass der für CNG quantifizierte λ -Wert zur Zündung zum eingestellten λ -Wert passt. Dieses Vorgehen ist analog zur Ermittlung eines Kalibrationsfaktors und enthält daher die gleichen Unsicherheiten.

Insgesamt wird deutlich, dass die Verwendung von CNG als Kraftstoff bei Anwendung der hier entwickelten Messtechnik möglich erscheint, aber noch mit vielen Unsicherheiten verbunden ist. Es ist nicht möglich bei Erdgas von einem definierten System zu sprechen, sodass sämtliche Versuche einer Kalibration mit Annahmen und Unsicherheiten verbunden sind. Die Verwendung von Methan als Kraftstoff würde diese Problematik umgehen. Der Einsatz von Methan am Motorprüfstand stellt dabei nur einen kleinen Aufwand gegenüber der Nutzung von Erdgas dar. Der Gewinn wäre die Nutzung einer Messtechnik basierend auf einer physikalisch fundierten Modellierung der Spektroskopie von Methan. Im Fall von Erdgas werden an den spektroskopischen Modellierungen empirische Anpassungen benötigt, welche eine zusätzliche Unsicherheit in die Messergebnisse einbringen. Dieser Umstand rechtfertigt den zu betreibenden Aufwand eines Einsatzes von Methan am Motorprüfstand. Außerdem unterscheidet sich der Vorgang der Gemischbildung zwischen Methan und Erdgas aufgrund leicht unterschiedlicher Einspritzdauern nur minimal. In den hier gemachten Messungen betragen die Einspritzdauern bei $\lambda = 1,0$ 10,65 ms bzw. 12,275 ms bei 1500 U/min für Methan und Erdgas. Eine Analyse der Gemischbildung in Erdgasmotoren ist also auch anhand der Verwendung von Methan als Kraftstoff möglich und auf Erdgas übertragbar. Damit ist die Verwendung von Methan als Kraftstoff klar zu empfehlen.

Die Bedeutung der in dieser Arbeit entwickelten Messmethode für Forschung und Entwicklung an Verbrennungsmotoren wird beim Vergleich mit dem Einsatzgebiet anderer Messtechniken deutlich. Flammenionisationsdetektoren (FIDs) werden oftmals in Abgasanalyse-Systemen eingesetzt. Dort ist eine präzise Messung der Emission von Kohlenwasserstoffen und Stickoxiden möglich, um die Qualität der Verbrennung zu beurteilen und zu optimieren [63, 64]. Zur Analyse der Gemischbildung ist ein Einsatz von schnellen FIDs direkt im Motorzylinder notwendig. Dort bedingt das Gasentnahmesystem und die Ansprechzeit des Detektors abhängig von den Druckbedingungen im Zylinder eine Verzögerung zwischen der Probennahme und der Messung der Kraftstoffkonzentration. Die Verzögerung liegt in der Größenordnung von 1 ms und kann für eine Beeinflussung der entnommenen Probe sorgen, wodurch die Interpretation der Messergebnisse erschwert wird [65]. Die Gasentnahme stellt daher einen signifikanten Nachteil gegenüber der hier entwickelten, optischen Messtechnik dar, welche eine verzögerungsfreie Messung der Kraftstoffkonzentration erlaubt [36].

Aktuelle Arbeiten zur Optimierung der Gemischbildung nutzen unter anderem laserinduzierte Fluoreszenz (LIF), um orts aufgelöste Informationen über das Kraftstoff-Luft-Verhältnis oder die Temperatur im Zylinder zu erhalten [66, 67]. Komplexere experimentelle Ansätze erlauben die simultane Messung von Kraftstoffkonzentration, Temperatur und Restgasgehalt im Zylinder von Transparentmotoren [68, 69]. Bei diesen Versuchen werden zwei fluoreszierende Tracer bei zwei unterschiedlichen Wellenlängen angeregt und die Fluoreszenz wird mit zwei Kameras detektiert. Messungen an seriennahen Motoren können über Endoskopzugänge ermöglicht werden, was geringe bauliche Änderungen benötigt [70]. Damit ist das beobachtete Verhalten näher an Serienmotoren als bei Trans-

parentmotoren, jedoch ist die Auswertung durch die Geometrie der Optik komplexer. Die Aufnahme rate wird limitiert durch die Repetitionsrate des verwendeten Lasers, was zur Aufnahme von Bildern an unterschiedlichen Kurbelwinkeln ein Durchrastern des Motorzyklus erforderlich macht. Absorptionsspektroskopie auf Basis durchstimmbarer Diodenlaser (TDLAS) bietet eine höhere Aufnahme rate als LIF und wird zur Messung von Temperatur, Konzentration und Verbrennungsdynamik eingesetzt [37]. Dabei sind über tomographische Aufnahmen 2D Rekonstruktionen der Verteilung einer Messgröße im Motorzylinder genauso möglich wie Messungen in Durchlichtgeometrie, welche einen Mittelwert über die Messstrecke wiedergeben [71, 72]. Tomographische Messungen erfordern dabei einen entsprechend ausgelegten optischen Zugang, sodass eine Anwendung in seriennahen Motoren erschwert wird. Bei der Auswertung müssen die spektroskopischen Eigenschaften der vermessenen Absorptionsbande und deren Abhängigkeit von Druck und Temperatur exakt berücksichtigt werden, um eine hohe Genauigkeit sicherzustellen.

Gegenüber LIF und TDLAS bietet die hier entwickelte Messtechnik die Bestimmung der Kraftstoffkonzentration nur in einem kleinen Volumen nahe der Zündkerze. Dafür sind keinerlei bauliche Veränderungen am Motor notwendig und der experimentelle Aufwand ist deutlich geringer. Weiterhin bietet die Messung über Infrarotabsorption den Vorteil einer hohen Aufnahme rate, sodass Messungen mit Kurbelwinkelauflösung durchgeführt werden können. Durch die hohe Aufnahme rate ist außerdem eine einfache Untersuchung von Zyklus-zu-Zyklus-Schwankungen und dynamischen Betriebsbedingungen des Motors möglich [13]. LIF und TDLAS können bei Wahl eines passenden Tracers bzw. einer Absorptionsbande auf unterschiedliche Kraftstoffe angewendet werden. Die hier entwickelte Messtechnik ist auf die Messung von Methan und in gewissem Maße von CNG beschränkt. Allerdings bietet die entwickelte IR-Absorptionsmethode eine einfache Anwendbarkeit, da in der Auswerteprozedur sämtliche spektroskopischen Eigenschaften bereits berücksichtigt werden und komplexe Auswerteschritte nicht vom Anwender durchgeführt werden müssen.

10 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein Messsystem zur Gemischbildungsanalyse in Erdgasmotoren auf Grundlage nicht-dispersiver Infrarotabsorptionsspektroskopie entwickelt. Den Ausgangspunkt dafür bildete das ICOS-System der LaVision GmbH, welches zur zeitaufgelösten Messung des λ -Wertes an Ottomotoren eingesetzt wird. Das System besteht aus einer breitbandigen Lichtquelle, einem optischen Zündkerzensensor und einer Detektionseinheit, welche die Detektion von Kraftstoff und Restgas erlaubt sowie einen Referenzkanal zur Signalkorrektur besitzt. Die Selektion der entsprechenden Wellenlängenbereiche für die unterschiedlichen Moleküle erfolgt dabei über Bandpassfilter. Die Quantifizierung der Kraftstoffdichte beruht beim ICOS-System auf einer empirischen Kalibration, die im Fall von Erdgas oder dessen Hauptbestandteil Methan versagt. Daher lag der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit auf der Entwicklung einer Auswerteprozedur zur Bestimmung des λ -Wertes auf Grundlage der spektroskopischen Eigenschaften von Methan und des optischen Messsystems. Zusätzlich wurde eine Messsonde zum Einsatz im Saugrohr von Motoren entwickelt, da die Einspritzung von Kraftstoff bei Erdgasmotoren üblicherweise im Ansaugtrakt erfolgt. Für die Saugrohrsonde wurde ein anderes optisches Design als bei der Zündkerzensonde gewählt, welches die speziellen Eigenschaften von Retroreflektoren nutzt. Für dieses Design wurden unterschiedliche Retroreflektoren und alternative Lichtquellen auf ihre Einsatztauglichkeit geprüft.

Die in dieser Arbeit entwickelte Quantifizierungsstrategie nutzt die Messung der breitbandigen Transmission im Absorptionsbereich der ν_3 -Bande von Methan bei $3,3 \mu\text{m}$, um die Transmission über das Lambert-Beersche-Gesetz und unter Einbeziehung von Druck und Temperatur einer Methandichte zuzuordnen. Hierfür wird basierend auf Absorptionsquerschnitten aus der HITRAN-Datenbank eine Look-up-Tabelle aus Druck, Temperatur, Dichte und Transmission berechnet, welche für die Auswertung der Messdaten interpoliert wird. Die grundsätzlichen Absorptionseigenschaften von Methan und deren Auswirkungen auf die Messung der breitbandigen Transmission wurden anhand von Druckzellenmessungen untersucht. Es hat sich gezeigt, dass eine Einbeziehung der spektralen Einflüsse der Transmission der Fasern, der Empfindlichkeit des Detektors und der Emissionskurve der Lichtquelle in die Berechnungen zusätzlich zur Filtertransmission für eine gute Übereinstimmung zwischen berechneter und mit dem ICOS-System gemessener Transmission sorgt. Verbleibende Unterschiede zwischen Messung und Berechnung können über eine Kalibration minimiert werden. Dieses Vorgehen wurde zunächst anhand von Druckzellenmessungen erfolgreich validiert.

Die Saugrohrsonde wurde in einem Strömungskanal und an zwei Versuchsmotoren getestet. Dabei hat sich durch Validierungsmessungen bei bekanntem λ -Wert gezeigt, dass eine Quantifizierung mit einer Genauigkeit von 7,1% bei einer Präzision von 1,3% möglich ist. Außerdem konnte gezeigt werden, dass durch Messungen mit der Saugrohrsonde Variationen der Einspritzparameter und deren Auswirkung auf die Gemischbildung im

Saugrohr erfasst werden können. Die Validierungsmessungen haben weiterhin gezeigt, dass eine dynamische Messung der Temperatur im Messvolumen unerlässlich ist, um die Genauigkeit der Quantifizierung zu verbessern.

