

# Abschlussbericht

BMBF-Verbundprojekt

## Optische Messung der Gemischbildung am Erdgasmotor (OMeGa-E)

### **Förderkennzeichen:**

13N13035

### **Vorhabensverantwortliche:**

Dr. Hainer Wackerbarth

Dr. Kai Golibrzuch

Stephan Bauke

### **Durchführende Stelle:**

Laser-Laboratorium Göttingen e.V.

Hans-Adolf-Krebs-Weg 1

37077 Göttingen



## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	i
1. Einleitung.....	1
1.1. Aufgabenstellung.....	1
1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	1
1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens .....	2
1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	3
1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	5
2. Eingehende Darstellung der Ergebnisse.....	5
2.1. Ergebnisse der Forschungsarbeiten .....	5
2.1.1. Messstrategie zur Quantifizierung von Methan .....	5
2.1.2. CO <sub>2</sub> -Quantifizierung durch Absorptionsmessungen bei 4,2 µm.....	8
2.1.3. Konzeption der Saugrohrsonde.....	9
2.1.4. Gemischbildungsanalyse unter motorischen Bedingungen .....	11
2.1.5. Abgleich der Ergebnisse mit den Projektzielen.....	16
2.2. Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	18
2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	18
2.4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans .....	19
2.5. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	20
2.6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses .....	20
3. Literatur.....	21

## 1. Einleitung

### 1.1. Aufgabenstellung

Das Ziel der Abteilung Photonische Sensorik des Laser-Laboratorium Göttingen e.V. (LLG) bestand in der Konzeption von IR-basierten Messsonden mit Reflektor für die Untersuchung von CNG Motoren. Dabei soll sowohl eine Messung im Brennraum wie auch im Saugrohr ermöglicht werden. Die Sonden sollen die Quantifizierung von CNG auf Basis von nicht-dispersiver Infrarot-Absorption (NDIR) ermöglichen.

Im Rahmen des Projektes wurden dazu die optimalen Detektionsbedingungen für CNG im mittleren IR-Bereich (2-5  $\mu\text{m}$ ) unter motorischen Bedingungen erforscht, indem Messungen an Methan und CNG unter Variation der Temperatur und des Drucks in einer Gaszelle durchgeführt wurden. Zudem wurden die weiteren Gasbestandteile Kohlendioxid und Wasser untersucht, um deren Einfluss auf das Kraftstoffsignal zu minimieren. Spektrale Interferenzen der einzelnen Komponenten sollten möglichst vermieden werden. Auf Grundlage dieser Untersuchungen wurden die Komponenten der Messsonden mit Lichtquelle, Detektor und Filtern definiert.

Eine Herausforderung bildete die Detektion im Saugrohr ohne hereinragende Komponenten, welche die Strömungsverhältnisse potentiell stören konnten. Als Ansatz wurde der Einsatz eines Retroreflektors auf der gegenüberliegenden Seite der Strahlquelle untersucht. Dazu wurden Reflektoren getestet und auf ihre Eignung unter den Bedingungen im Saugrohr geprüft. Messungen in Transmission sind aufgrund der beengten Verhältnisse am Untersuchungsobjekt Motor nicht erstrebenswert. Zudem sollte eine Übertragung der Reflektorgeometrie auf den Brennraum geprüft werden.

Das Hauptaugenmerk der Forschungsarbeiten in der zweiten Hälfte des Projektes bestand in der Entwicklung einer Rechenvorschrift für die Quantifizierung der Kraftstoffdichte anhand der IR-Messsignale. Weiterhin sollten Strategien zur Umrechnung der messbaren Dichte in eine Kraftstoffkonzentration bzw. das Kraftstoff-Luft-Verhältnis erstellt werden.

### 1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Im Jahr 2020 tritt eine EU-Verordnung zur Reduktion des CO<sub>2</sub> Ausstoßes von PKW in Kraft, die den aktuellen Grenzwert von 120g/km im Flottendurchschnitt auf 95g/km absenken soll. Dieses Ziel ist für die Automobilhersteller durch Verwendung von CNG (Erdgas) als Treibstoff anstelle von Otto-Kraftstoff erreichbar. CNG besteht zum größten Teil aus Methan (CH<sub>4</sub>) und bietet auf Grund seiner chemischen Struktur (Kohlenstoff-Wasserstoff-Verhältnis) das Potential etwa 25% CO<sub>2</sub> einzusparen. Zudem kann durch Gewinnung von Methan aus regenerativen Energiequellen (z.B. Biogas) eine nahezu neutrale CO<sub>2</sub>-Bilanz erzielt werden. Um die Effizienz von CNG-Motoren auf das Niveau moderner Benzin- und Dieselmotoren zu bringen müssen den Entwicklern diagnostische Werkzeuge zur Verfügung gestellt werden, um die ablaufenden physikalisch-chemischen Prozesse zu verstehen und zu optimieren. Hierzu sollten optische Messtechniken, die aus der Entwicklung emissionsarmer Benzin- und

Dieselmotoren nicht mehr wegzudenken sind, auf den neuen Kraftstoff Erdgas übertragen werden.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) hat aus diesem Grund das OMeGa-E- Projekt im BMBF-Förderprogramm KMU-innovativ Photonik aufgenommen. Im Rahmen des Projektes arbeitete ein Verbund aus den Unternehmen LaVision GmbH, Volkswagen AG sowie dem Institut für Verbrennung und Gasdynamik (IVG) der Universität Duisburg und dem Laser-Laboratorium Göttingen e.V. zusammen. Das Konsortium vereinigt alle Bereiche von der grundlegenden Forschung und spektroskopischen Expertise, über die Sensorentwicklung und der Anwendung der Messtechnik am Motor vor dem Hintergrund aktueller Fragestellungen von Endanwendern.

### 1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Teilvorhaben des LLGs konnte im Wesentlichen gemäß der Vorgaben des Projektantrags durchgeführt werden. Bei den Projektarbeiten ergab sich als Hauptschwerpunkt die Entwicklung einer Auswertungsstrategie zur Bestimmung der Methan-Konzentration. Insbesondere der Einfluss der im Motor nicht genau bekannten Temperatur stellte eine zentrale Herausforderung dar, die zu Beginn nicht in diesem Umfang abzusehen war.

Zunächst erfolgten spektroskopische Untersuchungen an Mischungen von Methan, Kohlendioxid, Wasser und Stickstoff in Druckzellen mittels FTIR-Spektroskopie um spektrale Quereinflüsse der einzelnen Komponenten zu identifizieren. Anhand der Daten konnten geeignete optische Bandpassfilter für die Messsonde identifiziert werden. Ein signifikanter Einfluss von CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O (Restgas im Motor) auf die CH<sub>4</sub>-Quantifizierung konnte ausgeschlossen werden. Die spektralen Daten wurden mit Simulationen auf Basis der HITRAN-Datenbank [1] abgeglichen und eine gute Übereinstimmung erzielt.

Parallel zu den spektralen Messungen wurden Retroreflektoren auf Ihre Eignung für Messungen im Saugrohr untersucht. Hierbei zeigt sich, dass der angestrebte Einsatz von Reflektorfolien unter motorischen Bedingungen keine Probleme verursacht. Allerdings stellte die Eignung der Reflektoren für den relevanten Spektralbereich (2.5-5 µm) ein Problem dar. Jene Folien, die sich für IR-Anwendungen geeignet zeigten wiesen eine für die benötigte Signalqualität zu geringe Reflexion auf. Hierdurch entstanden Verzögerungen zum eigentlichen Projektplan. Das Problem wurde durch Einsatz goldbeschichteter, 2mm dicker Reflektoren gelöst, deren Eignung für motorische Bedingungen zuvor verifiziert wurde. Für den geplanten Einsatz von Reflektorfolien wurde im Laufe des Projektes eine stärkere Lichtquelle identifiziert, welche den Einsatz der Folien ermöglichte.

Während der Suche nach geeigneten Retroreflektoren erfolgte auch die Konzeption der Geometrie der Saugrohrsonde. Diese musste auf Grund der Retroreflexion gegenüber der standardmäßig verwendeten Zündkerze angepasst werden.

Im Anschluss an die spektralen FTIR-Messungen wurden Zellen-Messungen mit einer ersten Version eines CNG-ICOS-Messsystems durchgeführt. Bei Vergleich der Messdaten mit HITRAN-Simulationen zeigten sich starke Abweichungen. Durch Erfassung der spektralen Eigenschaften des Sensorsystems (Emissionsspektren der Lichtquelle, spektrale

Empfindlichkeit des Detektors, Transmission der optischen Fasern) zusätzlich zur Transmissionskurve der Bandpassfilter wurde die Übereinstimmung deutlich verbessert. Eine empirische Kalibration wurde vorgenommen um verbleibende Unterschiede zwischen Messung und Berechnung zu eliminieren.

Die anschließenden Arbeiten dienten der Entwicklung von MatLab-basierten Algorithmen zur Quantifizierung der Methan-Dichte aus den Sensormessdaten. Hierzu wurden Absorptionsquerschnitte für Methan aus den spektroskopischen Parametern der HITRAN-Datenbank für die motorrelevanten Druck- und Temperaturbedingungen berechnet, um damit eine umfangreiche Look-Up Tabelle zu erzeugen, welche Druck, Temperatur, Dichte und Transmission in Beziehung setzt. Die Algorithmen wurden in ersten Tests am LLG Motorprüfstand getestet und in einer gemeinsamen Messkampagne am Transparentmotor der Volkswagen AG eingesetzt.

Bei allen Motormessungen stellte sich heraus, dass sowohl die Bestimmung der Methan-Dichte wie auch die Berechnung des Kraftstoff-Luft-Verhältnisses einen starken Einfluss der Temperatur zeigen. Im letzten Projektteil wurde daher eine Messstrategie entwickelt, welche unter Ausnutzung der Temperaturabhängigkeit des Methan-Spektrums eine simultane Messung von Methan-Dichte und Temperatur im Messvolumen erlaubt. Diese Entwicklung geht über den Projektplan hinaus und stellt einen wichtigen erzielten Mehrwert dar.

Auf Basis des neu entwickelten Messverfahrens wurde ein zweites CNG-ICOS-System gebaut und bei einer abschließenden gemeinsamen Messkampagne bei der Volkswagen AG am Transparentmotor getestet. Zusätzlich wurden Messungen an einer *Rapid Compression Machine* zur Validierung des Systems durchgeführt.

