

# Minimal-invasive, fasergekoppelte Optode für die schnelle, lokale Gasanalyse im Infrarotbereich mittels Laserabsorptionsspektroskopie

Alexander Klein\*, 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 Optoden auf der Basis der Absorptionsspektroskopie wurden entwickelt. Diese bieten die Möglichkeit zuverlässig absolute Gaskonzentrationen diverser Spezies zu messen und liefern dadurch ein wichtiges Hilfsmittel für die diverse Anwendungen, wie die Prozessgas- und Atemanalyse sowie der Verbrennungsdiagnostik.

## 1 Einführung

Optische Methoden zur Bestimmung der Gaskonzentration finden ein breites Anwendungsgebiet von der Atem- und Prozessgasanalyse, über die Verbrennungsdiagnostik bis zum aufspüren und quantifizieren von klimarelevanten Gasen. Hier bietet die Laserabsorptionsspektroskopie mittels durchstimmbaren Diodenlaser (TDLAS) großes Potential zur schnellen, probenahmefreien, und selbst-kalibrierenden Messung diverser Gasspezies wie z.B. CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> oder CO sowie der Temperatur [1,2]. Besonders hervorzuheben ist hier die hohe Speziesselektivität, die es ermöglicht das zu detektierende Gas ohne Quereinfluss durch andere Spezies zu quantifizieren.

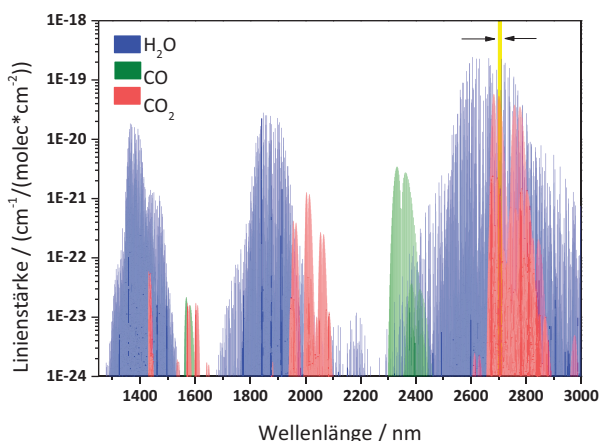


Abb. 1: Absorptionsspektrum von einigen wichtigen Gasspezies.

Auf Basis sorgfältig ausgewählter, starker Absorptionslinien im 2 – 3  $\mu\text{m}$  Bereich, lassen sich fasergekoppelte Optoden mit Absorptionslängen von nur 10 mm – 40 mm entwickeln (Abb. 1) [3]. Diese ermöglichen eine minimal-invasive in-situ Konzentrationsmes-

sung auch unter widrigen Bedingungen, wie hohen Temperaturen (250 – 1000 K) und hohen Drücken (0,5 – 15 bar) [4].

## 2 Linienauswahl und Sensoraufbau

In dieser Arbeit wurde die simultane H<sub>2</sub>O und CO<sub>2</sub> Detektion untersucht. Die entwickelte fasergekoppelte Optode besitzt eine Absorptionslänge von 35 mm und einem Durchmesser von 24 mm. Die Laserstrahlung wird mittels einer Singlemode-Fluorid-Faser und einer Transferoptik in die Prozessumgebung geleitet. Dort wird die Laserstrahlung an einem Target reflektiert bzw. gestreut. Die Transferoptik fokussiert das gestreute Licht auf eine Multimode-Fluorid-Faser, die das Licht weiter zum Detektor führt. Um bei solch kurzen Absorptionslängen ausreichende Sensitivität zu gewährleisten ist die Auswahl der Linien von besonderer Bedeutung. Zum einen müssen die Linienstärken, für eine gute Sensitivität, ausreichend groß sein. Zum anderen müssen

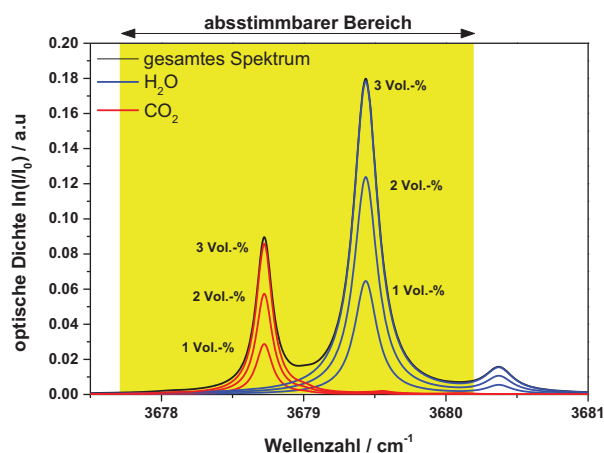
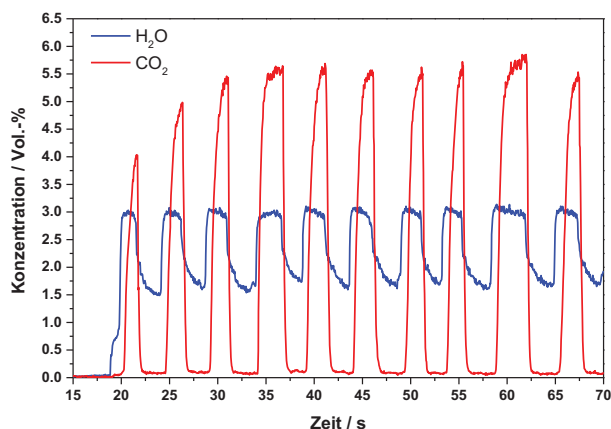