Zur gleichzeitigen Messung von Temperatur und Methandichte wurde eine 2-Filter-Methode, welche in einer vorherigen Arbeit etabliert wurde, im Rahmen dieser Arbeit konsequent weiterentwickelt. Bei dieser Methode werden zwei Bandpassfilter, welche unterschiedliche Bereiche des Methanspektrums überdecken, genutzt. Die Signale, die aus der Transmission der beiden Filter resultieren, zeigen ein unterschiedliches Verhalten bei Temperaturvariationen. Dadurch kann über eine Korrelation der Signale gleichzeitig Dichte und Temperatur bestimmt werden. Für diese 2-Filter-Methode wurden über Druckzellenmessungen unterschiedliche Filterkombinationen mit einem justierbaren optischen Aufbau getestet, um die Kombination, welche die höchste Genauigkeit in der Quantifizierung liefert, zu ermitteln. Bei diesen Versuchen haben sich zwei Filterkombinationen (3485-3420 und 3329-3552) als vielversprechend herausgestellt, wobei erstere an einer Rapid Compression Machine (RCM) und an einem Versuchsmotor zusammen mit dem ICOS-System und der Zündkerzensonde erprobt wurde.

Die Versuche an der RCM dienten zur Validierung des entwickelten Auswertalgorithmus unter Druck- und Temperaturbedingungen, welche denen am Motor sehr nahe kommen. Im Gegensatz zu einem Motorbrennraum kann die Messkammer der RCM evakuiert und mit Gas definierter Zusammensetzung befüllt werden, wodurch bessere Bedingungen zur Validierung der Messtechnik als am Versuchsmotor geschaffen werden konnten. Am Versuchsmotor wurden Validierungsmessungen über den Einsatz von Massenflussreglern, welche sowohl die Luft- als auch die Methanzufuhr regelten, realisiert. An der RCM und am Versuchsmotor wurde außerdem das ICOS-Temperatur-System der LaVision GmbH genutzt, welches basierend auf der Absorption von Infrarotlicht durch Wasser mit hoher Zeitauflösung Temperaturen messen kann. Dadurch konnte das mit der 2-Filter-Methode gemessene Temperaturverhalten in RCM und Motor verifiziert werden. Außerdem konnten Abweichungen in der über die 2-Filter-Methode gemessenen Temperatur zum erwarteten Temperaturverhalten einer polytropen Verdichtung auf die Geometrie der Zündkerzensonde und im speziellen auf den metallenen Spiegelkäfig zurückgeführt werden.

Die mit dem ICOS-System und der 2-Filter-Methode gemessenen Signale weisen im Allgemeinen Fluktuationen auf Grund von Verschmutzungen oder Vibrationen des optischen Systems auf. Für die Auswertung der Messungen wurde ein iteratives Verfahren zur Korrektur dieser Fluktuationen über das Signal des Referenzkanals entwickelt. Hierbei mussten Einflüsse durch die Absorption von Methan auf die Transmission im Referenzkanal berücksichtigt werden. Bei den Messungen an RCM und Versuchsmotor zeigten sich zum Zündzeitpunkt systematische Abweichungen im λ -Wert, welche auf Ungenauigkeiten in der Temperaturbestimmung, der Kalibration des Systems und die Nichtberücksichtigung von Restgas zurückgeführt werden konnten. Insgesamt konnte für die 2-Filter-Methode mit der Filterkombination 3485-3420 eine Genauigkeit von 5-7% bei einer Präzision von 0,7-1,5% erreicht werden. Gerade die hohe Präzision zeigt, dass eine Optimierung der Genauigkeit möglich ist. Hierfür müssen unter anderem mögliche Ungenauigkeiten in der HITRAN-Datenbank, welche zu Ungenauigkeiten bei der Bestimmung von Dichte und Temperatur führen, genau untersucht werden. Weiterhin ist es nötig ein gegenüber

dem justierbaren optischen Aufbau mechanisch stabileres ICOS-System aufzubauen, an Druckzellenmessungen zu kalibrieren und dann an RCM und Motor zu testen. Für diese Tests bietet es sich an neben der hier verwendeten Filterkombination 3485-3420 auch die Kombination 3329-3552 zu untersuchen, da diese in Druckzellenmessungen eine höhere Genauigkeit aufwies.

Der Vergleich von Messungen mit Methan und Erdgas als Kraftstoff zeigte, dass eine direkte Anwendung der für Methan entwickelten Auswertung auf Erdgas prinzipiell möglich ist, jedoch mit vielen Unsicherheiten in der Auswertung verbunden ist. Daher sind für Messungen an Erdgas zusätzliche Kalibrationsstrategien unter Berücksichtigung von Variationen in der Zusammensetzung des Erdgases notwendig. Aus diesem Grund bietet sich die Verwendung von Methan als Kraftstoff zur Analyse der Gemischbildung an, welches eine direkte Übertragung der Ergebnisse auf Erdgas ermöglicht.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass die Anwendung einer 2-Filter-Methode eine präzise, zeitaufgelöste Messung der Gemischbildung in Gasmotoren ermöglicht. Die Methode beruht auf der Modellierung von Infrarotabsorption unter Berücksichtigung aller notwendigen physikalischen Parameter. Das bedeutet, dass die Veränderung der Schwingungsrotationszustände bei Variationen von Druck und Temperatur in die Auswertung miteinbezogen werden. Temperaturerhöhungen führen nach der Boltzmannstatistik zur Besetzung höherer Rotationszustände, wohingegen Druckänderungen die Breite einzelner Absorptionslinien beeinflussen. Beide Effekte bewirken eine Änderung der Intensitätsverteilung der Schwingungsrotationslinien. Dieses Verhalten wurde eingehend analysiert, um Bandpassfilter zu identifizieren, deren spektrale Bereiche ein unterschiedliches Transmissionsverhalten in Abhängigkeit von der Temperatur zeigen. Die damit ermöglichte, direkte Messung der CH_4 -Dichte und Temperatur im Messvolumen erlaubt die Bestimmung der Kraftstoffkonzentration. Damit ist die in dieser Arbeit entwickelte Methode komplementär zum Ansatz von FARLIF, welcher die Sauerstoffkonzentration erfasst, um darüber Rückschlüsse auf die Kraftstoffdichte zu ziehen. Dabei besitzt FARLIF den Vorteil einer ortsaufgelösten Quantifizierung, hat aber den Nachteil einer wesentlich geringeren Aufnahmerate und eines größeren, experimentellen Aufwandes. Flammenionisationsdetektoren (FIDs) stellen eine direkte Konkurrenz zur hier entwickelten Messmethode dar. Gegenüber FIDs bietet die hier entwickelte Methode die Möglichkeit der Messung der Kraftstoffkonzentration ohne zeitliche Verzögerungen durch Gasentnahmesysteme. Damit wird die Gemischbildung im Motor direkt erfasst, was eine Interpretation der Messungen erleichtert.

Auf Basis der in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse kann die nächste Generation von Prototypensystemen aufgebaut werden, bei denen eine weitere Verbesserung der Messgenauigkeit zu erwarten ist. Damit steht der Anwendung in der Entwicklung von Gasmotoren in der Automobilindustrie, oder z.B. im Schiffsbau, nichts mehr im Wege. Weiterhin ist eine Ausweitung der Messtechnik auf alle Bereiche in denen die zeitaufgelöste Messung von Methan in Strömungen unter statischen oder dynamischen Druck- und Temperaturbedingungen erforderlich ist, möglich. Ebenso ist eine Übertragung der Quantifizierungsstrategie auf andere Moleküle vorstellbar. Hierbei würde sich z.B. die Messung von CO_2 und H_2O zur zeitaufgelösten Quantifizierung des Restgasgehalts im Verbrennungsmotor oder die Bestimmung der Konzentration von CO und CO_2 im Abgas von Feuerungsanlagen anbieten.

A Druckzellenmessungen mit dem 2-Filter-ICOS-System

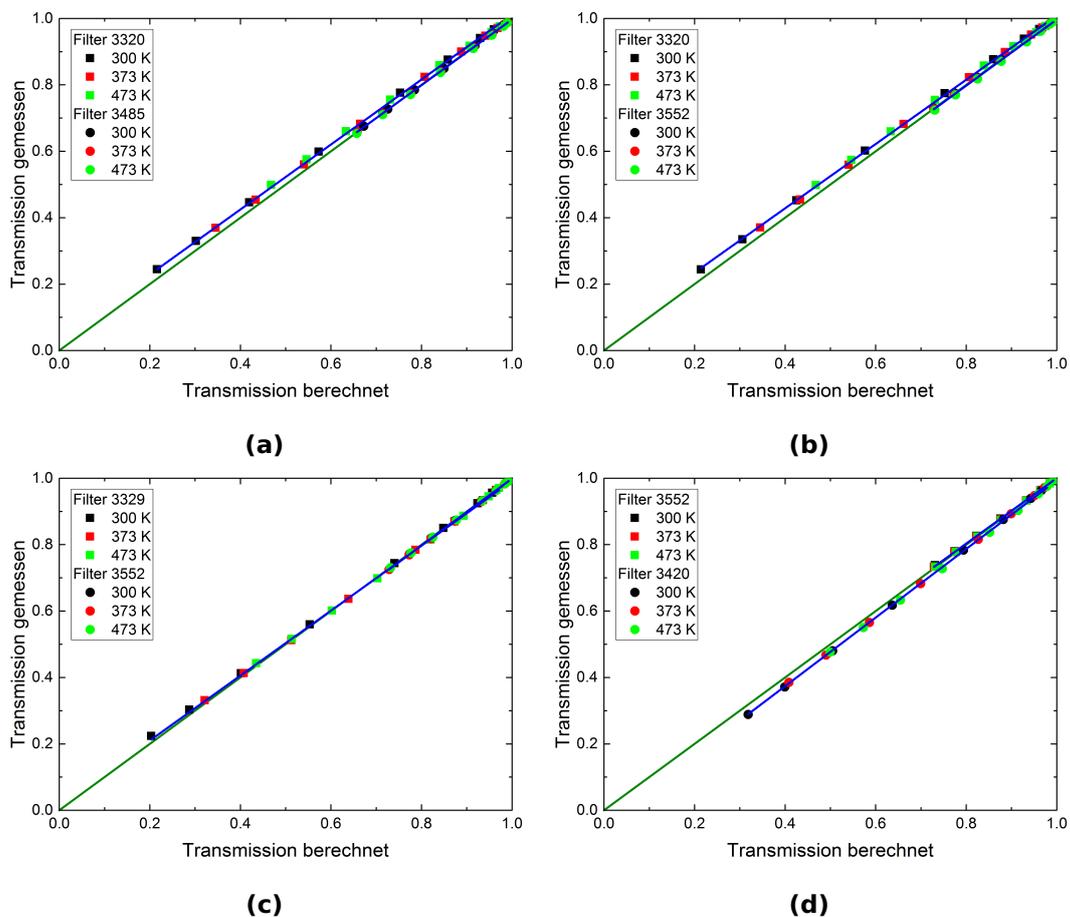


Abbildung A.1: Auftragung der gemessenen gegen die berechnete Transmission aus Druckzellenmessungen zur Kalibration der unterschiedlichen Filterkombinationen für die 2-Filter-Methode. Die grüne Linie stellt die ideale Übereinstimmung dar.

