

# Minimal-invasiver, fasergekoppelter, absorptionspektroskopischer Sensor für die motorische Gasanalyse im 2–3 $\mu\text{m}$ Bereich

Alexander Klein\*, Oliver Witzel\*, Volker Ebert\*\*\*

\* *Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig*

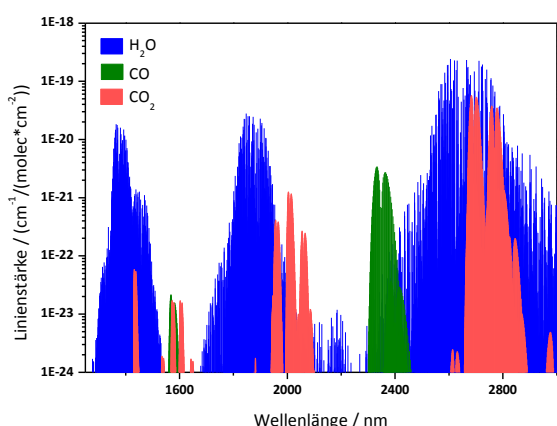
\*\* *Center of Smart Interfaces, Technische Universität Darmstadt, Petersenstr. 32, 64287 Darmstadt*

<mailto:volker.ebert@ptb.de>

Minimal-invasive fasergekoppelte Sensoren auf der Basis der Absorptionsspektroskopie bieten die Möglichkeit zuverlässig absolute Gaskonzentrationen diverser Spezies innermotorisch zu messen und liefern dadurch einen wichtigen Beitrag für die Optimierung moderner Verbrennungsmotoren und der Reduktion von Schadstoffen.

## 1 Einführung

Für die Optimierung und Analyse moderner Verbrennungsmotoren hinsichtlich Effizienz und Schadstoffausstoß werden Sensoren benötigt die eine verlässliche Quantifizierung der innermotorischen Gaskonzentrationen während des Verbrennungsprozesses ermöglichen. Hier bietet die Laserabsorptionsspektroskopie mittels durchstimmbaren Diodenlaser (TDLAS) großes Potential zur schnellen, probennahmefreien, selbst-kalibrierenden und berührungslosen Messung diverser verbrennungsrelevanter Gasspezies wie z.B.  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  oder  $\text{CO}$  sowie der Temperatur [1,2]. In dieser Arbeit wurde die  $\text{H}_2\text{O}$ -Detektion gewählt, da diese eine direkte Korrelation mit der Abgasrückführungsrate (AGR-Rate) ermöglicht [3].



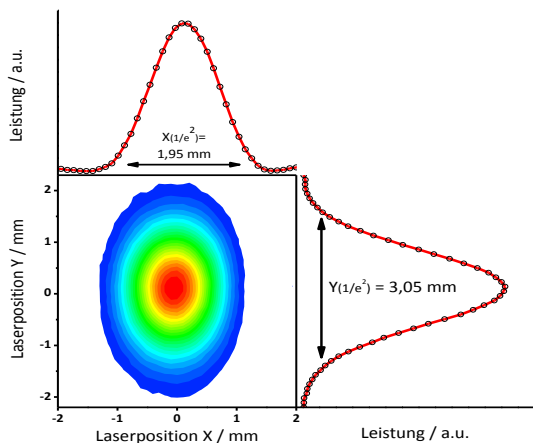
**Abb. 1:** Absorptionslinien von einigen relevanten Gasspezies in Verbrennungsprozessen.

Moderne Sensoreinheiten für die Verbrennungsanalytik benötigen immer kleinere Zugänge zum Brennraum ( $\varnothing < 15 \text{ mm}$ ), um die Verbrennung möglichst wenig zu beeinflussen. Für solche minimal-invasiven Anwen-

dungen sind komplett fasergekoppelte optische Sensoren auf Basis der TDLAS hoch interessant. Dabei muss der Sensor  $\text{H}_2\text{O}$ -Konzentrationen von 1–10 Vol.-% mit einer Auflösung von 0,1 Vol.-% im  $\mu\text{s}$ -Bereich detektieren können sowie möglichst verschmutzungs-resistent und unempfindlich gegen Vibrationen sein. Da für eine solche lokale Messung der Gaskonzentration nur wenige Millimeter Messstrecke zur Verfügung stehen, muss, um die nötige Empfindlichkeit für einen Wasserdampfsensor realisieren zu können, der Wellenlängenbereich um  $2,6 \mu\text{m}$  verwendet werden, wo starke  $\text{H}_2\text{O}$ -Absorptionslinien verfügbar sind (Abb. 1).

## 2 Sendeeinheit Faserkopplung

Problematisch ist jedoch, dass in diesem Wellenlängenbereich keine kommerziellen faseroptischen Komponenten und auch nur sehr wenige Single-Mode (SM) Fasertypen verfügbar sind. Dies erfordert die komplette Neuentwicklung sämtlicher faseroptischer Elemente. Für dieses  $2,6 \mu\text{m}$  Laserhygrometer mit minimal-invasivem Sensorkopf wurden daher asphärische Optiken aus Zinkselenid entworfen und hergestellt. Diese ermöglichen die optimierte Kollimation und Einkopplung der stark divergenten Diodenlaserstrahlung mit elliptischem Strahlprofil in eine Single-Mode (ZBLAN) Fluorid-Glasfaser mit einer Cut-off Wellenlänge von  $\lambda_c = 2 \mu\text{m}$  und einer numerischen Apertur  $NA = 0,17$ . Abb. 2 zeigt den kollimierten Strahl eines Distributed Feedback (DFB) Dioden Lasers bei  $\lambda = 2,55 \mu\text{m}$  mit einer Divergenz von  $0,014 \text{ mrad}$ . Deutlich zu erkennen ist das gaußförmige elliptische Strahlprofil des DFB Lasers. Dabei ist es eine Herausforderung