#### 1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Im Bereich der Gemischbildungsanalyse existieren sowohl bildgebende Techniken wie Laserinduzierte Fluoreszenz [2–5] als auch diverse Sondenmesstechniken [6–13]. Die Messung der Kraftstoffkonzentration mittels minimal-invasiver Sonden kann über eine modifizierte Zündkerze als Punktmessung nahe dem Zündort erfolgen. Zur Quantifizierung hat sich als physikalische Grundlage die Infrarot-Absorption etabliert. Bei den Messungen wird Strahlung von einer Infrarotlichtquelle über optische Fasern zur Absorptionsstrecke geführt, dort an einem kleinen Metallspiegel reflektiert und anschließend wieder zum Detektor zurückgeleitet. Kraftstoffmoleküle innerhalb der Messstrecke absorbieren die Infrarot-Strahlung in Abhängigkeit von der Dichte des Kraftstoffes. Da alle kohlenwasserstoffbasierten Kraftstoffe eine starke Absorption durch die C-H-Bande im Bereich von 3,4  $\mu\text{m}$  aufweisen, ist eine Messung ohne Zugabe von Tracern mit allen gängigen Kraftstoffen (Benzin, Diesel, LPG und CNG) möglich. Allerdings können sich die für die Messtechnik relevanten spektroskopischen Eigenschaften der Moleküle stark unterscheiden.

Erste Untersuchungen mit modifizierten Messzündkerzen führten Hall et al. durch und nutzten dabei eine Halogenlampe als breitbandigen Infrarot-Strahler. Mittels Faseroptischen Zündkerzen wurde Kraftstoff [9] und Kohlenstoffdioxid [14] gemessen. Tomita et al. [7], [8]

verwenden die monochromatische Infrarotstrahlung bei 3,392  $\mu\text{m}$  eines HeNe-Lasers zur Absorptionsmessung.

Des Weiteren existieren Systeme unter Verwendung durchstimmbare Diodenlaser zur Messung von  $\text{CO}_2$  und anderen Verbrennungsgasen mittels Absorption (TDLAS - Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy). Sie werden z.B. in Kraftwerken eingesetzt. Der Vorteil ist die hohe Selektivität bei potentiell stark mit Fremdsubstanzen durchsetzten Gasgemischen und aufgrund der hohen Laserleistung die Messung über lange Distanzen. Die Hauptnachteile sind der einerseits höhere Aufwand durch Benutzung jeweils eines eigenen Lasers pro Molekülspezies und andererseits die Beschränkung auf relativ niedrige Drücke bis hin zu einigen wenigen bar. Letzteres wird durch die spektrale Druckverbreiterung hervorgerufen, die dazu führt, dass einzelne Absorptionslinien je nach Molekülspezies ab 5-10 bar nicht mehr isoliert erfasst werden können.

Die Kohlenwasserstoffkonzentration und die Restgasbestandteile Wasser und Kohlendioxid können mittels eines Faseroptischen Sensors unter motorischen Bedingungen quantifiziert werden. Dieser Sensor wurde in vorangegangenen Förderprojekten gemeinsam mit LaVision entwickelt. Basierend auf Breitband-Absorption im mittleren Infrarot (MIR) und spektral aufgelöster Absorption im nahen Infrarot (NIR) können hoch zeitaufgelöst Kraftstoffdichte, Restgasanteil und Gemischtemperatur bestimmt werden [10–12], [15], [16].

Neben der Messung im Brennraum wurden Gasentnahmesysteme mit externer Analyse eingesetzt. Bei Flammenionisationsdetektoren (FID) wird das Probengas aus dem Brennraum über eine kleine Flamme geleitet. Aus den Kohlenwasserstoff-Komponenten des Probengases entstehen Ionen, deren Strom gemessen wird, woraus auf die Kohlenwasserstoffkonzentration geschlossen wird. Dieses ist zwar kein optisches Verfahren, liefert aber zumindest potentiell eine der angestrebten Messgrößen und muss deshalb beim Stand der Technik berücksichtigt werden. Nachteile der Methode sind die notwendige Gasentnahme, die geringe zeitliche Auslösung und die Beschränkung auf Kohlenwasserstoffe. Neben der Detektion mittels FID sind ebenfalls Systeme mit einer Komponentenanalyse auf Basis von Breitband-IR-Absorption erhältlich. Dieses Verfahren ist prinzipiell identisch mit dem im Projekt angestrebten, nur erfolgt die Lichtabsorption nicht in-situ in Brennraum oder Saugrohr. Über schnelle Gasentnahmeventile wird ein kleiner Anteil Probengas entnommen und der externen Analyse kammer zugeführt. Es ist möglich eine Zeitauflösung im Bereich von Millisekunden zu erreichen, was aber immer noch 1-2 Größenordnungen langsamer ist als mit dem im Projekt verwendeten Verfahren.

Am nächsten an den Anforderungen an die Messtechnik, die in diesem Projekt entwickelt werden soll, sind die Messsysteme HFR500<sup>1</sup> (FID für Kraftstoff) und NDIR500<sup>2</sup> (NDIR für  $\text{CO}_2$  und  $\text{CO}$ ) der Fa. Cambustion Ltd., Großbritannien. Das HFR500 dient zur Messung von Kraftstoffkonzentration und beruht auf schneller Gasentnahme bis zu 900  $\mu\text{s}$  und dem Einsatz eines Flammen-Ionisations-Detektors. Dieser kann weder die Restgasbestandteile  $\text{H}_2\text{O}$  und  $\text{CO}_2$  detektieren noch ist er echtzeitfähig. Das NDIR500 System misst dagegen  $\text{CO}_2$  und  $\text{CO}$ .

---

<sup>1</sup> <http://www.cambustion.com/products/hfr500>

<sup>2</sup> <http://www.cambustion.com/products/ndir500>

Auch hier ist schnelle Gasentnahme im Einsatz mit Messzeiten um 8 ms. Die zeitliche Auflösung ist von allen von Wettbewerbern erhältlichen Systemen die höchste, allerdings weit von der im Projekt angestrebten Zielgröße von 30  $\mu\text{s}$  entfernt.

### 1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Projektes wurde nicht mit anderen Stellen als mit den Kooperationspartnern zusammen gearbeitet.

## 2. Eingehende Darstellung der Ergebnisse

### 2.1. Ergebnisse der Forschungsarbeiten

#### 2.1.1. Messstrategie zur Quantifizierung von Methan

##### *Identifizierung des Detektionsbereichs*

Zu Beginn des Projektes musste zunächst der spektrale Detektionsbereich für Methan bzw. CNG festgelegt werden. Hierzu wurden FTIR-Messungen an Mischungen aus Methan,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  und Stickstoff durchgeführt und mit Simulation auf Basis der HITRAN-Datenbank abgeglichen. Abb. 14 zeigt exemplarisch eine Übersicht der für das Projekt relevanten Absorptionsbanden. Methan weist wie alle Kohlenwasserstoffe eine starke Absorption bei ca.  $3000\text{ cm}^{-1}$  ( $3,3\ \mu\text{m}$ ), welche auf eine Anregung der  $\nu_3$ -Bande zurückzuführen ist, die der anti-symmetrischen C-H-Streckschwingung entspricht. Im Vergleich zu höheren Kohlenwasserstoffen (siehe Ref. [11]) ist die Absorption jedoch blau-verschoben und weist diskrete Absorptionspeaks auf. Dies führt zu einer komplexeren Quantifizierung im Vergleich zu Messungen an Benzin-Motoren. Durch das Auftreten einzelner Absorptionspeaks werden spektrale Einflüsse wie Druckverbreiterung und eine temperaturabhängige Umbesetzung der Rotationszustände relevant. Es ist nicht mehr möglich einem messbaren Transmissionswert ohne Kenntnis von Druck und Temperatur eine definierte Molekül-Dichte zuzuordnen. Bei konstanter Methan-Dichte aber verändertem Druck oder Temperatur wird ein anderes Transmissionsignal gemessen. Dadurch schlagen zuvor verwendete, empirische Quantifizierungsansätze mit in-situ-Kalibration am Prüfstandsmotor fehl.

Auf Grund dieser Beobachtungen wurde im Projekt eine Messstrategie auf Basis der bekannten Spektroskopie unter Nutzung der HITRAN-Datenbank entwickelt.

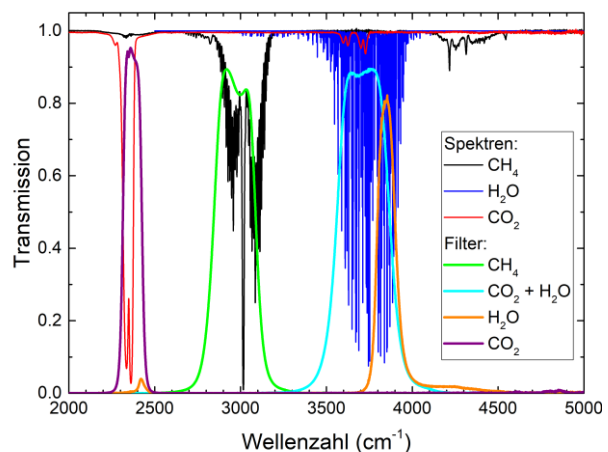


Abb. 1: FTIR-Spektren von Methan, Kohlendioxid und Wasser sowie die im ICOS-System verwendeten Bandpassfilter.

### Quantifizierung von Sensordaten durch HITRAN-basierte Datenanalyse

Im Gegensatz zu höheren Kohlenwasserstoffen sind die spektroskopischen Eigenschaften von Methan sehr gut bekannt. Die spektralen Parameter (Linienposition, Linienstärke, Besetzungsfaktor, Druckverbreitungskoeffizient, etc.) sind in der *High-Resolution Transmission Molecular Absorption Database* (HITRAN)[1] dokumentiert. Unter Nutzung dieser Parameter wurde eine Datenbank aus Absorptionsquerschnitten erzeugt, welche den motorisch relevanten Druck- und Temperaturbereich abdeckt. Diese Datenbank wurde schließlich genutzt um

eine Look-Up Tabelle zu erzeugen, welche die experimentell messbare Transmission für gegebenen Druck und Temperatur mit einer Methan-Dichte verbindet. Bei Vergleich der vorhergesagten Dichten mit den Messdaten wurden deutliche Abweichungen festgestellt. Diese konnten durch die Einbeziehung der spektralen Eigenschaften des Messsystems signifikant reduziert werden. Abb. 2 zeigt eine Übersicht der Transmissionskurven der einzelnen, berücksichtigten Komponenten sowie die daraus resultierende, effektive Systemtransmission. Durch die Berücksichtigung der bekannten spektralen Einflüsse wurde die Übereinstimmung der HITRAN-basierten Rechnungen mit den experimentellen Sensor-Daten deutlich verbessert. Durch eine zusätzlich empirische Korrektur der berechneten Transmissionswerte konnte diese weiter verbessert und eine Messgenauigkeit im Rahmen der Zielspezifikationen für das Projekt erzielt werden.