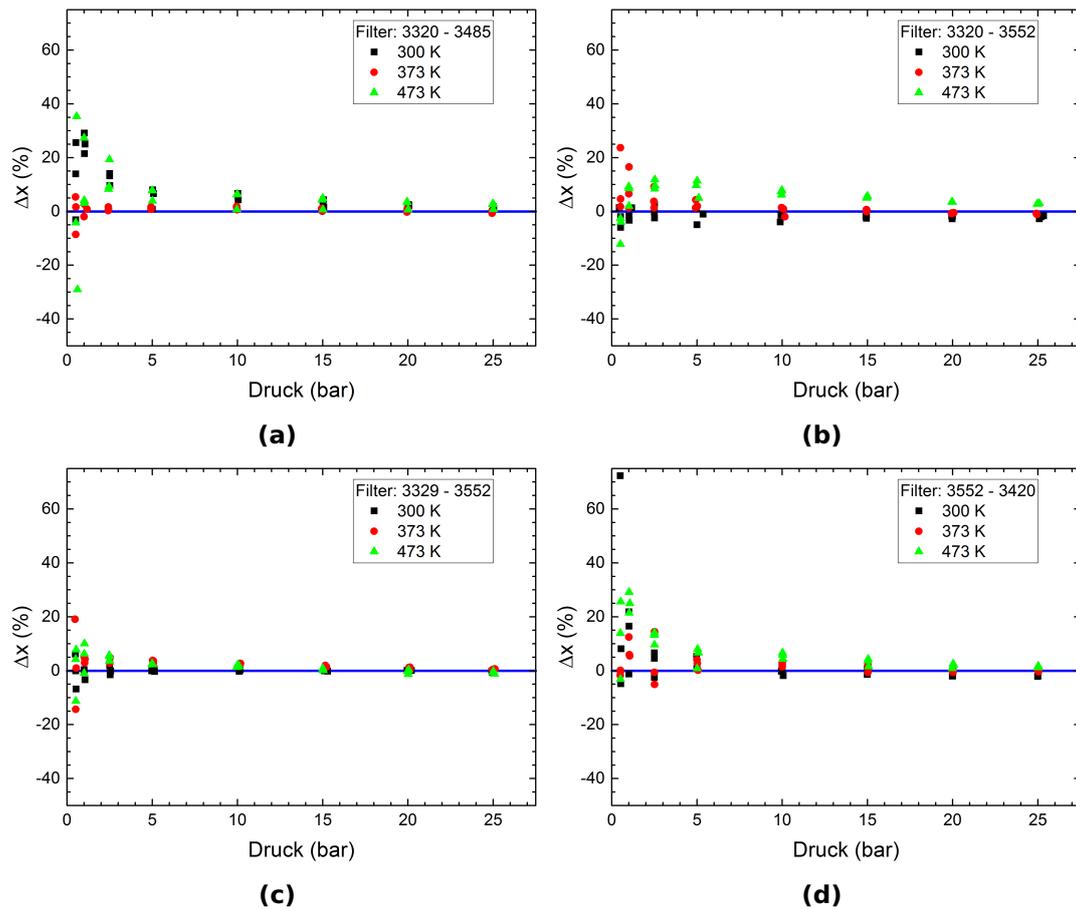


Abbildung A.2: Abweichungen Δx im quantifizierten Stoffmengenanteil für die Druckzellenmessungen bei unterschiedlichen Drücken und Temperaturen bei Nutzung unterschiedlicher Filterkombinationen der 2-Filter-Methode. Verwendet wurde ein Gasgemisch mit 9,51% CH_4 in N_2 .

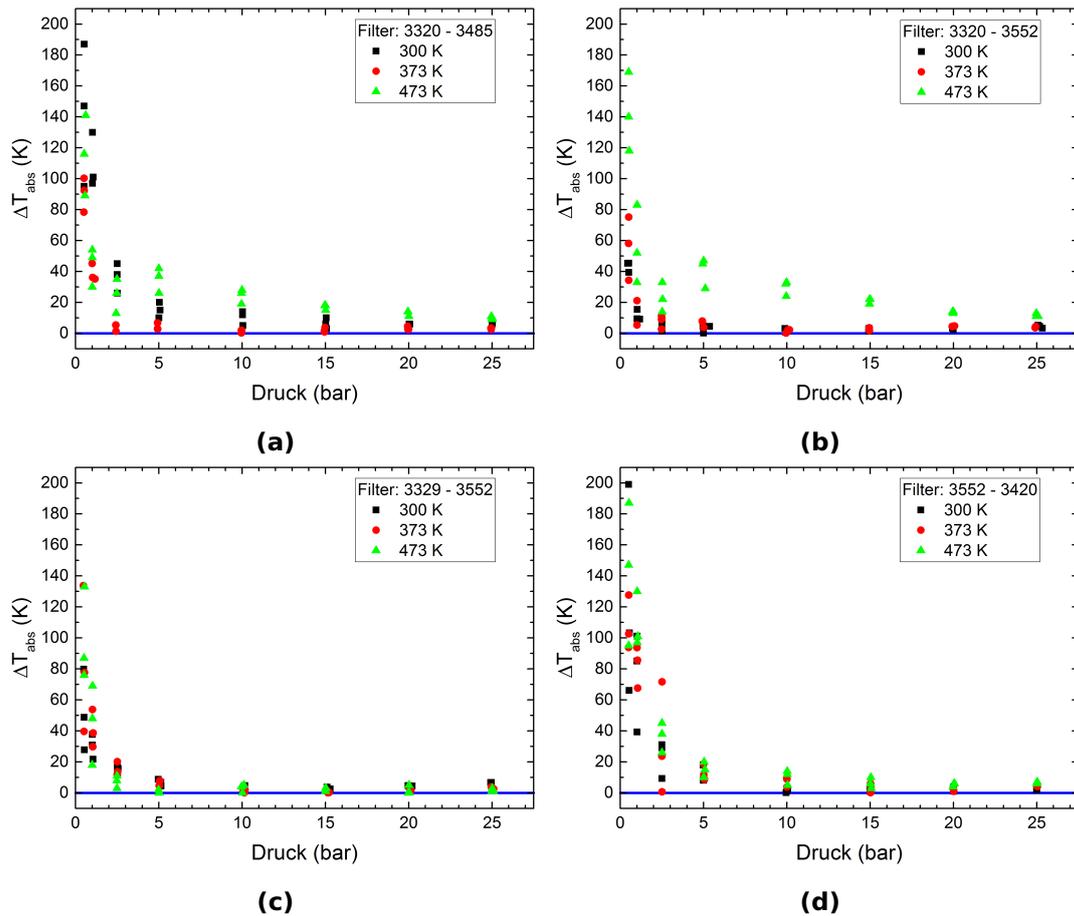


Abbildung A.3: Abweichungen ΔT im quantifizierten Stoffmengenanteil für die Druckzellenmessungen bei unterschiedlichen Drücken und Temperaturen bei Nutzung unterschiedlicher Filterkombinationen der 2-Filter-Methode. Verwendet wurde ein Gasgemisch mit 9,51% CH_4 in N_2 .

B RCM-Messungen mit dem 2-Filter-ICOS-System

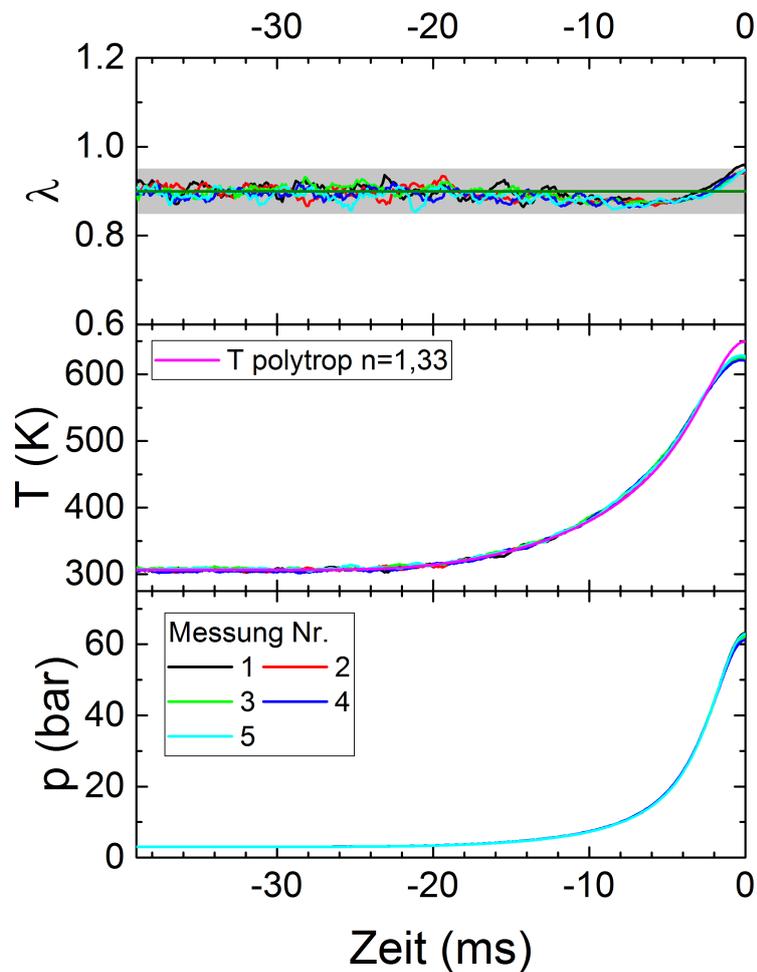


Abbildung B.1: Ergebnisse der RCM-Messungen mit dem 2-Filter-System für Druck p , Temperatur T und λ bei einem Gasgemisch von $\lambda = 0,9$ und einer Kalibration der CH_4 -Kanäle mit Fixpunkt bei (1,1). Die graue Fläche entspricht einem Fehlerintervall von $\pm 5\%$.

