

Kompakte, direkt fasergekoppelte Multipass-Zellen für spektroskopische Anwendungen im NIR- und MIR-Bereich

B. Kühnreich^{***}, A. Klein^{*}, M. Höh^{**}, B. Buchholz^{***}, V. Ebert^{***}

^{*} Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

^{**} Center of Smart Interfaces, Technische Universität Darmstadt, Petersenstr. 32, 64287 Darmstadt

<mailto:volker.ebert@ptb.de>

In TDLAS (*tunable diode laser absorption spectroscopy*) basierten Instrumenten führen ungewollte Absorptionen vor und nach dem Messvolumen zu großen systematischen Fehlweisungen. Wir diskutieren hier Design, Simulation und Aufbau verschiedener, sehr kompakter fasergekoppelter Multipass-Zellen für den NIR und MIR Bereich.

1 Motivation

In Forschung und Industrie werden zunehmend Lasermesstechniken zur allgemeinen Prozessüberwachung und zu Konzentrationsbestimmungen von Spurengasen oder Temperaturmessungen eingesetzt. Für diese Anwendungen sind häufig kompakte und sehr robuste Messzellen erforderlich, die auf kleinstem Raum eine maximale Absorptionsstrecke ermöglichen und dennoch robust gegen Vibrationen sowie hohe Temperaturen oder Drücke sind. Eine geeignete Messtechnik für diese Bedingungen ist die TDLAS, *tunable diode laser absorption spectroscopy*, die absolute Konzentrations- und Temperaturmessungen mit einer Zeitauflösung $\Delta t \ll 1$ s ermöglicht [1]. Erfolgreich angewendet wurden TDLAS basierende Spektrometer bereits in Kohlekraftwerken [2], in Ballonsonden und in Flugzeuginstrumenten [3].

2 Parasitäre Absorption

TDLAS ist eine *line of sight* Messmethode und liefert daher die integrierte Absorption entlang des gesamten Pfades. Je nach Messaufbau kann dies zu ungewollter Absorption innerhalb des Systems Laser-Transferoptik-Messzelle-Detektor und damit zu systematischen Abweichungen (Abb. 1) führen, die nur schwer zu korrigieren sind. Zur Vermeidung bzw. Minimierung dieser ungewollten parasitären Absorptionstrecken haben wir die hier vorgestellte faser-optisch gekoppelte Messzelle entwickelt. Die Faserkopplung ermöglicht es hierbei, die Strecken zwischen Laser und Messvolumen verlustfrei zu überbrücken, ohne dass die Gefahr von parasitärer Absorption besteht.

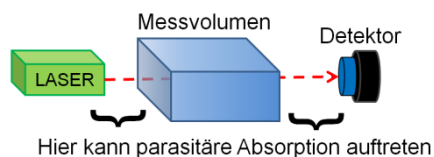


Abb. 1 Erläuterung: Parasitäre Absorption

3 Fasergekoppelte Multipass-Zelle

Das hier verwendete Design einer White-Zelle ermöglicht die direkte Kopplung des Laserlichts in die Absorptionszelle ohne zusätzliche Freistrahloptik. Von Vorteil ist hierbei die Eigenschaft von White-Zellen, dass sie auf die divergente Strahlgeometrie der Faser angepasst werden können und damit eine besonders robuste Kopplung erlauben. Das Zellendesign besteht aus drei sphärischen Spiegeln, deren Krümmungsradius auf den Öffnungswinkel des aus der Faser tretenden Strahlkegels abgestimmt ist. Für eine Standard-Single-Mode Faser vom Typ SMF-28 mit einer numerischen Apertur von 0.14 und einem Transmissionsbereich für den Singlemode-Betrieb im *nahen Infrarot* (NIR, 1 - 1.7 μm) ergibt sich somit bei 50 % Ausleuchtung ein idealer Spiegelradius von 75 mm.

$$NA_{SMF28} = 0.14 = \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \leq \tan\left(\frac{r_{\text{mirror}}}{f_{\text{mirror}}}\right) \quad (1)$$

Die gesamte Absorptionszelle besitzt ein Volumen von 330 cm³ bei Außenmaßen von 12 x 8 x 5 cm. Die Absorptionsstrecken der Zelle sind zwischen 15 und 150 cm variabel. Ein Vergleich zwischen der optischen Simulation mittels ZEMAX (Abb. 2) und einer Messung der Absorptionsstrecke mittels eines Referenzgases zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit der Simulation. Restabweichungen von 1.4 % sind auf Justage- und Fertigungstoleranzen zurückzuführen.