Im Projekt war neben der Quantifizierung der Methan-Dichte, welche direkt gemessen werden kann, vor allem die Bestimmung des Lambda-Wertes gefordert. Da eine optische Sauerstoff-Detektion nicht möglich ist, muss die zur Berechnung des Lambda-Werts erforderliche Luftmenge auf anderem Wege bestimmt werden. Unter Berücksichtigung der Reaktionsgleichung für die Verbrennung von Methan ( $CH_4 + 2 O_2 \rightarrow CO_2 + 2 H_2O$ ) und der Sauerstoff-Konzentration in Luft ergibt sich:

$$\lambda = \frac{\rho_{ges} \cdot (1 - x_{AGR}) - \rho_{CH_4}}{9,52 \cdot \rho_{CH_4}}$$

wobei  $\rho_{ges}$  die über das ideale Gasgesetz berechnete Gesamtdichte,  $\rho_{CH_4}$  die Methandichte und  $x_{AGR}$  die Abgasrückführungsrate sind. Letztere wurde im Projekt nicht berücksichtigt, kann aber bei Bedarf durch Messung der  $CO_2$ -Konzentration gemessen werden [6], [10]. Ohne Berücksichtigung von Abgasrückführung repräsentiert der berechnete Lambda-Wert ein oberes Limit.

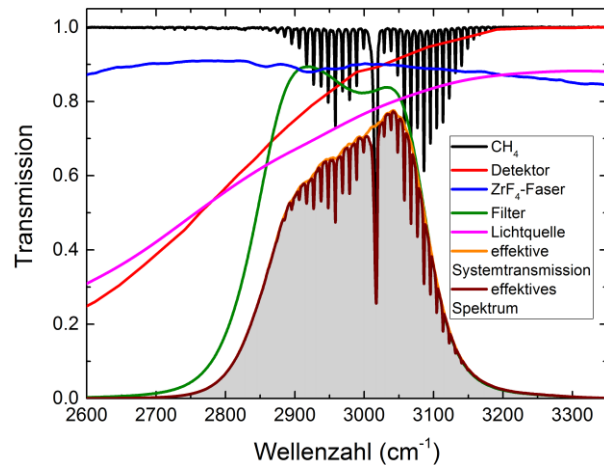


Abb. 2: Übersicht der spektralen Einflüsse des ICOS-Systems sowie die resultierende, effektive Systemtransmission



### Simultane Bestimmung von Dichte und Temperatur

Wie zuvor geschildert muss für die Quantifizierung der Methan-Dichte der Einfluss von Druck und Temperatur berücksichtigt werden. Dies ist in der entwickelten Strategie zur Datenanalyse durch die Verwendung eines physikalischen Modells unter Nutzung der bekannten spektroskopischen Parameter gegeben. Allerdings erfordert die Anwendung der Quantifizierungsstrategie die Kenntnis von Transmission, Druck und Temperatur. Während Transmission (Sensor) und Druck (Druckindizierung am Prüfstand) als Messwerte vorhanden sind, stellt die genaue Kenntnis der Temperatur auf besser als  $\pm 20$  K eine große Herausforderung dar. Es besteht kein einfacher Zugang zu dieser für die Messung wichtigen Größe.

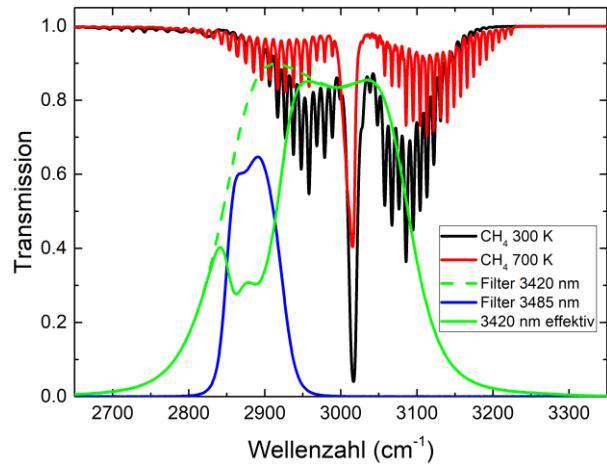


Abb. 3: Vergleich von CH<sub>4</sub>-Transmissionspektren mit spektralen Bandpassfiltern zur simultanen Bestimmung von Dichte Temperatur.

Aus diesem Grund wurde im Projekt eine neue Methode entwickelt um eine simultane Bestimmung von Methan-Dichte und Temperatur zu erlauben, was einen deutlichen Mehrwert zu den im Projekt geplanten Vorhaben darstellt. Die Messstrategie nutzt die starke Temperaturabhängigkeit der CH<sub>4</sub>-Absorptionsbande zur Temperaturmessung aus. Dabei werden zwei unterschiedliche Bandpassfilter verwendet und somit ein zusätzliches Messsignal generiert. Abb. 3 zeigt ein Beispiel für eine im Projekt erfolgreich angewendete Kombination von Bandpassfiltern im Vergleich zu Absorptionsspektren von Methan bei 300 K und 700 K. Der Detektionsbereich eines jeden Filters ist so gewählt, dass beide Messkanäle eine unterschiedliche Temperaturempfindlichkeit zeigen. Dabei haben die Projektarbeiten gezeigt, dass die Wahl der Filter entscheidenden Einfluss auf die erreichbaren Messgenauigkeiten hat. Die beiden Messsignale werden in einem Korrelationsalgorithmus verarbeitet. Dabei wird für jeden Messkanal die Dichte in Abhängigkeit von der Temperatur über einen sinnvollen Bereich

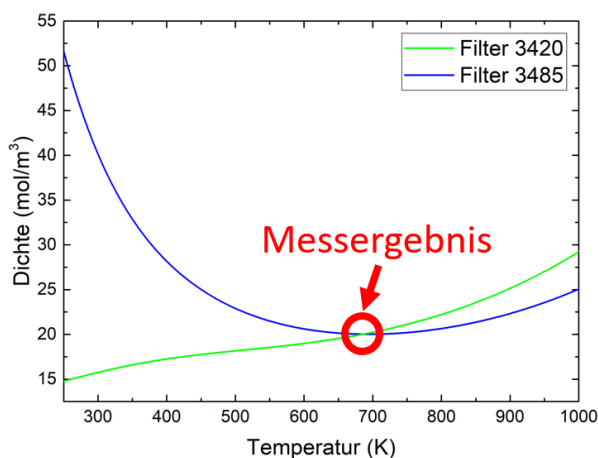


Abb. 4: Beispiel der Korrelation von 2-Messsignalen zur simultanen Bestimmung von Methan-Dichte und Temperatur.

(z.B.  $\pm 150$  °C) ausgehend von Berechnungen mittels eines thermodynamischen Modells, bestimmt. Dies führt zu zwei Kurven wie in Abb. 4 dargestellt. Der Schnittpunkt der Korrelationskurven entspricht dabei den realen Messbedingungen. Somit können Kraftstoffdichte und Temperatur eindeutig bestimmt werden. Diese Korrelations-Analyse wurde auf Messungen in einer Druckzelle angewendet an vorgemischten Gasmischungen von 9,51% CH<sub>4</sub> ( $\lambda=1$ ) und 30% CH<sub>4</sub> ( $\lambda=0.25$ ) in N<sub>2</sub> unter Verwendung des Zündkerzensensors. Abb. 5 zeigt die Abweichung der ermittelten Temperaturen

und Lambda-Werte zu den nominellen Werten. Die Messtechnik ermöglicht eine Temperaturmessung mit einer Genauigkeit von  $\pm 11,2$  K im Mittel über alle Messwerte. Dabei

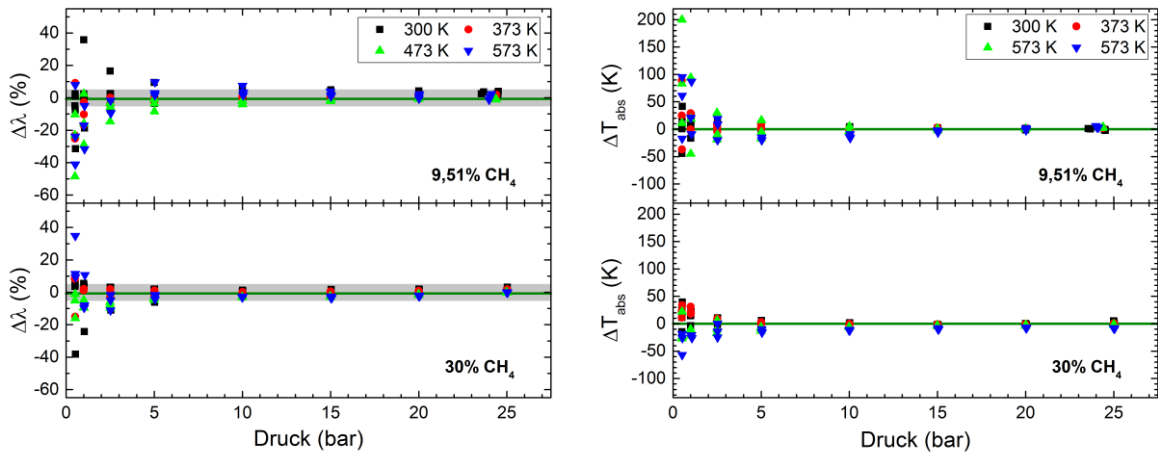


Abb. 5: Validierung der 2-Filter-Methode an Messungen in Druckzellen. Aufgetragen sind die Abweichungen zwischen gemessenen und nominellen Werten (Lambda, Temperatur) gegen den Druck. Die grauen Balken entsprechen einer Abweichung von 5% gemäß Zielspezifikation.

ist zu beachten, dass die Abweichung im motorisch relevanten Bereich oberhalb von 2,5 bar deutlich geringer ist als bei kleineren Drücken. Die Abweichungen im Lambda-Wert betragen im Mittel 5,4% und bewegen sich im motorisch relevanten Bereich (>2,5 bar) zum überwiegenden Teil innerhalb der durch das Projektziel festgelegten Genauigkeit von 5% (graue Balken).

### 2.1.2. CO<sub>2</sub>-Quantifizierung durch Absorptionsmessungen bei 4,2 μm

Neben der Quantifizierung der Methan-Konzentration war die Messung von CO<sub>2</sub> durch Absorption bei 4,2 μm im Projekt angestrebt. Im Vergleich zur zuvor verwendeten Messung bei 2,7 μm, bietet die Detektion bei 4,2 μm den Vorteil eine deutlich stärkeren Absorptionskoeffizienten sowie die Vermeidung eines Quereinflusses durch Wasser-Absorption.

Der Projektansatz zur Quantifizierung von CO<sub>2</sub> erfolgte analog zu dem für Methan. Es wurden spektral aufgelöste FTIR-Messungen an Gasmischung von 1% und 2% CO<sub>2</sub> in N<sub>2</sub> mit HITRAN-Simulationen abgeglichen (siehe rote Quadrate und blaue Linien in Abb. 6). Anschließend wurden Messungen mit einem für die 4,2 μm Detektion modifizierten ICOS-System durchgeführt (schwarze Quadrate in Abb. 6). Trotz Modellierung der optischen Eigenschaften des Systems konnte keine zufriedenstellende Übereinstimmung erzielt werden. Es zeigte sich, dass auf Grund des hohen Absorptionsquerschnitts die Absorption in Luft außerhalb der

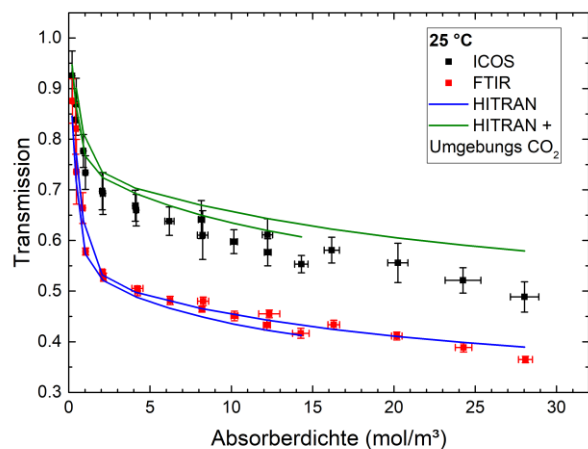


Abb. 6: Vergleich von CO<sub>2</sub>-Absorptionsmessungen mittels ICOS-Sensorik und Berechnungen auf Basis spektraler FTIR-Messungen und HITRAN-Simulationen.