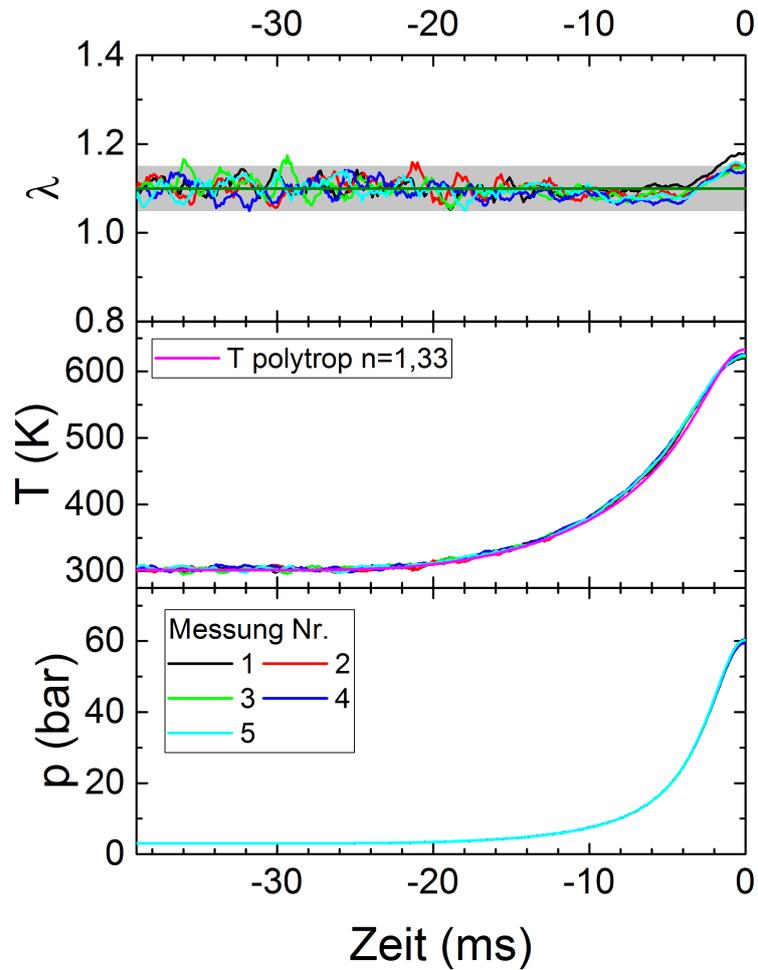


Abbildung B.2: Ergebnisse der RCM-Messungen mit dem 2-Filter-System für Druck p , Temperatur T und λ bei einem Gasmisch von $\lambda = 1,1$ und einer Kalibration der CH_4 -Kanäle mit Fixpunkt bei (1,1). Die graue Fläche entspricht einem Fehlerintervall von $\pm 5\%$.

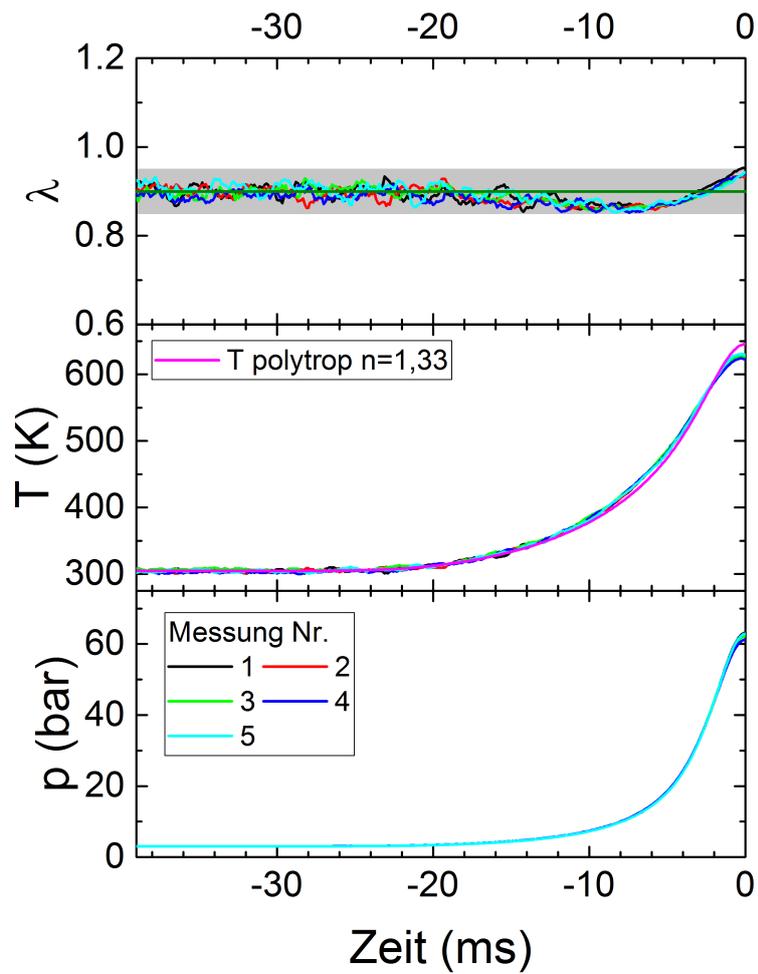


Abbildung B.3: Ergebnisse der RCM-Messungen mit dem 2-Filter-System für Druck p , Temperatur T und λ bei einem Gasgemisch von $\lambda = 0,9$ und einer Kalibration der CH_4 -Kanäle ohne Fixpunkt. Die graue Fläche entspricht einem Fehlerintervall von $\pm 5\%$.

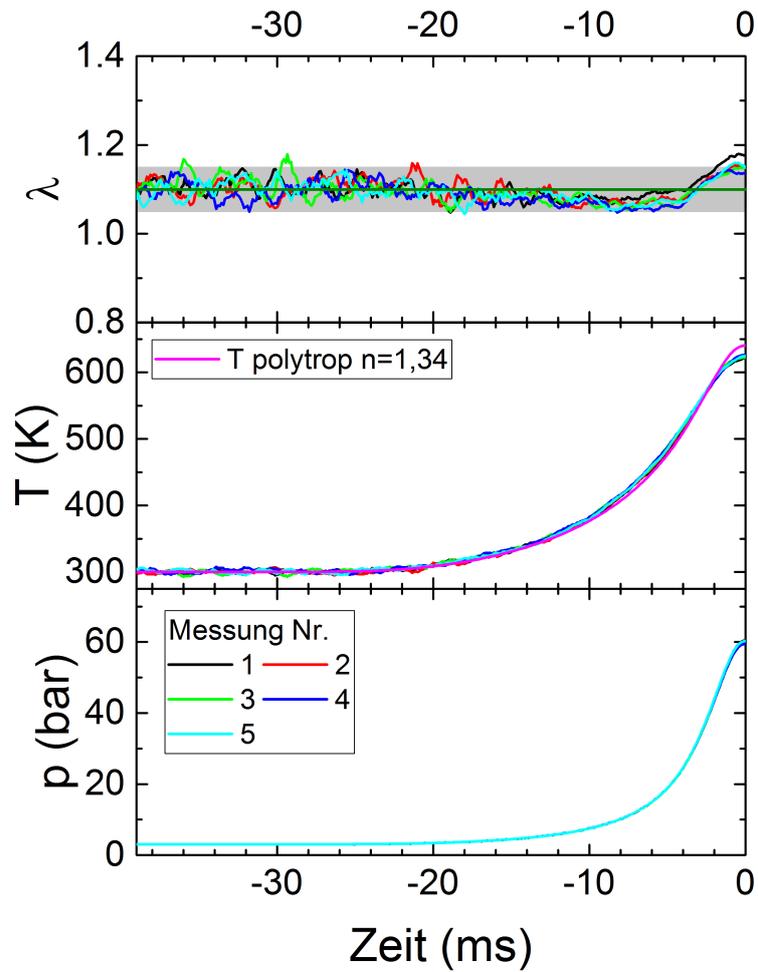


Abbildung B.4: Ergebnisse der RCM-Messungen mit dem 2-Filter-System für Druck p , Temperatur T und λ bei einem Gasgemisch von $\lambda = 1,1$ und einer Kalibration der CH_4 -Kanäle ohne Fixpunkt. Die graue Fläche entspricht einem Fehlerintervall von $\pm 5\%$.

C Motormessungen mit dem 2-Filter-ICOS-System

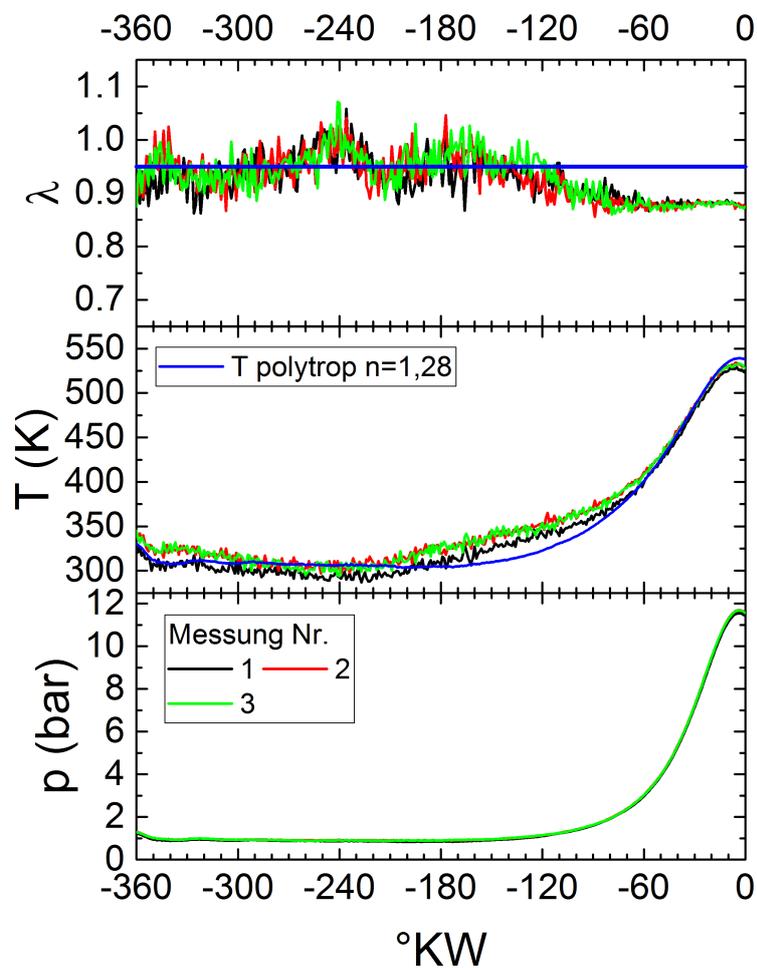


Abbildung C.1: Messungen an Versuchsmotor 2 in geschlepptem Betrieb bei $\lambda = 0,95$ eingestellt über MFCs. Gezeigt sind λ -Wert, Temperatur T und Druck p für den Kurbelwinkelbereich von Zyklusbeginn bis zum OT für drei Messungen über je 100 Zyklen gemittelt.