**Abb. 2:** Mit Pyro-Kamera gemessenes kollimiertes gaußförmiges Strahlprofil des DFB Lasers

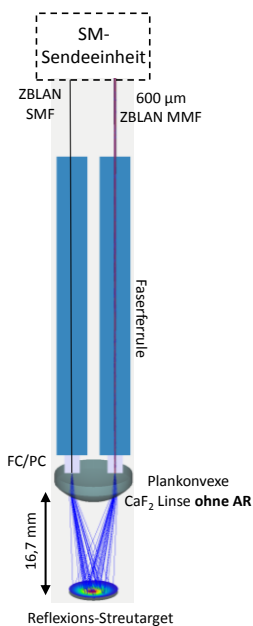
das elliptische Strahlprofil möglichst punktförmig auf das Faserende zu fokussieren, um eine hohe Koppeffizienz zu ermöglichen und gleichzeitig Rückreflexionen, welche durch Fabry-Perot Interferenzen die Sensitivität des Sensors verringern können, zu vermeiden. Hierbei konnte eine Koppeffizienz von 57 % erreicht werden.

### 3 Sensorkopfprototyp des Laserhygrometers

Damit das Laser- und Detektionssystem vom Motor entkoppelt ist, leitet die SM-Faser den Laserstrahl zum Sensorkopf, wo er durch den Brennraum geleitet wird und nach der Gasphasenabsorption mittels einer Multi-Mode (MM) Fluorid-Faser wieder erfasst und zum außenliegenden Detektor geleitet wird. Dies schließt zudem H<sub>2</sub>O-Absorption durch Umgebungsluft aus, welche das Messsignal empfindlich stören kann.

In dem in Abb. 3 gezeigten Prototyp fungiert eine CaF<sub>2</sub>-Linse als Transferoptik die den aus der SM-Faser austretenden Laserstrahl auf ein gekrümmtes Reflexion- bzw. Streuelement lenkt und gleichzeitig die zurückgeworfene Strahlung wieder auf die MM-Faser mit 600 µm Kerndurchmesser fokussiert.

**Abb. 3:** Aufbau und Simulation des Sensorkopf-Prototyps im Maßstab 2:1 (M24).



Der Sensor wurde mittels Ray-Tracing Software entworfen und auf möglichst hohe Sen-

sor-Transmission, Stabilität und Fertigungstoleranzen optimiert. Die Verschmutzung des Sensors wurde mittels Streuung simuliert. So bietet der Sensorkopf eine Transmission von bis zu 79 % bei Reflexion und 16 % bei vollständiger Lambertscher Streuung.

Für die Messung der Sensortransmission des Prototyps wurde eine grob polierte Aluminiumscheibe als Streuelement verwendet. Die ermittelte Transmission betrug 45 % was sehr gut mit der Simulation einer leicht streuenden Oberfläche übereinstimmt.

Bei spektroskopischen Messungen der Wasserdampfkonzentration zeigte sich der Sensorkopf des Laserhygrometers unempfindlich gegenüber Vibration und die absolute H<sub>2</sub>O-Konzentration konnte ohne vorherige Kalibration zuverlässig bestimmt werden. Dabei zeigte das Laserhygrometer eine Auflösung von bis zu 0,03 Vol.-% (300 ppm), wobei eine störende zusätzliche Absorption durch die Umgebungsluft zuverlässig durch die Faserkopplung verhindert wurde.

### 4 Ausblick

Zurzeit wird der Sensorkopf für die direkte lokale Messung der H<sub>2</sub>O-Konzentration in geheizten Verbrennungsmotoren mit µs-Auflösung auf einen kleineren Maßstab (M12) übertragen. Dabei wurde die CaF<sub>2</sub>-Linse durch eine Quarzglaslinse ersetzt, welche bessere Eigenschaften für die während der Verbrennung herrschenden Bedingungen aufweist. Weiterhin soll der TDLAS-Sensor auf diverse verbrennungsrelevante Gaskomponenten wie z. B. CO<sub>2</sub>, CO und O<sub>2</sub> erweitert werden.

### Literatur

- [1] V. Ebert und J. Wolfrum, „Absorption spectroscopy“, in *Optical Measurements- Techniques and Applications*, Springer Verlag, Heidelberg, München, 2001, S. 227–265
- [2] H. Teichert, T. Fernholz und V. Ebert, „Simultaneous In Situ Measurement of CO, H<sub>2</sub>O, and Gas Temperatures in a Full-Sized Coal-Fired Power Plant by Near-Infrared Diode Lasers“, *Appl. Opt.*, Bd. 42, Nr. 12, S. 2043–2051, 2003.
- [3] O. Witzel, A. Klein, S. Wagner, C. Meffert, C. Schulz und V. Ebert, „High-speed tunable diode laser absorption spectroscopy for sampling-free in-cylinder water vapor concentration measurements in an optical IC engine“, *Appl. Phys. B*, Bd. 109, Nr. 3, S. 521–532, 2012.