Messstrecke berücksichtigt werden muss. Die grünen Linien in Abb. 6 zeigen das Ergebnis der Berechnung und eine deutlich bessere Übereinstimmung mit den Sensor-Daten.

Wie oben beschrieben liegt die Attraktivität der Detektion von CO<sub>2</sub> bei 4,2 µm zum einen in der Eliminierung der Überlappung mit starken H<sub>2</sub>O-Absorptionsbanden. Zum anderen aber auch in der Möglichkeit kleine Menge CO<sub>2</sub> mit sehr kurzen Absorptionstrecke zu detektieren. Lange Absorptionstrecken sind dagegen nicht attraktiv. Für Messungen im Ansaugtrakt ist die CO<sub>2</sub>-Messung bei 4,2 µm auf Grund der langen Absorptionstrecken (4-5 cm) nicht relevant. Im Brennraum ist die Nutzung der Absorptionsbande durchaus attraktiv, lässt sich jedoch technisch nicht umsetzen. In der Zündkerzensonde führen Saphir-Fasern das Licht, welche lediglich für Wellenlängen <3,6 µm transparent sind. Fasern, welche im geeigneten Wellenlängenbereich transmittieren, können den im Brennraum auftretenden, hohen Temperaturen nicht widerstehen. Daher ist eine Verwendung der 4,2 µm Detektion von CO<sub>2</sub> im Brennraum mangels geeigneter Faser-Materialien derzeit nicht möglich.

### 2.1.3. Konzeption der Saugrohrsonde

Neben der Quantifizierung von Methan im Brennraum mittels einer minimal-invasiven in einer Zündkerze integrierten Sonde, sollte im Projekt eine Messung im Saugrohr erfolgen. Die zentrale Anforderung war dabei, dass keine Bauteile in den Ansaugtrakt hineinragen durften um die Strömungsverhältnisse nicht zu beeinflussen. Eine Messung im Durchlicht war auf Grund der beengten Verhältnisse an Vollmotoren nicht möglich. Aus diesem Grund wurde im Projekt eine Geometrie mit einseitigem Zugang und gegenüberliegendem Reflektor angestrebt und am LLG entwickelt. Die Arbeiten umfassten zum einen die Identifizierung geeigneter Retroreflektoren und zum anderen die Konzeption einer Messgeometrie.

#### Retroreflektoren

Im Projekt sollte eine Messsonde zur Messung im Saugrohr unter Verwendung von Reflektoren entwickelt werden. Zum einen war für metallische Saugrohre die minimal-invasive Bearbeitung der der Messsonde gegenüberliegenden Fläche angedacht. Zum anderen war für Kunststoffsaugrohre das Einkleben von Reflektorfolien geplant. Grundlegend sollte für beide Verfahren der Effekt der Retroreflexion genutzt werden. Hierbei werden Strukturen wie Tripel-Spiegel oder auch sog. Lüneburg-Linsen eingesetzt, welche dazu führen, dass ein auftreffender Lichtstrahl in Einfallsrichtung zurück

reflektiert wird. Durch die Nutzung von Retroreflektoren entfällt eine Justage des Systems, wie sie bei Verwendung eines einfachen Planspiegels nötig wäre, sodass das System unempfindlicher gegenüber mechanischen Störungen wird. Abb. 7 zeigt den Vergleich der winkelabhängigen Reflexion unterschiedlicher Retroreflektoren. Die grüne Linie kennzeichnet das minimale Signal, welches für die im Projekt geforderte Messgenauigkeit benötigt wird. Die

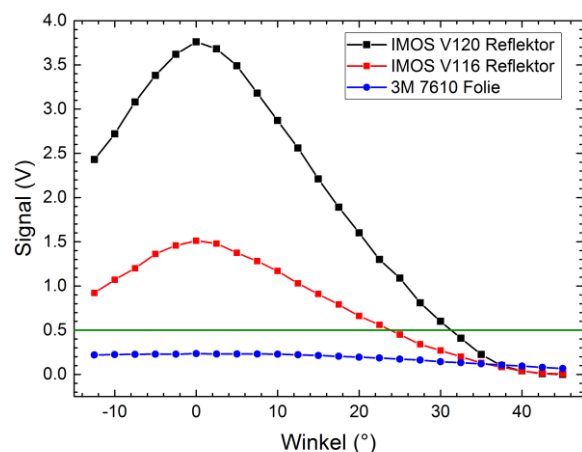


Abb. 7: Vergleich der winkelabhängigen Reflexion unterschiedlicher Retroreflektoren.

Messungen wurden in der für die spätere Saugrohrsonde verwendeten Geometrie (siehe unten) mit der entsprechenden Lichtquelle durchgeführt. Bei den Retroreflektoren handelt es sich um eine Folie mit Lüneburg-Linsen (3M 7610) und zwei goldbeschichteten Reflektoren aus PMMA (IMOS V116, ca. 4 mm hoch und IMOS V120, ca. 2mm hoch). Es ist zu erkennen, dass die Reflektorfolie über einen breiten Winkelbereich von etwa  $\pm 20^\circ$  ein nahezu konstantes Signal liefert. Dahingegen weist ein Goldspiegel nur einen sehr geringen Akzeptanzbereich auf und würde somit eine äußerst genaue Justage erfordern. Allerdings genügt die Reflexion der Folie nicht den Mindestanforderung an die Stärke des Messsignals. Die Verwendung von Reflektorfolien erfordert somit eine stärkere Lichtquelle. Im Projektverlauf wurde als alternative zur bislang verwendeten 150W Quarz-Wolfram-Halogen-Lampe eine Xenon-Entladungslampe (Ushio UXR-300BU) gefunden, welche ein um einen Faktor 12 höheres Signal liefert und somit den Einsatz von Reflektorfolien ermöglicht. Als Alternative zu Reflektorfolien sind zudem die makroskopischen PMMA-Reflektoren IMOS V116 und IMOS V120 anzusehen. Diese besitzen zwar eine etwas geringere Winkelstabilität als die Folien, liefern aber auch mit der Standard QTH-Lichtquelle bis zu einem Einfallswinkel von  $21^\circ$  bzw.  $30^\circ$  ein ausreichendes Messsignal. Der Reflektor IMOS V120 ist dabei aufgrund seiner besseren Reflektivität und seiner geringeren Bauhöhe klar vorzuziehen.

Neben der absoluten Reflektivität der Reflektorfolien stellt vor allem ihre Eignung für den im Projekt relevanten Spektralbereich ein Problem dar. Kommerzielle Folien sind in der Regel für den sichtbaren und nahen Infrarotbereich entwickelt. Insbesondere Tripel-Strukturen sind aus PMMA gefertigt, welches als Polymer Absorptionen im relevanten Spektralbereich von  $2.5\text{-}5\ \mu\text{m}$  ausweist. Abb. 8 zeigt den spektralen Verlauf der Reflektivität unterschiedlicher Reflektoren von  $1500\text{-}4500\ \text{cm}^{-1}$  ( $2.2\text{-}6.6\ \mu\text{m}$ ). Dabei repräsentiert die IMOS Chess eine Tripel-Folie und die Folien 7610 und 7800 der Firma 3M arbeiten auf Basis von Lüneburg-Linsen. Für die Tripel-Folie sind klare Absorptionsbanden zu erkennen. Sie ist somit nicht für den Einsatz im Projektrelevanten Spektralbereich geeignet.

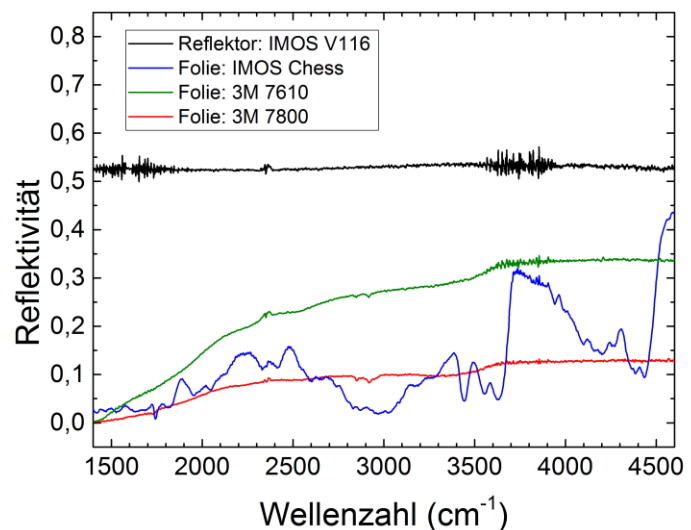


Abb. 8: Spektrale Reflektivität unterschiedlicher Retroreflektoren, gemessen mittels FTIR-Spektrometer.

Die Verwendung von Retroreflektoren war zunächst lediglich für Saugrohre aus Kunststoff geplant. Für metallische Bauteile sowie für eine Spiegelfreie-Messung im Brennraum sollte die Möglichkeit einer Strukturierung der Oberfläche untersucht werden. Im Laufe der Projektarbeiten und in Kommunikation mit Herstellern von Reflektoren zeigte sich, dass die Strukturierung metallischer Oberfläche nicht mit vertretbarem Aufwand zu realisieren ist. Eine retroreflektierende Geometrie muss äußerst exakt gefertigt werden, was z.B. durch einfaches Einprägen mit einem Werkzeug nicht möglich ist. Gängige Reflektoren werden durch Spritzguss aus PMMA gefertigt. Auch dieses Verfahren ist durch die Fließigenschaften auf

Polymere limitiert. Eine Fertigung aus Glas oder Metall ist nicht möglich. Somit müssen auch für metallische Saugrohre Reflektoren eingeklebt werden. Die spiegelfreie Messung im Brennraum ist somit nicht durch eine Bearbeitung der Kolbenoberfläche, sondern nur über die Realisierung eines Durchlichtaufbaus (Line-Of-Sight) möglich.

### Saugrohrsonde

In Folge der Identifizierung geeigneter Retroreflektoren wurde eine Sondengeometrie für den Ansaugtrakt entwickelt. Bei Untersuchungen der Eigenschaften der Retroreflektoren wurde festgestellt, dass ein Anordnung mit zwei nebeneinander liegenden Fasern, wie sie in der Zündkerzensonde für den Brennraum vorliegt, nicht zielführend ist. Die Retroreflexion führt dazu, dass das eingestrahelte Licht fast ausschließlich in die Faser zurückgeworfen wird, die das Licht von der Lichtquelle zur Sonde führt.