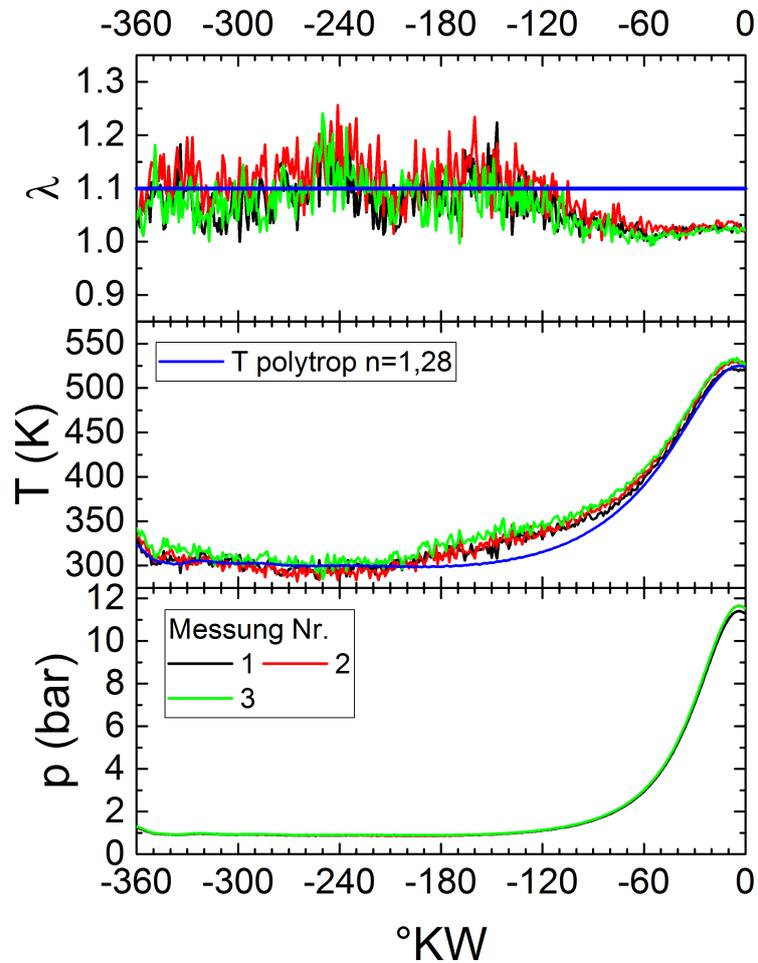


Abbildung C.2: Messungen an Versuchsmotor 2 in geschlepptem Betrieb bei $\lambda = 1,1$ eingestellt über MFCs. Gezeigt sind λ -Wert, Temperatur T und Druck p für den Kurbelwinkelbereich von Zyklusbeginn bis zum OT für drei Messungen über je 100 Zyklen gemittelt.

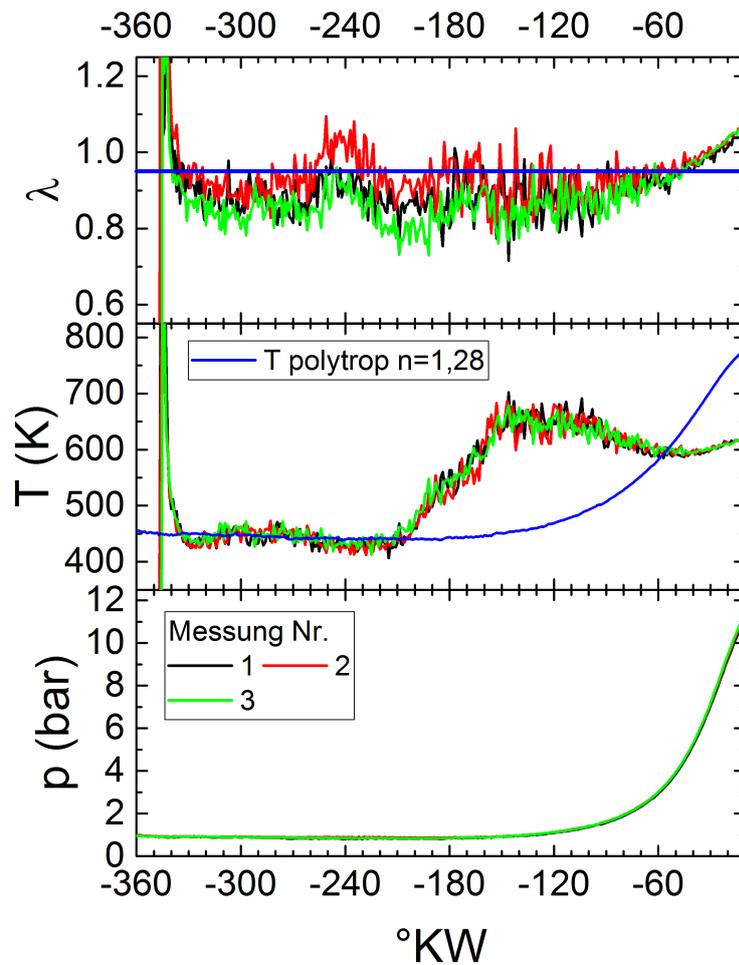


Abbildung C.3: Messungen an Versuchsmotor 2 in gezündetem Betrieb bei $\lambda = 0,95$ eingestellt über MFCs. Gezeigt sind λ -Wert, Temperatur T und Druck p für den Kurbelwinkelbereich von Zyklusbeginn bis zur Zündung für drei Messungen über je 100 Zyklen gemittelt.

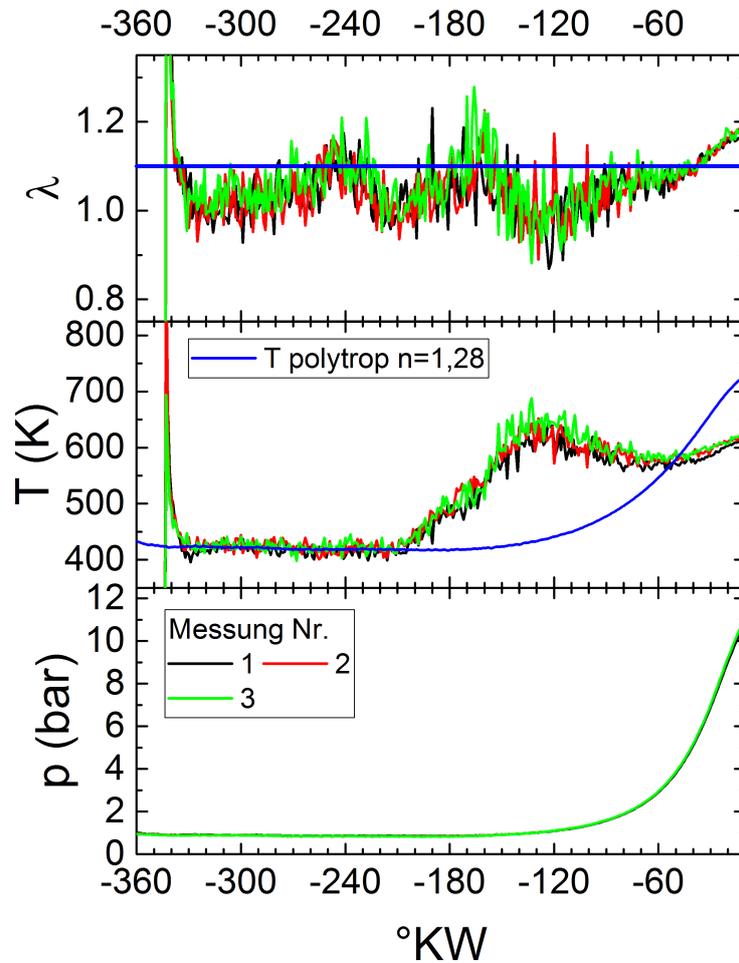


Abbildung C.4: Messungen an Versuchsmotor 2 in gezündetem Betrieb bei $\lambda = 1,1$ eingestellt über MFCs. Gezeigt sind λ -Wert, Temperatur T und Druck p für den Kurbelwinkelbereich von Zyklusbeginn bis zur Zündung für drei Messungen über je 100 Zyklen gemittelt.

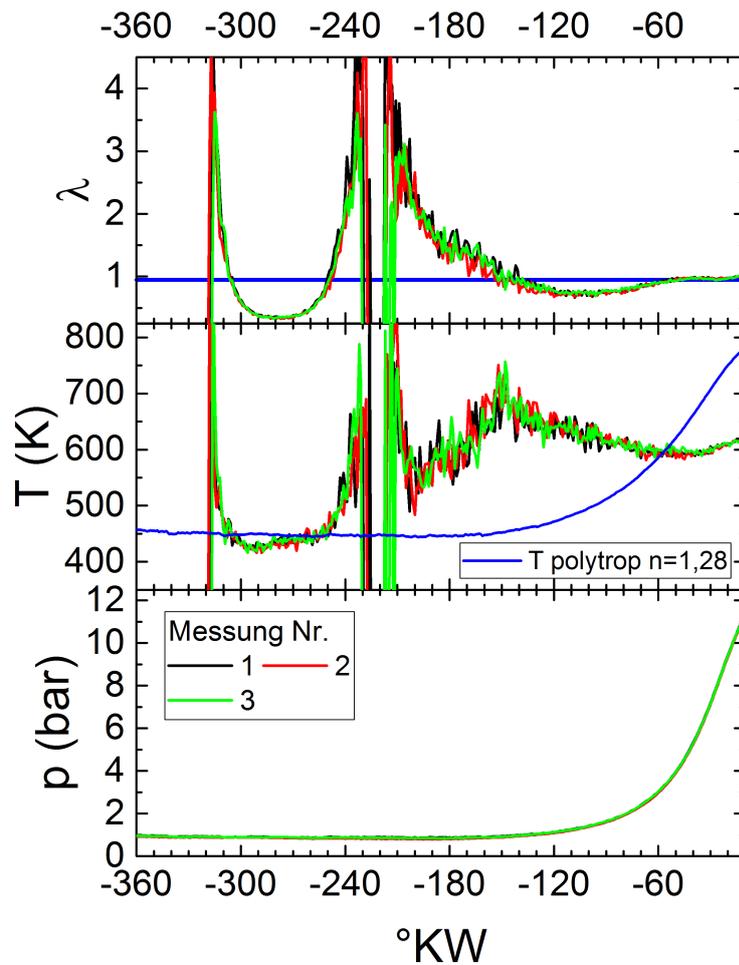


Abbildung C.5: Messungen an Versuchsmotor 2 in gezündetem Betrieb bei $\lambda = 1,1$ mit konstanter Einspritzdauer. Gezeigt sind λ -Wert, Temperatur T und Druck p für den Kurbelwinkelbereich von Zyklusbeginn bis zur Zündung für drei Messungen über je 100 Zyklen gemittelt.