Abb. 2: Simuliertes Spektrum der ausgewählten Absorptionslinien im 2.71  $\mu\text{m}$  Bereich. In Gelb ist der Abstimmbereich des DFB-Diodenlasers dargestellt.

die H<sub>2</sub>O- und CO<sub>2</sub>-Linien nah genug beieinander liegen, um mit einem einzigen DFB-Diodenlaser (Nanoplus) abgetastet zu werden. Abb. 2 zeigt eine Simulation der ausgewählten Linien bei 2,71 µm für drei Konzentrationsbereiche, die eine simultane Quantifizierung der H<sub>2</sub>O- und CO<sub>2</sub>-Anteile ermöglicht.

### 3 Ergebnisse

Die entwickelte Optode wurde auf verschiedene Arten validiert. Hier dargestellt ist ein Test wie er beispielsweise bei der Atemanalyse (Kapnometrie) zum Einsatz kommt. Abb. 3 zeigt die Ergebnisse einer etwa 50 s Messung. Deutlich zu erkennen ist der Versatz im Anstieg der H<sub>2</sub>O- und CO<sub>2</sub>-Konzentrationen. Dieser ist darin begründet, dass die feuchte Atemluft bereits den Sensor erreicht bevor der mit CO<sub>2</sub> angereicherte Teil der Luft abgeatmet wird. Besonders hervorzuheben ist hier das im Gegensatz zu einem nichtdispersiven Infrarot-Sensors (NDIR-Sensor) die CO<sub>2</sub> Messergebnisse nicht durch den H<sub>2</sub>O Anteil gestört werden, da nur ein einziger Rotations-Vibrationsübergang des Moleküls abgetastet wird und in diesem Fall Wasserdampf simultan mit detektiert wird.



**Abb. 3:** Ergebnisse einer simultanen H<sub>2</sub>O- und CO<sub>2</sub>-Messung wie sie etwa bei der Kapnometrie nötig ist.

Dies ist ebenso ein wichtiger Punkt für die Prozessgas bzw. Verbrennungsdiagnostik, wo sich die einzelnen Gaskomponenten häufig gegenseitig beeinflussen. Die zeitliche Auflösung des Sensors lag bei 8 ms (kann aber bis in µs-Bereich gesteigert werden) Das Signal zu Rausch-Verhältnis betrug ca. 175. Bei einer Zeitauflösung von 1 s wurde eine Nachweisgrenze von 62 ppm für H<sub>2</sub>O und 21 ppm für CO<sub>2</sub> erreicht (1σ).

### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Die hier vorgestellte fasergekoppelte Optode bietet die Möglichkeit einer minimal-invasiven simultanen Konzentrationsbestimmung von Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid innerhalb der Prozessumgebung. Um eine gute Sensitivität des Sensors mittels Laserabsorptionsspektroskopie zu bieten muss im Wellenlängenbereich um 2 – 3 µm gearbeitet werden wo starke Absorptionslinien vorhanden sind. Der entwickelte Sensor bietet eine Detektionsgrenze von 1 ppm (CO<sub>2</sub>) bei hoher Zeitauflösung und einer Absorptionslänge von 35 mm.

Zukünftige Arbeiten bestehen im Einsatz der fasergekoppelten Optode in industriellen Prozessanwendungen bzw. im Einsatz für die innermotorische Gasanalyse. Desweiteren wird der Einsatz von unterschiedlichen Spektroskopischen Techniken (Wellenlängenmodulationsspektroskopie) für die weitere Verbesserung der gasspezifischen Nachweisgrenze untersucht.

### 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] A. Klein, O. Witzel, V. Ebert, Entwicklung eines minimal-invasiven Laserabsorptionssensors für die innermotorische Gasanalyse im 2-3 µm Bereich, VDI Berichte 2161 (2013) 495–503
- [4] 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.