Aus diesem Grund wurde eine Messsonde entworfen, wie sie in Abb. 9 in einer CAD-Zeichnung dargestellt ist. Die Strahlung der Lichtquelle wird in eine  $ZrF_4$ -Faser eingekoppelt, zur Messsonde geführt und mittels einer  $CaF_2$ -Linse kollimiert. Der parallelisierte Lichtstrahl trifft auf einen Strahlteiler mit einer Reflektivität von ca. 50%. Der transmittierte Teil des Lichts durchläuft die Messstrecke, wird vom Reflektor zurückgeworfen und trifft erneute auf den Strahlteiler. Der reflektierte Teil der Strahlung wird in einer Detektionsfaser ( $ZrF_4$ ) eingekoppelt und zur Detektionseinheit geführt. Die Geometrie wurde zunächst in ein Laborsystem umgesetzt, um diese an Druckzellenmessungen zu testen.

Zur Messung am Motor wurde nach der Testmessung die in Abb. 9 gezeigte Sonde vom Projektpartner LaVision gefertigt und in einer ersten Messkampagne bei Volkswagen eingesetzt. Der Prototyp erlaubt eine einfache Anbringung am Saugrohr über ein M12-Gewinde und war zum Ansaugtrakt durch ein Saphir-Fenster abgeschlossen. Im Anschluss an den ersten Einsatz erfolgte eine Überarbeitung der Sonde, da diese Probleme mit internen Reflexionen, speziell vom Saphir-Fenster, aufwies. Durch Verkippung des Dichtfensters um  $5^\circ$  konnte das Problem der internen Reflexion behoben werden. Die zweite Version der Saugrohrsonde wurde in der abschließenden Messkampagne bei Volkswagen erfolgreich getestet.

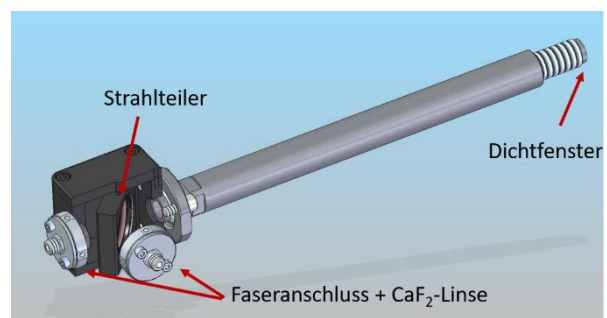


Abb. 9: Entwurf eines Prototypen der Saugrohrsonde für CNG-Motoren.

#### 2.1.4. Gemischbildungsanalyse unter motorischen Bedingungen

Das letztliche Projektziel war eine Messung des Lambda-Wertes an Erdgas-Motoren mit einer Genauigkeit von 2% im Zyklusmittel und 5% im Einzelzyklus. Im Folgenden werden daher die im Projekt erzielten Ergebnisse für Messungen unter motorischen Bedingungen dargestellt. Dabei wird unterschieden zwischen Messungen im Saugrohr und Messungen im Brennraum. Im Saugrohr eines Vollmotors liegen in der Regel keine schnellen dynamischen Temperaturänderungen vor. Daher ist eine Anwendung der oben vorgestellten Korrelations-Methodik nicht nötig und die Temperaturinformation kann durch langsame Messungen mit

gängigen Temperaturfühlern (Thermoelement, Pt100) gewonnen werden. Im Brennraum treten Drücke im Bereich von 0,5-40 bar und Temperaturen von 20-800 °C während der Gemischbildung auf. Hier ist eine Verwendung der 2-Filter-Methode erforderlich um insbesondere die Temperaturinformation zu gewinnen.

### Saugrohr

Die oben beschriebene Messsonde für den Ansaugtrakt wurde in einer abschließenden Messkampagne bei Volkswagen eingesetzt. Als Versuchsträger diente ein Einzylinder Transparentmotor mit Saugrohreinspritzung. Der Prüfstand wurde vom Kooperationspartner Volkswagen für die Validierung der Messtechnik modifiziert. Im Ansaugstrang wurden Massenflussregler für Methan und Luft installiert, welche eine homogene Vormischung von Kraftstoff und Luft ermöglichten. So konnten definierte Lambda-Werte eingestellt und durch Vergleich der Messergebnisse mit der Vorgabe die Messtechnik validiert werden. Abb. 10 zeigt das Ergebnis von Messungen bei definierten Lambda-Werten sowie einen typischen Verlauf des Saugrohrdrucks. Die grau hinterlegten Flächen kennzeichnen die im Projekt angestrebte Messgenauigkeit von 5% für Einzelzyklen.

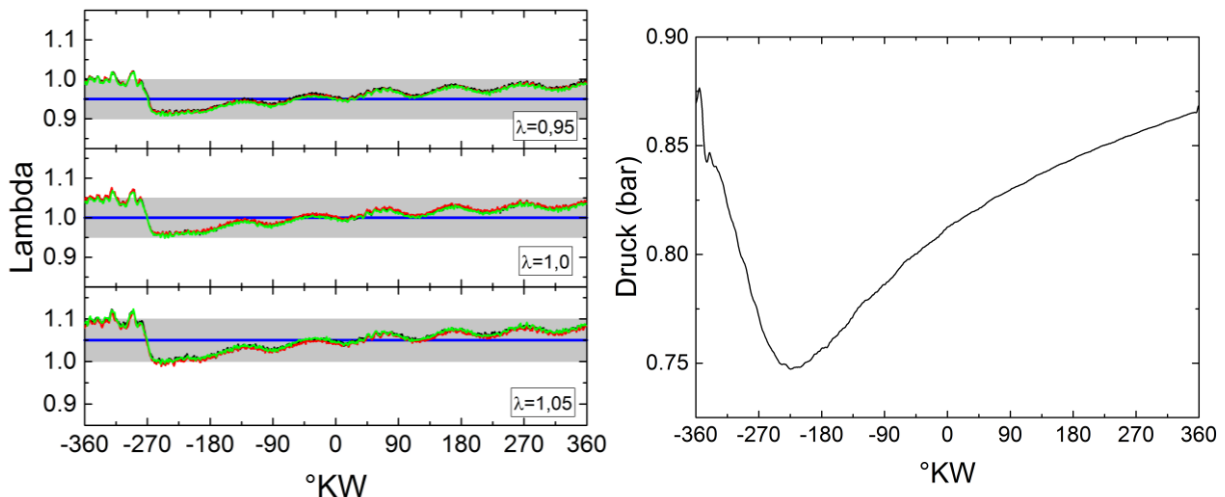


Abb. 10: Validierungsmessungen Saugrohrsonde: mittlerer Lambda-Wert über 100 Zyklen bei jeweils drei Messungen für unterschiedliche, fest eingestellte Lambda-Werte sowie Messgenauigkeit von 5% als graue Fläche (links). Typischer Verlauf des Saugrohrdrucks innerhalb eines Zyklus (rechts).

Die Daten zeigen mittlere Messwerte und liegen allgemein innerhalb der angestrebten Messgenauigkeit für Einzelzyklen. Damit liegt die erreichte Genauigkeit außerhalb der Zielspezifikationen, allerdings weisen die Messergebnisse eine hohe Reproduzierbarkeit auf (schwarze, rote, grüne Kurven). Zusätzlich zeigen alle Kurven einen charakteristischen Verlauf mit einem Abfall des Lambda-Wertes bei -270°KW und einem Anstieg bis 360°KW, der die Genauigkeit beeinflusst, sowie leichte Oszillationen auf dem Messsignal. Bei Vergleich mit dem Druckverlauf zeigt sich, dass der Abfall im Lambda-Wert mit einem starken Druckabfall (ca. 15%) korreliert. Der rapide Druckabfall wird durch das Öffnen der Einlassventile und dem folgenden Einströmen des Methan-Luft-Gemisches in den Brennraum verursacht. Mit hoher Wahrscheinlichkeit geht dieser Druckabfall mit einem Temperaturabfall einher. In der Datenauswertung wird mit konstanter Temperatur gearbeitet und somit im Falle einer Temperaturänderung primär die Gesamtgasdicht fehlerhaft berechnet. Bereits ein dynamischer Temperaturabfall von ca. 10-20°C genügt um den Einbruch des gemessenen

Lambda-Wertes zu erklären. Messungen am LLG Motorprüfstand haben gezeigt, dass solche Druckabfälle an Vollmotoren nicht auftreten und eine Eigenschaft des experimentellen Aufbaus der Validierungsmessungen sind. Das geringe Rauschen auf den Messkurven von **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** impliziert, dass eine deutlich höhere Messgenauigkeit und damit die Zielspezifikation erreicht werden kann.

### Datenanalyse für Messungen im Brennraum

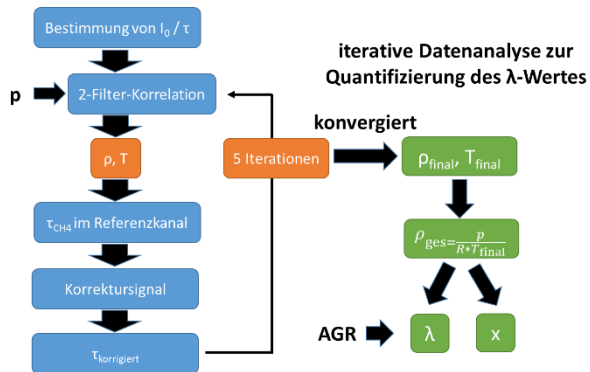


Abb. 11: Flussdiagramm der im Projekt entwickelten Datenanalyse für motorische Anwendungen.

Für Messungen der Gemischbildung im Brennraum wurde eine in Vorgängerprojekten entwickelte Zündkerzensonde verwendet [6], [15], [16]. Diese besteht aus Zündelektroden sowie einem metallischen Spiegelkäfig, der eine Absorptionsstrecke von 0,96 cm definiert. Auf Grund der dynamischen Druck- und Temperaturverhältnisse kam für die Brennraummesstechnik die oben dargestellte 2-Filter-Methode zum Einsatz.