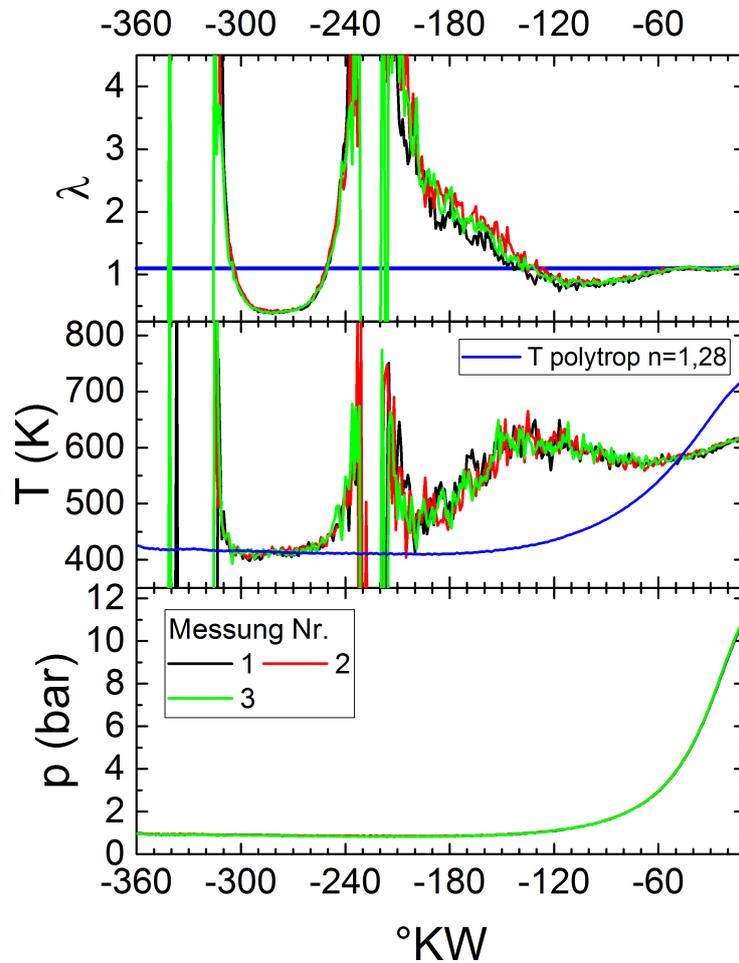


Abbildung C.6: Messungen an Versuchsmotor 2 in gezündetem Betrieb bei $\lambda = 0,95$ mit konstanter Einspritzdauer. Gezeigt sind λ -Wert, Temperatur T und Druck p für den Kurbelwinkelbereich von Zyklusbeginn bis zur Zündung für drei Messungen über je 100 Zyklen gemittelt.

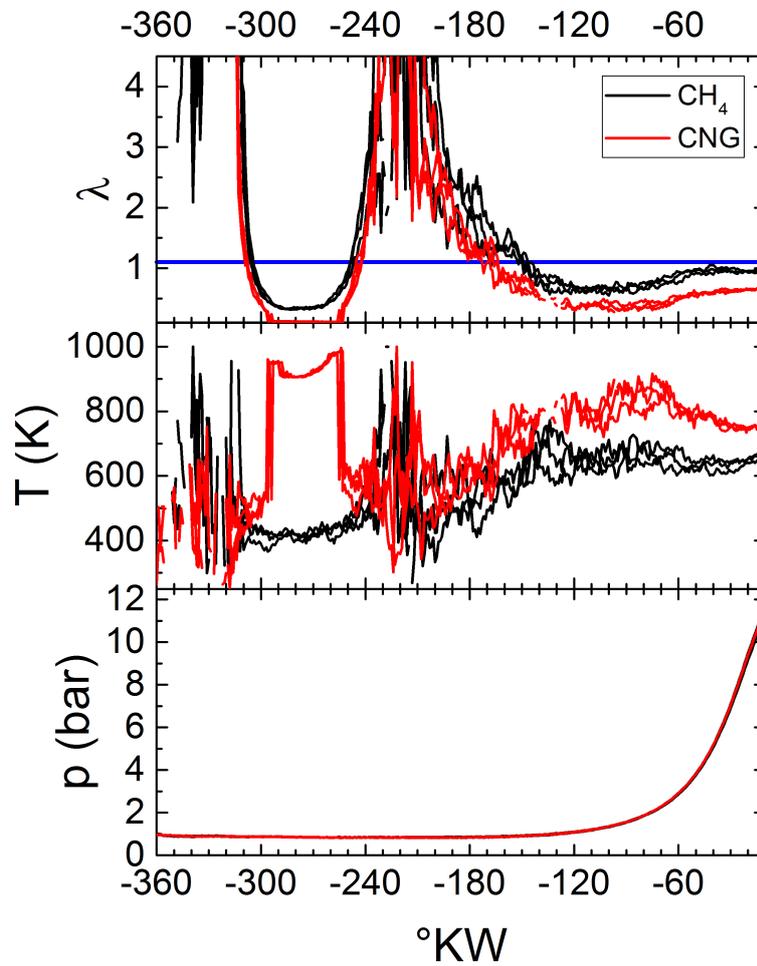


Abbildung C.7: Vergleichsmessungen von Methan und CNG an Versuchsmotor 2 in gezündetem Betrieb bei $\lambda = 1,1$ mit konstanter Einspritzdauer. Gezeigt sind λ -Wert, Temperatur T und Druck p für den Kurbelwinkelbereich von Zyklusbeginn bis zur Zündung für Methan (schwarz) und CNG (rot). Es wurden je drei Messungen zu 100 Zyklen aufgenommen, die blaue Linie zeigt den eingestellten λ -Wert an.

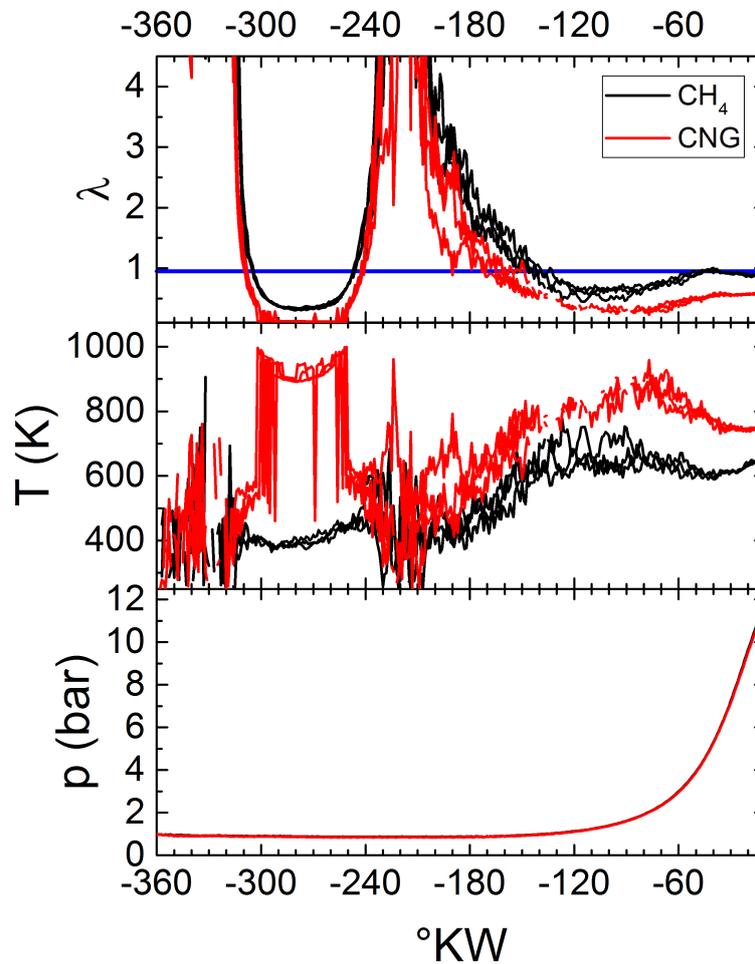


Abbildung C.8: Vergleichsmessungen von Methan und CNG an Versuchsmotor 2 in gezündetem Betrieb bei $\lambda = 0,95$ mit konstanter Einspritzdauer. Gezeigt sind λ -Wert, Temperatur T und Druck p für den Kurbelwinkelbereich von Zyklusbeginn bis zur Zündung für Methan (schwarz) und CNG (rot). Es wurden je drei Messungen zu 100 Zyklen aufgenommen, die blaue Linie zeigt den eingestellten λ -Wert an.

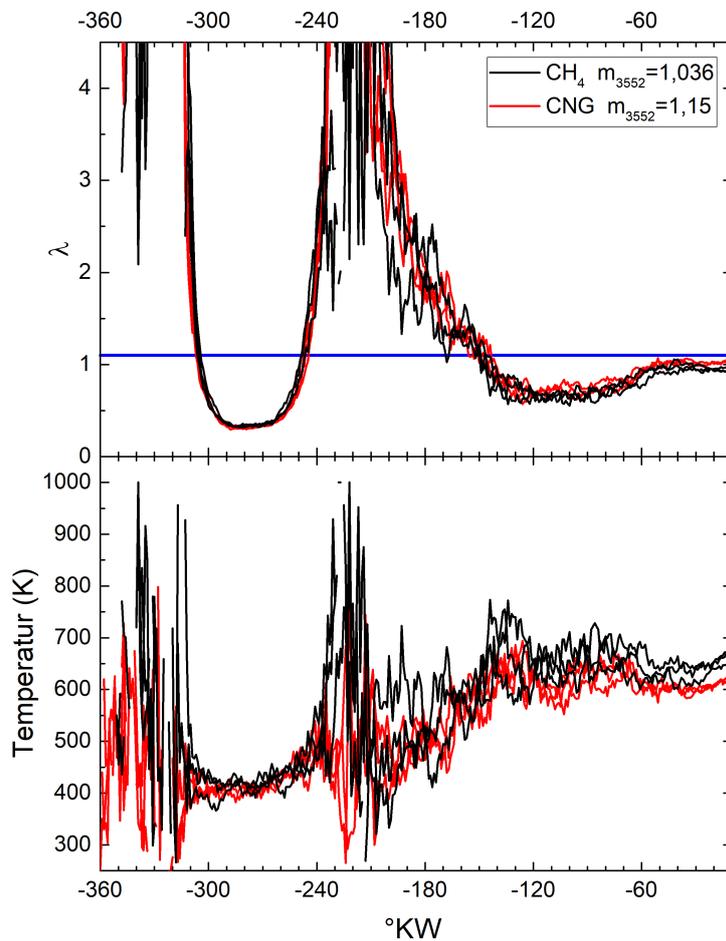


Abbildung C.9: Vergleichsmessungen von Methan und CNG bei veränderter Kalibration an Versuchsmotor 2 in gezündetem Betrieb bei $\lambda = 1,1$ mit konstanter Einspritzdauer. Gezeigt sind λ -Wert und Temperatur T für den Kurbelwinkelbereich bis zur Zündung für Methan (schwarz) und CNG (rot). Es wurden je drei Messungen zu 100 Zyklen aufgenommen, die blaue Linie zeigt den eingestellten λ -Wert an.

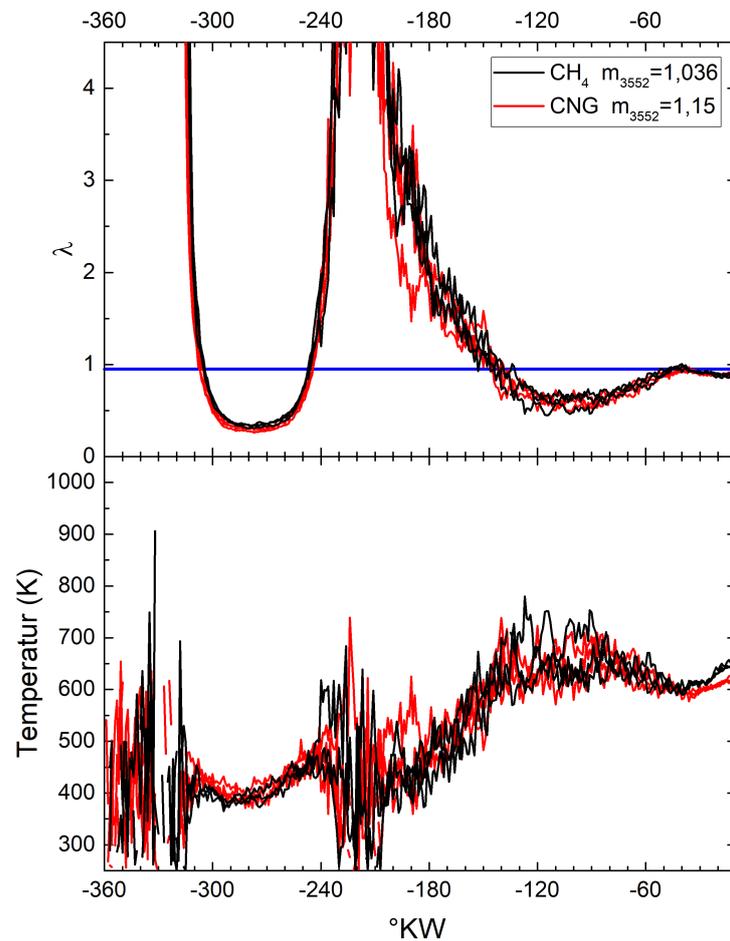


Abbildung C.10: Vergleichsmessungen von Methan und CNG bei veränderter Kalibration an Versuchsmotor 2 in gezündetem Betrieb bei $\lambda = 0,95$ mit konstanter Einspritzdauer. Gezeigt sind λ -Wert und Temperatur T für den Kurbelwinkelbereich bis zur Zündung für Methan (schwarz) und CNG (rot). Es wurden je drei Messungen zu 100 Zyklen aufgenommen, die blaue Linie zeigt den eingestellten λ -Wert an.

Literaturverzeichnis

- [1] International Energy Agency, *Key World Energy Statistics 2016*, <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/key-world-energy-statistics.html>, 2016.
- [2] UN-Klimakonferenz, *Übereinkommen von Paris*, November, 2015. http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/paris_abkommen_bf.pdf.
- [3] EU Parlament, *Die EU-Verordnung zur Verminderung der CO₂- Emissionen von Personenkraftwagen*, 2014. http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/eu_verordnung_co2_emissionen_pkw.pdf.
- [4] R. van Basshuysen und F. Schäfer, Hrsg., *Handbuch Verbrennungsmotor*. Springer Verlag, Wiesbaden, 2015.
- [5] Air Liquide GmbH, *Sicherheitsdatenblatt Erdgas H, Sicherheitsdatenblatt Erdgas L*, <http://produkte.airliquide.de/loesungen/produkte/gasekatalog/stoffe/erdgash.html>, 2017.
- [6] Ulrich Kramer, Massimo Ferrera, Henning Künne, David Castro Moreira, Ingemar Magnusson, *Natural Gas / Methane Fuels: European Automotive Fuel Quality and Standardization Requirements*, 10. Tagung Gasfahrzeuge. Stuttgart, 2015.
- [7] H. Husted, G. Karl, S. Schilling, C. Weber, *Direct Injection of CNG for Driving Performance with Low CO₂*, 23rd Aachen Colloquium. Aachen, 2014.
- [8] U. Kramer, R. Klein, C. Hofmann, H. Stoffels, O. Berkemeier, C. Weber, *Extreme Downsizing of CNG Engines – Opportunities and Challenges*, 1st International Conference - Advanced Fuels for Sustainable Mobility. Haus der Technik, Nürburgring, 2014.
- [9] Landesinitiativkreis ErdgasMobilität Bayern, Mai, 2017. <http://www.tanke-erdgas.de/index.php?navi=aktuelles>.
- [10] bfp Fuhrpark + Management, Mai, 2017. <http://www.fuhrpark.de/das-erdgasnetz-soll-wachsen/150/4126/102072>.
- [11] Deutsche Energie-Agentur, *Erdgas und Biomethan im künftigen Kraftstoffmix*, September, 2011. https://www.bdew.de/internet.nsf/id/D9A10360EC1648E6C1257A7D004E37A4/\protect\T1\textdollarfile/dena-Studie_Erdgas_und_Biomethan_im_kuenftigen_Kraftstoffmix.pdf.

- [12] J. Yeo, J. Rochussen, und P. Kirchen, *Application of an In-Cylinder Local Infrared Absorption Fuel Concentration Sensor in a Diesel-Ignited Dual-Fuel Engine*, in *SAE Technical Paper Series*. SAE International, Oktober, 2016.
- [13] H. Hanabusa, T. Kondo, K. Hashimoto, und M. Furutani, *Study on Cyclic Variations of Laminar Flame Speed in Homogeneous Lean charge Spark Ignition Combustion*, in *SAE Technical Paper Series*. SAE International, Oktober, 2016.
- [14] R. v. Basshuysen und F. Schäfer, *Handbuch Verbrennungsmotor - Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 7. Aufl., 2014.
- [15] H.-H. Braess und U. Seiffert, *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 7. Aufl., 2013.
- [16] Tim Malte Henrich, *Quantifizierung der CO₂-Dichte im Motor mittels IR-Absorptionsmessungen bei 2.7 μm und 4.2 μm* , Masterarbeit, Hochschule für Angewandte Wissenschaften und Kunst, Fakultät Naturwissenschaften und Technik, Göttingen, 2016.
- [17] R. Dolt, *Indizierung in der Motorentechnik*. SV Corporate Media, 2006.
- [18] R. Pischinger, M. Klell, und T. Sams, *Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 3. Aufl., 2013.
- [19] A. Grosch, *Infrarot-spektroskopische Messung der Gemischzusammensetzung im Brennraum von Ottomotoren mit faseroptischen Sensoren*. Dissertation, Universität Clausthal, 2010.
- [20] R. v. Basshuysen, *Erdgas und erneuerbares Methan für den Fahrzeugantrieb - Wege zur klimaneutralen Mobilität*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1. Aufl., 2015.
- [21] F. Joos, *Technische Verbrennung - Verbrennungstechnik, Verbrennungsmodellierung, Emissionen*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1. Aufl., 2006.
- [22] F. K. Kneubühl und M. W. Sigrist, *Laser*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 6. Aufl., 2015.
- [23] P. Atkins und J. d. Paula, *Atkins' Physical Chemistry*. OUP Oxford, New York, London, 8th edition, 2006.
- [24] H. Günzler und H.-U. Gremlich, *IR-Spektroskopie - Eine Einführung*. John Wiley & Sons, New York, 4. Aufl., 2012.
- [25] P. R. Griffiths und J. A. D. Haseth, *Fourier Transform Infrared Spectrometry*. John Wiley & Sons, New York, 2nd edition, 2007.
- [26] G. Herzberg, *Molecular Spectra and Molecular Structure: Electronic spectra and electronic structure of polyatomic molecules*. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, 2nd edition, 1991.

- [27] K. Kohse-Hoeinghaus und J. B. Jeffries, *Applied Combustion Diagnostics*. Taylor & Francis, 2002.
- [28] G. P. Merker und R. Teichmann, *Grundlagen Verbrennungsmotoren - Funktionsweise, Simulation, Messtechnik*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 7. Aufl., 2014.
- [29] H. Zhao und N. Ladommatos, *Engine Combustion Instrumentation and Diagnostics*. Society of Automotive Engineers, 1. Aufl., 2001.
- [30] I. van Cruyningen, A. Lozano, und R. K. Hanson, *Quantitative imaging of concentration by planar laser-induced fluorescence*, *Experiments in Fluids* **10** (1990) Nr. 1, 41–49.
- [31] R. Reichle, C. Pruss, W. Osten, H. J. Tiziani, F. Zimmermann, und C. Schulz, *Fiber optic spark plug sensor for UV-LIF measurements close to the ignition spark*, in *SPIE Proceedings*, Bd. 5856, S. 158–168. 2005.
- [32] F. P. Zimmermann, *New approaches for optical and microoptical diagnostics in IC engines*. Dissertation, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2006.
- [33] C. Schulz und V. Sick, *Tracer-LIF diagnostics: quantitative measurement of fuel concentration, temperature and fuel/air ratio in practical combustion systems*, *Progress in Energy and Combustion Science* **31** (2005) Nr. 1, 75 – 121.
- [34] N. Collings, *A New Technique for Measuring HC Concentration in Real Time, in a Running Engine*, in *SAE Technical Paper*. SAE International, Februar, 1988.
- [35] W. K. Cheng, F. Galliot, und N. Collings, *On the Time Delay in Continuous In-Cylinder Sampling From IC Engines*, in *SAE Technical Paper*. SAE International, Februar, 1989.
- [36] A. Grosch, V. Beushausen, H. Wackerbarth, O. Thiele, T. Berg, und R. Grzeszik, *Calibration of mid-infrared transmission measurements for hydrocarbon detection and propane concentration measurements in harsh environments by using a fiber optical sensor*, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* **112** (2011) Nr. 6, 994 – 1004.
- [37] M. Bolshov, Y. Kuritsyn, und Y. Romanovskii, *Tunable diode laser spectroscopy as a technique for combustion diagnostics*, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* **106** (2015) 45 – 66.
- [38] A. Kakuho, K. R. Sholes, Y. Hashizume, S. Takatani, T. Urushihara, R. K. Hanson, J. B. Jeffries, und M. G. Allen, *Simultaneous Measurement of In-Cylinder Temperature and Residual Gas Concentration in the Vicinity of the Spark Plug by Wavelength Modulation Infrared Absorption*, in *SAE Technical Paper*. SAE International, April, 2007.
- [39] G. Rieker, H. Li, X. Liu, J. Liu, J. Jeffries, R. Hanson, M. Allen, S. Wehe, P. Mulhall, H. Kindle, A. Kakuho, K. Sholes, T. Matsuura, und S. Takatani, *Rapid measurements of temperature and H₂O concentration in IC engines with a spark plug-mounted diode laser sensor*, *Proceedings of the Combustion Institute* **31** (2007) Nr. 2, 3041 – 3049.