Da im Motor durch Vibrationen, Druck- und Temperatureinflüsse auf die Messsonde (*beam steering*) Artefakte auf den Messsignalen entstehen können, wurde zusätzlich zu den zwei Methan-Messkanälen ein idealerweise absorptionsfreier Referenzkanal im Bereich von 3  $\mu\text{m}$  verwendet. Durch die Blauverschiebung der Methanbande im Vergleich zu höheren Kohlenwasserstoffen von Flüssigkraftstoffen wird der verwendete Referenzkanal jedoch ebenfalls durch Methan beeinflusst, insbesondere bei hohen Dichten und Temperaturen. Daher wurde ein Algorithmus entwickelt um den Methaneinfluss auf den Referenzkanal zu bestimmen und die von Methan unabhängigen Störungen auf den Kraftstoff-Signalen zu korrigieren. Abb. 11 zeigt ein Schema der Auswertungsstrategie für Messungen unter Motorbedingungen. Der erste Schritt besteht in der Bestimmung des absorptionsfreien Detektorsignals ( $I_0$ ) um das gemessene Spannungssignal in eine Transmission zu überführen. Es folgt eine Korrelationsanalyse, welche einen vorläufigen Temperatur und Dichte-Verlauf liefert. Auf Basis der Daten wird über eine HITRAN-basierte Look-Up Tabelle die zugehörige Transmission im Referenzkanal berechnet und die aus dem gemessenen Signal herauskorrigiert. Das Methan-freie Referenzsignal wird anschließend benutzt um Störsignale in den beiden Kraftstoff-Kanälen korrigieren. Das Verfahren wird in 5 Iterationen wiederholt, sodass das Ergebnis konvergiert. Aus der erhaltenen Methan-Dichte und Temperatur wird anschließend die Methan-Konzentration bzw. der Lambda-Wert berechnet. Später kann in diesem Schritt eine Korrektur der Luftmenge durch eine Messung der Abgasrückführungsrate (AGR) erfolgen.

### Rapid Compression Machine (RCM)

Zur Validierung der Messtechnik für den Brennraum wurden zwei Ansätze verfolgt: (1) die Validierung am Motor im Rahmen einer Messkampagne bei Volkswagen und (2) die Validierung an einer Rapid Compression Machine (RCM). Letztere war im Projekt nicht vorgesehen und wurde initiiert um eine besser definierte und bekannte Ausgangslage bei

ähnlichen Umgebungsbedingungen wie am Motor zu generieren und somit eine bessere Bewertung der Messtechnik vornehmen zu können.

Eine RCM ist ein Einkolben-Einhubtriebwerk zur Nachbildung von Verdichtungs Vorgängen in Zylindern von Verbrennungsmotoren. Die RCM besitzt eine Messkammer, welche mit einem definierten Gasgemisch (hier Methan und Stickstoff) befüllt werden kann. Das Ausgangsvolumen wird anschließend innerhalb weniger Millisekunden komprimiert, analog zum Verdichtungstakt eines Motors. Anschließend wird das Gas abgepumpt und die Kammer

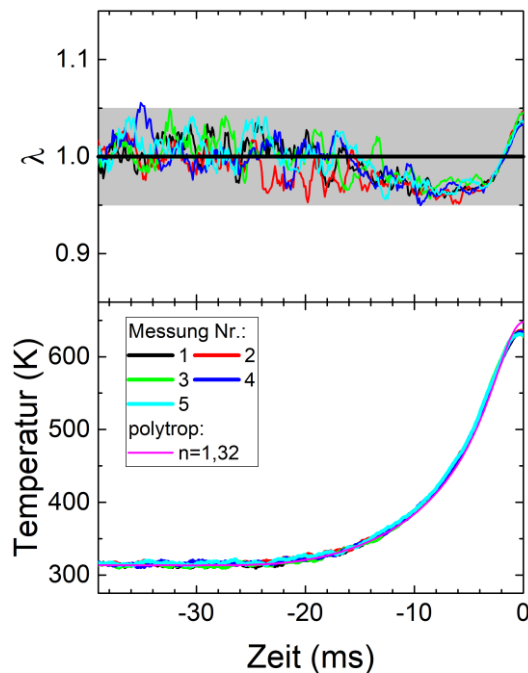


Abb. 12: Lambda-Wert und Temperatur für 5 einzelne Messungen in einer RCM aufgetragen gegen die Zeit während der Verdichtung. Der nominelle Lambda-Wert ist als schwarze Linien eingezeichnet und die angestrebte Messgenauigkeit als graue Fläche.

neu befüllt. Der Vorteil gegenüber einem Motor besteht zum einen in der Möglichkeit ein sehr genau definiertes Gasgemisch vorzulegen sowie im variablen Kompressionsverhältnis.

Abb. 12 zeigt die Ergebnisse von fünf einzelnen Messungen bei der Kompression eines  $\lambda=1$  analogen Gemisches von 9,51%  $\text{CH}_4/\text{N}_2$ . Die graue Fläche zeigt die im Projekt definierte Messgenauigkeit von  $\pm 5\%$  im Einzelzyklus. Die Daten zeigen, dass die angestrebte Messgenauigkeit erreicht wird. Im Bereich kleiner Drücke ist die Genauigkeit durch das Rauschen definiert. Ab ca. -20 ms sinkt das Rauschen durch die steigende Methan-Dichte (Kompression) und das Rauschen nimmt weiter ab. Gleichzeitig sinkt der gemessene Lambda-Wert um etwa 4% ab und steigt zum oberen Totpunkt wieder an. Es zeigt sich somit eine gewisse systematische Abweichung, welche sich jedoch innerhalb der Messgenauigkeit bewegt. Gleichzeitig zeigt die hohe Präzision von 1,5% im Mittel das Potenzial für Verbesserungen der Genauigkeit. Der validierte Messbereich erstreckt sich von 2,5-65 bar und 300-650 K.

### Motorbrennraum

Das letztliche Anwendungsgebiet und das Projektziel ist die Bestimmung des zeitlichen Verlaufs des Lambda-Wertes im Brennraum von Motoren. Zu diesem Zweck wurde die zuvor beschriebene Messkampagne bei Volkswagen zur Validierung der Messtechnik durchgeführt. Hierbei wurden zum einen Messungen mit Saugrohreindüsung von Methan vorgenommen, wie auch Messungen unter Verwendung einer Vormischstrecke zur Erzeugung eines homogenen Methan-Luft-Gemisches.

Abb. 13 zeigt Beispiele für die unterschiedlichen Messungen unter stöchiometrischen Bedingungen ( $\lambda=1$ ). In der Grafik links ist eine Messung bei geschlepptem Motorbetrieb gezeigt. Das heißt, das Experiment ist analog zu den RCM-Messungen. Ein homogenes Gemisch aus Methan und Luft wird angesaugt, komprimiert, expandiert und wieder ausgestoßen. Entsprechend ist ein analoger Verlauf in Temperatur und Lambda-Wert zu



beobachten. In der Kompressionsphase kommt es zu systematischen Abweichungen in Lambda gegenüber dem nominellen Wert von 7% im Mittel bei weiterhin hoher Präzision von etwa 1%.

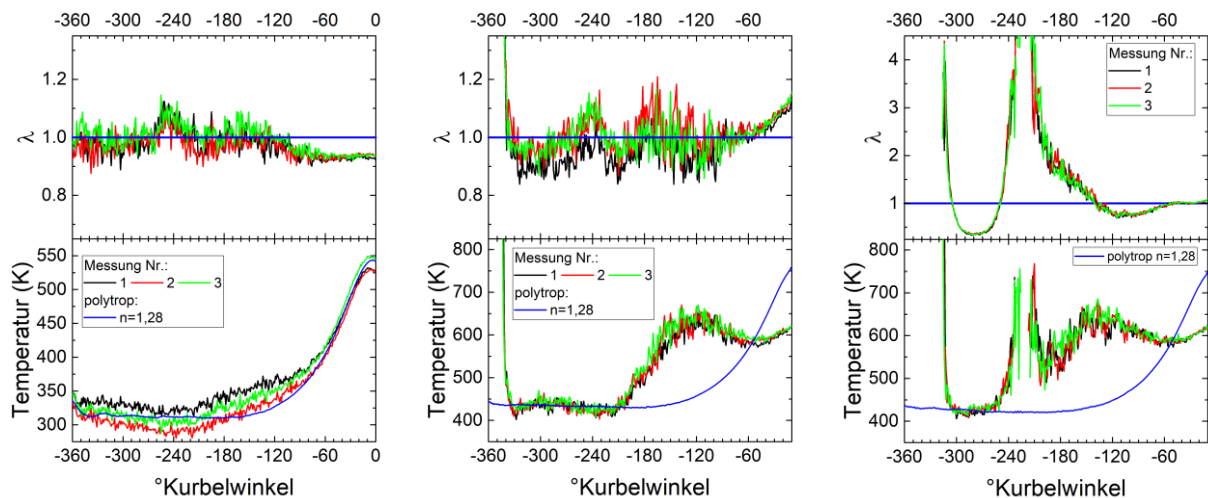


Abb. 13: Übersicht von Messergebnissen für Messungen am Motor. Links: Ansaugung und Kompression eines homogenen Gemisches aus Methan und Luft. Mitte: Ansaugung, Kompression und Verbrennung eines homogenen Methan-Luft-Gemisches. Rechts: Regulärer Motorbetrieb mit Methan-Eindüsung im Saugrohr.

Die mittlere Grafik in Abb. 13 zeigt Messung mit Ansaugung eines homogenen Methan-Luft-Gemisch im gefeuerten Betrieb. Kurz nach Öffnung der Einlassventile bei  $-331^\circ\text{KW}$  strömt das Kraftstoff-Luft-Gemisch durch das Messvolumen. Im Vergleich zu geschleppten Messung ist die Temperatur mit ca. 420 K (ca.  $150^\circ\text{C}$ ) deutlich erhöht. Der Grund hierfür liegt in einer Aufheizung des Spiegelkäfigs der Messsonde. Durch die Verbrennung erhitzt sich der Spiegelkäfig und heizt ebenfalls das durchströmende Gas auf. Kurz vor Schließung der Einlassventile bei  $-184^\circ\text{KW}$  steigt die Temperatur bis auf etwa 650 K an. Dieses Verhalten widerspricht den Erwartungen an eine polytrope Kompression, wie sie häufig als Modell für den globalen Temperaturverlauf in Verbrennungsmotoren angenommen wird. Der in den Messungen beobachtet Temperaturverlauf ist wieder auf die Aufheizung des Spiegelkäfigs zurückzuführen, wodurch die lokale Temperatur im Messvolumen von der globalen Temperatur abweicht. Der gefundene Temperaturverlauf zeigt, dass eine gleichzeitige Messung von Methandichte und Temperatur für die korrekte Quantifizierung essenziell ist. Dies ist eine Herausforderung, die bei Projektbeginn zunächst nicht abzusehen war, aber erfolgreich bewältigt wurde.

Der rechte Teil von Abb. 13 zeigt Messungen mit Methan-Eindüsung im Ansaugtrakt bei Einstellung eines globalen Lambda-Werts von 1 über die Lambda-Sonde im Abgastrakt. Die Daten zeigen klar den Ablauf der Gemischbildung sowie erneut den unerwarteten Temperaturverlauf analog zu den Messungen mit Vormischung. Die gemessene Temperatur ist zwar nicht repräsentativ für den gesamten Brennraum, für die korrekte Berechnung des lokalen Lambda-Werts im Detektionsvolumen wird allerdings diese lokale Temperatur benötigt. Für den Endanwender lassen die Messdaten Rückschlüsse auf die Gemischbildung zu, die zur Optimierung des Brennverfahrens genutzt werden können.