- [40] E. Tomita, N. Kawahara, A. Nishiyama, und M. Shigenaga, *In situ measurement of hydrocarbon fuel concentration near a spark plug in an engine cylinder using the 3.392 μm infrared laser absorption method: application to an actual engine*, *Measurement Science and Technology* **14** (2003) Nr. 8, 1357.
- [41] E. Tomita, N. Kawahara, M. Shigenaga, A. Nishiyama, und R. W. Dibble, *In situ measurement of hydrocarbon fuel concentration near a spark plug in an engine cylinder using the 3.392 μm infrared laser absorption method: discussion of applicability with a homogeneous methane–air mixture*, *Measurement Science and Technology* **14** (2003) Nr. 8, 1350.
- [42] M. J. Hall, *Mid-IR fiber optic sensors for internal combustion engines*, in *SPIE Proceedings*, Bd. 3849, S. 19–27. 1999.
- [43] M. J. Hall, P. Zuzek, und R. W. Anderson, *Fiber Optic Sensor for Crank Angle Resolved Measurements of Burned Gas Residual Fraction in the Cylinder of an SI Engine*, in *SAE Technical Paper*. SAE International, Mai, 2001.
- [44] M. Koenig und M. J. Hall, *Measurements of Local In-Cylinder Fuel Concentration Fluctuations in a Firing SI Engine*, in *SAE Technical Paper*. SAE International, Mai, 1997.
- [45] M. H. Koenig und M. J. Hall, *Cycle-Resolved Measurements of Pre-Combustion Fuel Concentration Near the Spark Plug in a Gasoline SI Engine*, in *SAE Technical Paper*. SAE International, Februar, 1998.
- [46] A. Grosch, V. Beushausen, und O. Thiele, *Crank Angle Resolved Determination of Fuel-Concentration and Air/Fuel Ratio in a SI-Production Engine by Using a Modified Optical Spark Plug*, S. 105–126. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [47] A. Grosch, V. Beushausen, H. Wackerbarth, O. Thiele, und T. Berg, *Temperature- and pressure-dependent midinfrared absorption cross sections of gaseous hydrocarbons*, *Applied Optics* **49** (2010) Nr. 2, 196 – 203.
- [48] A. Grosch, H. Wackerbarth, O. Thiele, T. Berg, und L. Beckmann, *Infrared spectroscopic concentration measurements of carbon dioxide and gaseous water in harsh environments with a fiber optical sensor by using the HITEMP database*, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* **133** (2014) 106 – 116.
- [49] Thorlabs GmbH, März, 2017. https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=5276.
- [50] L.S. Rothmann et al., *The HITRAN2012 molecular spectroscopic database*, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* **130** (2013) 4 – 50.
- [51] Finn-Erik Digulla, *Ultraschnelle Messung von Temperatur und Kraftstoff-Luft-Verhältnis mittels 2-Kanal IR-Absorptionsspektroskopie zur Gemischbildungsanalyse in Erdgas-Motoren*, Bachelorarbeit, Georg-August-Universität Göttingen, 2016.

- [52] Wikipedia, März, 2017. <https://de.wikipedia.org/wiki/Retroreflektor>.
- [53] Korth Kristalle GmbH, März, 2017. <http://www.korth.de/index.php/material-detailansicht/items/27.html>.
- [54] Korth Kristalle GmbH, März, 2017. <http://www.korth.de/index.php/material-detailansicht/items/5.html>.
- [55] Keller AG für Druckmesstechnik, April, 2017. http://www.keller-druck.com/home_g/paprod_g/35xhtc_g.asp.
- [56] Testem GmbH, Mai, 2017. <http://www.testem.de/downloadarea/4/>.
- [57] F. Bosnjakovic und K. F. Knoche, *Technische Thermodynamik*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2013.
- [58] AIR LIQUIDE Deutschland GmbH, Mai, 2017. <http://produkte.airliquide.de/loesungen/produkte/gasekatalog/stoffe/erdgas.html>.
- [59] L.R. Brown et al., *Methane line parameters in the HITRAN2012 database*, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* **130** (2013) 201 – 219.
- [60] L. A. Kranendonk, X. An, A. W. Caswell, R. E. Herold, S. T. Sanders, R. Huber, J. G. Fujimoto, Y. Okura, und Y. Urata, *High speed engine gas thermometry by Fourier-domain mode-locked laser absorption spectroscopy*, *Optics Express* **15** (2007) Nr. 23, 15115–15128.
- [61] T. Werblinski, S. Kleindienst, R. Engelbrecht, L. Zigan, und S. Will, *Supercontinuum based absorption spectrometer for cycle-resolved multiparameter measurements in a rapid compression machine*, *Applied Optics* **55** (2016) Nr. 17, 4564–4574.
- [62] J. Reboux, D. Puechberty, und F. Dionnet, *Study of Mixture Inhomogeneities and Combustion Development in a S.I. Engine Using a New Approach of Laser Induced Fluorescence (FARLIF)*, in *SAE Technical Paper*. SAE International, Mai, 1996.
- [63] Z. He, Q. Jing, L. Zhu, W. Zhang, und Z. Huang, *The effects of different intake charge diluents on the combustion and emission characteristics of a spark ignition natural gas engine*, *Applied Thermal Engineering* **89** (2015) 958 – 967.
- [64] J. Liu, X. Zhang, T. Wang, J. Zhang, und H. Wang, *Experimental and numerical study of the pollution formation in a diesel/CNG dual fuel engine*, *Fuel* **159** (2015) 418 – 429.
- [65] W. K. Cheng, T. Summers, und N. Collings, *The fast-response flame ionization detector*, *Progress in Energy and Combustion Science* **24** (1998) Nr. 2, 89 – 124.
- [66] M. Baratta und N. Rapetto, *Mixture formation analysis in a direct-injection NG SI engine under different injection timings*, *Fuel* **159** (2015) 675 – 688.

- [67] B. Peterson, E. Baum, B. Böhm, V. Sick, und A. Dreizler, *Evaluation of toluene LIF thermometry detection strategies applied in an internal combustion engine*, *Applied Physics B* **117** (2014) Nr. 1, 151–175.
- [68] S. Lind, J. Trost, L. Zigan, A. Leipertz, und S. Will, *Application of the tracer combination TEA/acetone for multi-parameter laser-induced fluorescence measurements in IC engines with exhaust gas recirculation*, *Proceedings of the Combustion Institute* **35** (2015) Nr. 3, 3783 – 3791.
- [69] S. Lind, L. Zigan, J. Trost, A. Leipertz, und S. Will, *Simultaneous two-dimensional measurement of fuel–air ratio and temperature in a direct-injection spark-ignition engine using a new tracer-pair laser-induced fluorescence technique*, *International Journal of Engine Research* **17** (2016) Nr. 1, 120–128.
- [70] C. Gessenhardt, C. Schulz, und S. Kaiser, *Endoscopic temperature imaging in a four-cylinder IC engine via two-color toluene fluorescence*, *Proceedings of the Combustion Institute* **35** (2015) Nr. 3, 3697 – 3705.
- [71] Y. Deguchi, T. Kamimoto, und Y. Kiyota, *Time resolved 2D concentration and temperature measurement using CT tunable laser absorption spectroscopy*, *Flow Measurement and Instrumentation* **46** (2015) 312 – 318. Special issue on Tomography Measurement & Modeling of Multiphase Flows.
- [72] T. Kamimoto, Y. Deguchi, und Y. Kiyota, *High temperature field application of two dimensional temperature measurement technology using CT tunable diode laser absorption spectroscopy*, *Flow Measurement and Instrumentation* **46** (2015) 51 – 57.

Danksagung

Als erstes möchte ich Dr. Hainer Wackerbarth dafür danken, dass er mich in die Arbeitsgruppe Photonische Sensorik aufgenommen und mir die Möglichkeit zur Anfertigung dieser Arbeit gegeben hat. Ich konnte mich stets auf seine volle Unterstützung und seinen Rat verlassen und bin durch die Arbeit für ihn sowohl fachlich als auch persönlich gewachsen.

Bei Prof. Dr. Andreas Dillmann bedanke ich mich, dass er sich als Zweitgutachter zur Verfügung gestellt hat und meiner Arbeit gegenüber stets aufgeschlossen und konstruktiv war.

Prof. Dr. Wolfram Kollatschny, Prof. Dr. Hans Christian Hofsäss, Prof. Dr. Michael Seibt und Prof. Dr. Claus Ropers möchte ich dafür danken, dass Sie sich als Mitglieder der Prüfungskommission zur Verfügung gestellt haben.

Dr. Kai Golibrzuch danke ich dafür, dass er mir als Mitstreiter im Projekt OMeGa-E, in dessen Rahmen meine Doktorarbeit entstanden ist, mit Rat und Tat zur Seite stand. Seine fachliche Kompetenz und die sich im gemeinsamen Büro ergebenden Diskussionen haben viele Dinge voran gebracht und damit sehr zum Gelingen meiner Doktorarbeit beigetragen.

Besonders danken möchte ich Dr. Olaf Thiele, Thomas Berg und Stefan Seefeldt von der LaVision GmbH für ihre Hilfe bei den ICOS-Systemen und den vielen sehr konstruktiven fachlichen und organisatorischen Diskussionen.

Ich danke der gesamten Arbeitsgruppe Photonische Sensorik für die tolle Atmosphäre und Teamarbeit. Insbesondere gebührt Stefan Scholz mein Dank für den Einsatz seines technischen Sachverstandes und die tatkräftige Mithilfe beim Konstruieren diverser Experimente. Jonas König, Till Schröder, Daniel Konradt und Leonie Lakemann haben mir als Praktikantinnen und Praktikanten eine große Hilfe bei der Durchführung langwieriger Experimente geleistet und auch dafür möchte ich mich bedanken.

Meinen Freunden danke ich besonders, da ich weiß, dass ich mich immer vollkommen auf sie verlassen kann. Besonders Dr. Julia Rieger möchte ich hier erwähnen, da sie diese Arbeit als erste Person Korrektur gelesen und mir damit sehr geholfen hat.

Bei meinen Eltern möchte ich mich bedanken, da sie mir mein Studium ermöglicht und mich stets ermutigt haben meinen eigenen Weg zu gehen.

Zum Schluss möchte ich Carina Gross danken, deren Bedeutung für mich persönlich gar nicht genug betont werden kann. Sie hilft mir in schwierigen Stunden mit ihrer unglaublich positiven Art, erweitert meinen Horizont und meinen Freundeskreis, bringt mich immer wieder zum Lachen und macht mein Leben einfach besser.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Stephan Bauke
Geburtstag	04.06.1987
Geburtsort	Hildesheim
Staatsangehörigkeit	deutsch
Familienstand	ledig

Bildungsweg

06/2014-derzeit	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Laser-Laboratorium Göttingen e.V., Abteilung Photonische Sensorik
10/2014-08/2017	Promotionsstudent an der Georg-August-Universität Göttingen, Fakultät für Physik
10/2010-11/2013	Physik, Master of Science, Georg-August-Universität Göttingen, Masterarbeit: Thermische Leitfähigkeit von laserdeponierten $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ -Schichten"
10/2007-09/2010	Physik, Bachelor of Science, Georg-August-Universität Göttingen, Bachelorarbeit: "Herstellung und Charakterisierung von Perowskitnanodrähten durch Frakturmasken"
09/2006-05/2007	Zivildienst im Heilpädagogischen Kindergarten Lebenshilfe e.V., Alfeld
08/1999-06/2006	Erlangung der Allgemeinen Hochschulreife am Gymnasium Alfeld