### *Messungen mit CNG*

CNG besteht zum Großteil (83-99 Vol-%) aus Methan. Weitere Bestandteile in variierenden Anteilen sind langkettige Kohlenwasserstoffe wie Ethan, Propan und Butan, sowie Stickstoff und Kohlenstoffdioxid. Es ist daher plausibel, dass die bisher vorgestellten Messungen sämtlich mit reinem Methan durchgeführt wurden, um definierte Bedingungen zur Validierung der Methodik zur Verfügung zu haben. Bei normalem Motorbetrieb wird jedoch standardmäßig Erdgas zum Einsatz kommen. Aufgrund des großen Anteils von Methan ist zu erwarten, dass sich das Messprinzip auf Erdgas übertragen lässt. Allerdings sind die spektroskopischen Eigenschaften von Erdgas gegenüber reinem Methan anders, sodass ohne Anpassung der Auswertestrategie Abweichungen in der Quantifizierung der Kraftstoffdichte zu erwarten sind.

Da die genaue Zusammensetzung des im Versuch verwendeten Erdgases unbekannt ist, wurden eine Kalibrationsstrategie anhand von Messungen am Motor entwickelt. Hierfür wurden Messungen in stöchiometrischem Betrieb mit Methan und Erdgas durchgeführt und miteinander verglichen. In Abb. 14 sind die gemessenen Lambda-Werte sowie die Temperatur vor und nach einem zusätzlichen Kalibrationsschritt gezeigt. Vor der Kalibration ist klar erkennbar, dass sich für Methan und Erdgas Unterschiede in den Ergebnisse für Lambda-Wert und Temperatur ergeben. Diese liegen in den spektroskopischen Unterschieden zwischen Methan und Erdgas begründet. Durch die spektroskopischen Unterschiede kommt es weiterhin in einigen Bereichen der Messung mit Erdgas zu einem Fehlschlagen der Korrelation der Signale beider Filter. In Abb. 14 ist das Fehlschlagen der Korrelation durch das Fehlen von Messpunkten sichtbar.

Zur korrekten Bestimmung der Kraftstoffkonzentration ist im Falle von Methan eine auf Druckzellenmessungen basierende Kalibration der Berechnungen notwendig. Diese korrigiert kleine Abweichungen zwischen Messungen und Berechnungen. An dieser Stelle setzt die Anpassung der Auswertung für Erdgas an. Durch eine Variation der Kalibration können die gemessenen Lambda-Werte und Temperaturen für Methan und Erdgas weitgehend zur Deckung gebracht werden, wie im rechten Teil von Abb. 14 dargestellt.

Beim Einsatz des Messsystems am Motor unter realen Bedingungen ist davon auszugehen, dass Methan als Kraftstoff nicht zur Verfügung steht. Daher beruht die angedachte Kalibration auf der Annahme einer korrekten Messung des Lambda-Wertes durch die Lambda-Sonde im Abgasstrang und dass der gemessene, globale Lambda-Wert kurz vor der Zündung erreicht wird. Aus dieser 1-Punkt-Kalibration ergibt sich bei Messung von Erdgas eine größere Messunsicherheit, als bei der Nutzung von reinem Methan. Prinzipiell ist das Messsystem also für die Anwendung auf Erdgas als Kraftstoff geeignet, erzielt die höchste Genauigkeit jedoch bei Benutzung von reinem Methan. Die Benutzung von Methan als Kraftstoff stellt dabei prinzipiell keine Hürde für den Einsatz der hier entwickelten Messtechnik dar. Die Messtechnik ist für die Nutzung an Motorprüfständen gedacht, welche üblicherweise über entsprechenden Vorbereitungen für den Anschluss von Gasen verfügen.

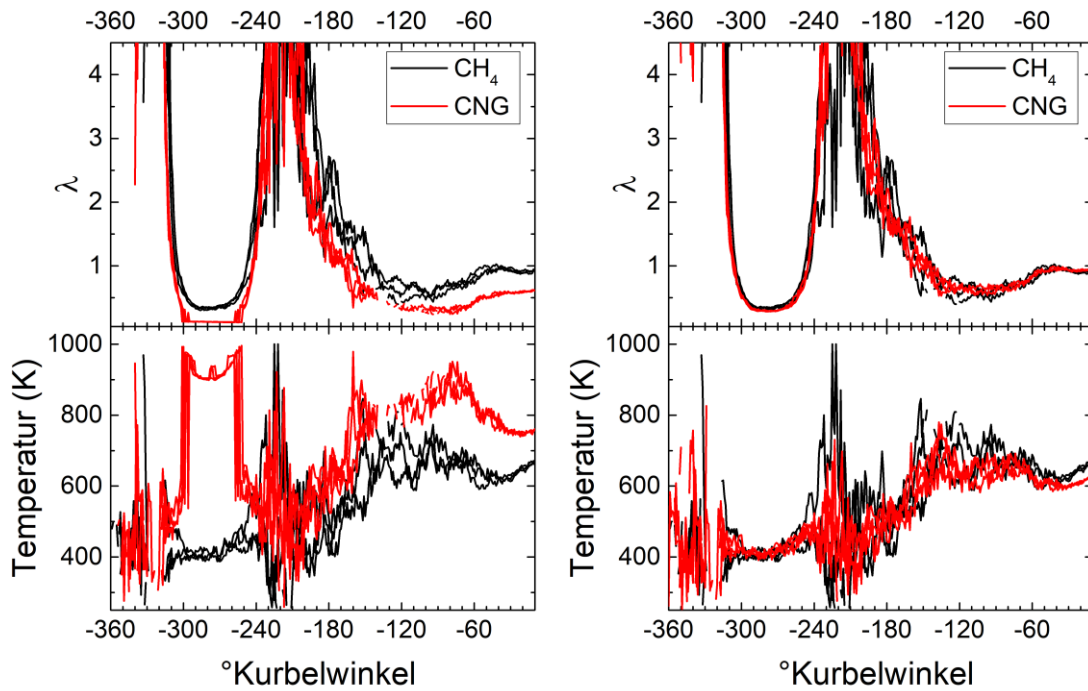


Abb. 14: Vergleich der gemessenen Lambda-Werte und Temperaturen bei der Nutzung von Methan und Erdgas. Links vor Anpassung der Kalibration, rechts mit angepasster Kalibration.

2.1.5. Abgleich der Ergebnisse mit den Projektzielen

Tabelle 1: Zusammenfassung der im Projektantrag definierten Ziele sowie deren Bewertung.

Kriterium	Zielspezifikation zum Meilenstein Prototyp 1. Generation	Zielspezifikation zum Projektabschluss Prototyp 2. Generation
Genauigkeit Sonde	Lambda = 0,05 absolut gemittelt Lambda = 0,1 Einzelzyklus	Lambda = 0,02 absolut gemittelt Lambda = 0,05 Einzelzyklus
Messgeschwindigkeit	30kHz (33µs) 1°KW bei 5000 U/min	30kHz (33µs) 1°KW bei 5000 U/min
Messbereich	25.000 bis 400.000 ppm (Lambda = 0,25 bis 4)	25.000 bis 400.000 ppm (Lambda = 0,25 bis 4)
direkte CO <sub>2</sub> Messung	optisch mit Kurbelwinkelauflösung	
Volllast im Brennraum (Projekt-Risikopunkt)	Risikopunkt: Reflexion im Brennraum ohne eingebauten Spiegel	Applizierung der Sonde im Brennraum ohne hereinragende Bauteile
Minimal-invasiv im Saugrohr	einbaubarer Reflektor vorhanden am Strömungskanal geprüft	minimalinvasiv, ohne hereinragende Bauteile
einfache Applizierbarkeit	Sonde: Saugkanal mit interner Reflexion	Sonde: Einsatz innerhalb von 30 Min. ohne weitere Kalibration
Validierung der Messtechnik	vorgetestet an Modellversuchsträgern	validiert am Versuchsträger des Industriepartners

Tabelle 1 zeigt die im Projektantrag definierten Ziele und grafisch dargestellt ob diese im Projekt erreicht wurden. Wie in den vorangegangenen Abschnitten dargestellt wurde das Messsystem an unterschiedlichen Versuchsträgern validiert, um Messgenauigkeit und Präzision zu bestimmen. Dabei stellte sich heraus, dass mit der Saugrohrsonde bei gemittelten Messungen eine Genauigkeit von 5% erreicht wird. Bei Einsatz der Zündkerzensonde ergibt

sich in Einzelzyklen an der RCM eine Genauigkeit von ebenfalls 5% während bei gemittelten Messungen am Motor 7% erreicht wurden. Damit liegen die gemittelten Messungen sowohl für Saugrohr- als auch Zündkerzensonde oberhalb der Spezifikationen. Allerdings haben alle Messungen gemein, dass die Präzision mit maximal 1,5% sehr hoch ist. Dies verdeutlicht, dass weiteres Optimierungspotenzial vorhanden ist, sodass die Ziele hinsichtlich der Genauigkeit als erfüllt angesehen werden können. Das Erreichen der Anforderungen hinsichtlich Messbereich und –geschwindigkeit wurde durch die Validierungsmessungen ebenfalls bestätigt. Dabei erfüllt das finale Messsystem die Anforderungen an eine einfache Applizierbarkeit sowie eine minimalinvasive Messung im Saugrohr.

Lediglich zwei Ziele, welche als Risikopunkte definiert waren, wurden nicht vollständig erreicht. Zum einen die direkte Messung von CO<sub>2</sub> bei 4,2 µm, welche durch technische Beschränkungen sowie die sehr starke Absorption in diesem Bereich limitiert ist. Zum anderen die Applizierung einer Sonde im Brennraum ohne hereinragende Bauteile. Hierbei erwies sich eine Bearbeitung der Kolbenoberfläche als nicht zielführend, sodass als Zwischenlösung die Nutzung einer line-of-sight-Sonde an einem optisch zugänglichen Motor bleibt.

Zusammengefasst konnten die Ziele des Projektes weitgehend erreicht werden, sodass dieses durch das LLG als Erfolg gewertet wird. Dieser Erfolg drückt sich in den wissenschaftlichen Veröffentlichungen (siehe 2.6) aus und darin, dass der Projektpartner LaVision GmbH Anstrengungen unternimmt, um bis Ende 2017 die ersten Demosysteme an Kunden auszuliefern.

## 2.2. Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Zuwendung des BMBF für das OMeGa-E Projekt, in Bezug auf das Teilprojekt „*Konzeption einer Messsonde zur quantitativen zeitaufgelösten Detektion von CNG im Motor mittels IR-Strahlung*“ bestand zu einem großen Teil aus Personalmitteln. Zusätzlich standen Mittel zur Verfügung, die Verbrauchsmaterialien, Verwaltungsausgaben, Dienstreisen und Investitionen eingesetzt wurden. Die Einzelheiten der verwendeten Mittel sind in den rechnerischen Nachweisen enthalten.

## 2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Erforschung und Entwicklung minimal-invasiver optischer Sondenmessverfahren und der Bau von Labormustern für die Entwicklung zukünftiger Brennverfahren ist eine risikobehaftete Aufgabe. Die Anforderungen an die Messverfahren sind sehr hoch und die Einsatzbedingungen extrem. Es müssen neue, innovative Technologien entwickelt werden, die einen erfolgreichen Einsatz im Brennraum ermöglichen. Einige technische Probleme zur Messung im Brennraum waren bereits in vorangegangenen Projekten erfolgreich gelöst worden, während die Neuentwicklung einer Messsonde für den Ansaugtrakt unerwartete Probleme hervorrief, insbesondere hinsichtlich Reflektivität und IR-Kompatibilität der erhältlichen Reflektoren. Zudem stellt die Anwendung einer bekannten Messtechnik auf eine neue Problemstellung, hier die Adaption auf einen völlig anderen Kraftstoff, ein Risiko dar. Es

war bereits vor Projektbeginn bekannt, dass sich die bis dahin verwendeten Auswertestrategien nicht direkt auf Erdgas bzw. Methan übertragen lassen. Im Projekt stellte insbesondere die Erfassung der Temperatur als wichtige Einflussgröße eine große Herausforderung dar. Der entwickelte Ansatz zur gleichzeitigen Messung von Temperatur und Kraftstoff-Dichte unter Ausnutzung der Spektroskopie war im Vorfeld nicht abzusehen.

Nur im Zusammenspiel erfahrener und hochspezialisierter Forschungsinstitute mit starken Industriepartnern konnte das Projekt erfolgreich sein. Keiner der Partner wäre in der Lage gewesen das Projekt ohne die Mitwirkung der anderen Partner durchzuführen. Insbesondere die Forschungsinstitutionen wie das LLG besitzen keine Mittel, solche Forschungsaufgaben aus ihrer Grundfinanzierung zu leisten. Die öffentliche Förderung dieses hoch innovativen Verbundforschungsvorhabens war daher wesentlich für den Erfolg.

#### 2.4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Das Laser-Laboratorium Göttingen e.V. kann dem Projektpartner LaVision zum Ende des Projektes eine detaillierte Messstrategie auf Basis physikalischer Modelle zur Verfügung stellen, die eine quantitative Gemischbildungsanalyse in Gasmotoren ermöglichen. Zudem wurden im Rahmen des Projektes weitere Erkenntnisse, wie der Temperaturverlauf im Messvolumen im gezündeten Betrieb, generiert, die zu einem besseren Verständnis der Messtechnik beitragen. Durch die Möglichkeit kalibrationsfreie, quantitative Messungen in Gasmotoren an Methan durchzuführen, wird das Sensorsystem für einen neuen Anwenderkreis interessant. Die Messergebnisse erlauben eine detaillierte Analyse der Gemischbildung mit hoher zeitlicher Auflösung und somit die Anpassung motorischer Parameter für ein optimales Brennverfahren.

Im Gegenzug wurde dem LLG ein funktionstüchtiges Sensor-System zur Verfügung gestellt, welches auch nach Projektende eingesetzt wird. Es kann für weitere Forschungsarbeiten und Auftragsmessungen eingesetzt werden. Zudem hat das LLG im Rahmen des Projektes eine flexible Laborsensorik entwickelt, welche eine schnelle Anpassung der Detektionskanäle an neue Aufgabenstellungen ermöglicht. So wird aktuell in einem ZIM-Kooperationsprojekt nach diesem Prinzip ein CO<sub>2</sub> und CO Sensor zur Überwachung von Abgaszusammensetzungen nach 1. Bundes-Immissionsschutzverordnung entwickelt.

Im Rahmen des OMeGa-E-Projektes konnte das LLG bereits wesentliche Forschungsergebnisse in referierten Fachzeitschriften und bei verschiedenen Tagungen veröffentlichen. Dies trägt zur Reputation des Instituts bei und ist für zukünftige Forschungsprojekte von Nutzen. Weitere Publikationen mit und ohne die Kooperationspartner sind geplant.

Insgesamt ist das Projekt aus Sicht des Laser-Laboratoriums als voller Erfolg zu werten. Es ist gelungen ein Messsystem zu entwickeln, welches den Anforderungen des Anwenderkreises entspricht. Dementsprechend erfolgt durch den Projektpartner LaVision eine Einbindung der Datenanalyse in vorhandene Software und ein Aufbau von Demosystemen zu Vermarktungszwecken.

## 2.5. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es sind keine Fortschritte auf diesem Gebiet bekannt. Der Sensor hat hinsichtlich der Zeitauflösung und der Fähigkeit Informationen von Einzelzyklen zu erfassen ein Alleinstellungsmerkmal.

## 2.6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

### Veröffentlichungen:

1. Stephan Bauke, Kai Golibrzuch, Hainer Wackerbarth, Olaf Thiele, Thomas Berg, *Time-Resolved Detection of CH<sub>4</sub> in Flows using IR Absorption*, 18. GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme **2016**. doi: 10.5162/sensoren2016/6.2.5.
2. Stephan Bauke, Kai Golibrzuch, Frank Rotter, Hainer Wackerbarth, Olaf Thiele, Thomas Berg; *Quantitative, Time-Resolved Detection of CH<sub>4</sub> Concentrations in Flows for Injection Analysis in CNG Engines using IR Absorption*, J. Sens. Sens. Syst. **2017**, 6, 185-198. doi:10.5194/jsss-6-185-2017
3. Kai Golibrzuch, Finn-Erik Digulla, Stephan Bauke, Hainer Wackerbarth, Olaf Thiele, Thomas Berg, *Optical Sensor System for Time-Resolved Quantification of Methane Densities in CNG-fueled Spark Ignition Engines*, Applied Optics **2017**, 56, 22, 6049-6058, doi:10.1364/AO.56.006049

### Vorträge:

4. S. Bauke, K. Golibrzuch, H. Wackerbarth, O. Thiele, T. Berg, *Quantitative, Time-Resolved Detection of CH<sub>4</sub> in Flows using IR Absorption*, 18. GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme, **2016**.
5. S. Bauke, K. Golibrzuch, H. Wackerbarth, O. Thiele, T. Berg, L. Beckmann, N. Hübner, J. Zachow: *Optical Measurement System for Quantitative, Time-Resolved Detection of CNG Mixture Formation in an SI Engine*; 11. Tagung Gasfahrzeuge, Potsdam, **2016**.
6. Kai Golibrzuch, *Optical Diagnostics for Combustion Analysis and Surface Kinetics*, 2nd International Forum on Metrology for Liquefied Natural Gas (LNG) & Alternative Fuels, **2016**.

### Abschlussarbeiten:

7. 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**.
8. Tim Malte Henrich, *Quantifizierung der CO<sub>2</sub>-Dichte im Motor mittels IR-Absorptionsmessungen bei 2.7  $\mu$ m und 4.2  $\mu$ m*, Masterarbeit, Hochschule für angewandte Wissenschaften und Kunst Göttingen, **2016**.
9. Stephan Bauke, *Konzeption einer Messsonde zur quantitativen zeitaufgelösten Detektion von CNG im Motor mittels IR-Strahlung*, Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen, **2017**.

### 3. Literatur

- [1] L. S. Rothman, I. E. Gordon, Y. Babikov, A. Barbe, D. C. Benner, P. F. Bernath, M. Birk, L. Bizzocchi, V. Boudon, L. R. Brown, and others, "The HITRAN2012 molecular spectroscopic database," *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, vol. 130, pp. 4–50, 2013.
- [2] C. Schulz, A. Dreizler, V. Ebert, and J. Wolfrum, "Combustion Diagnostics," in *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics*, Springer Nature, 2007, pp. 1241–1315.
- [3] C. Schulz and V. Sick, "Tracer-LIF diagnostics: quantitative measurement of fuel concentration, temperature and fuel/air ratio in practical combustion systems," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 31, no. 1, pp. 75–121, Jan. 2005.
- [4] M. Aldén, J. Bood, Z. Li, and M. Richter, "Visualization and understanding of combustion processes using spatially and temporally resolved laser diagnostic techniques," *Proc. Combust. Inst.*, vol. 33, no. 1, pp. 69–97, 2011.
- [5] C. Schulz, "Advanced laser imaging diagnostics in combustion," *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, vol. 219, no. 5/2005, pp. 509–554, 2005.
- [6] T. Berg, O. Thiele, S. Seefeldt, and R. Vanhaelst, "Measurement of in-cylinder mixture formation by optical indication," *MTZ worldwide*, vol. 74, no. 6, pp. 26–30, 2013.
- [7] E. Tomita, N. Kawahara, A. Nishiyama, and M. Shigenaga, "In situ measurement of hydrocarbon fuel concentration near a spark plug in an engine cylinder using the 3.392  $\mu\text{m}$  infrared laser absorption method: application to an actual engine," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 14, no. 8, p. 1357, 2003.
- [8] E. Tomita, N. Kawahara, M. Shigenaga, A. Nishiyama, and R. W. Dibble, "In situ measurement of hydrocarbon fuel concentration near a spark plug in an engine cylinder using the 3.392  $\mu\text{m}$  infrared laser absorption method: discussion of applicability with a homogeneous methane–air mixture," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 14, no. 8, pp. 1350–1356, Jul. 2003.
- [9] M. Koenig and M. J. Hall, "Measurements of local in-cylinder fuel concentration fluctuations in a firing SI engine," SAE Technical Paper, 1997.
- [10] A. Grosch, H. Wackerbarth, O. Thiele, T. Berg, and 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," *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, vol. 133, pp. 106–116, 2014.
- [11] A. Grosch, V. Beushausen, H. Wackerbarth, O. Thiele, and T. Berg, "Temperature- and pressure-dependent midinfrared absorption cross sections of gaseous hydrocarbons," *Appl. Opt.*, vol. 49, no. 2, pp. 196–203, 2010.
- [12] A. Grosch, V. Beushausen, H. Wackerbarth, O. Thiele, T. Berg, and R. Grzeszik, "Calibration of mid-infrared transmission measurements for hydrocarbon detection and propane concentration measurements in harsh environments by using a fiber optical sensor," *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, vol. 112, no. 6, pp. 994–1004, 2011.
- [13] A. Grosch, V. Beushausen, H. Wackerbarth, O. Thiele, and T. Berg, "Temperature- and pressure-dependent midinfrared absorption cross sections of gaseous hydrocarbons," *Applied Optics*, vol. 49, no. 2, p. 196, Jan. 2010.
- [14] M. J. Hall, P. Zuzek, and R. W. Anderson, "Fiber optic sensor for crank angle resolved measurements of burned gas residual fraction in the cylinder of an SI engine," SAE Technical Paper, 2001.
- [15] A. Grosch, V. Beushausen, O. Thiele, and R. Grzeszik, "Crank angle resolved determination of fuel concentration and air/fuel ratio in a SI-internal combustion engine using a modified optical spark plug," SAE Technical Paper, 2007.

- [16] A. Grosch, V. Beushausen, and 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," in *Advanced Microsystems for Automotive Applications 2008*, Springer, 2008, pp. 105–126.