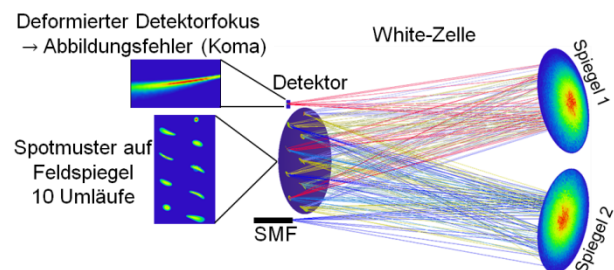


Abb. 2 ZEMAX-Simulation der White-Zelle

4 Multimode-Kopplung

In frühen Versionen der vorgestellten Mess-Zellen befand sich der Detektor innerhalb der Absorptionzelle. Dies reduziert zwar Strecken, auf denen eine parasitäre Absorption möglich ist, hat allerdings auch erhebliche Nachteile für die Einsatzbereiche der Zelle. In dieser Konstellation ist die Zelle zum einen nicht in korrosiver oder Hochdruck-/Hochtemperatur-Umgebung einsetzbar. Zum anderen kann das Fenster des Detektors als optisches Element Interferenzen auf dem Mess-Signal erzeugen und so die Nachweisgrenze verringern. Diese Nachteile werden nun durch eine neue faser-optische Signalauskopplung behoben. Die für die Auskopplung verwendete Multimode-Faser besitzt einen Kerndurchmesser von 1000 μm und eine numerische Apertur (NA) von 0.48. Das Licht wird an der ursprünglichen Position des Detektors in die Multi-Mode-Faser gekoppelt und verlustfrei bis zum Detektor geleitet. Auf diese Weise kann der Detektor in einer geschützten Umgebung betrieben werden. Die Einkopplung des Lichtes in die MM-Faser wird durch die NA der MM-Faser erleichtert. Sie ist deutlich größer als die NA der verwendeten SM-Faser auf der Eingangsseite. Dies führt zu einer Koppeffizienz von 45 % der Signalstärke bei direkter Bestrahlung des Detektors, ohne dabei das optische Rauschen der Messzelle signifikant zu vergrößern. Der direkte Vergleich von SM_{NIR}-Detektor- und SM_{NIR}-MM_{NIR}-Kopplung zeigt, dass die MM_{NIR}- keine Nachteile in der Performance erzeugt die normierte Nachweisgrenze liegt sowohl für die direkte Detektor-Kopplung und MM_{NIR}-Kopplung bei 3.3 ppm·m.

5 MIR-Faserkopplung

Standard-Telekommunikationsglasfasern transmittieren Licht im NIR, was die adressierbaren Moleküle und die Auswahl an Spektrallinien limitiert. Durch einen Wechsel in das *mittlere Infrarot* (MIR) wird eine Steigerung der Nachweisgrenzen für viele Molekülspezies erreicht. So ist z.B. die CO₂ – Linie bei 2.8 μm ca. 3000-mal stärker als die Linien bei 1.6 μm . Die Verwendung einer ZBLAN-Singlemode Fluorid-Faser zur Faserkopplung (ZrF₄-BaF₂-LaF₃-AlF₃-NaF) ermöglicht diesen Übergang. Bei einer ähnlichen NA, wie die SMF-28 Fasern, besitzen die ZBLAN-Fasern eine Transmission von 0.4 bis 4 μm . Für die Kopplung des Lasermodules an die Faser wurde eine eigens entwickelte ZnSe-Asphäre verwendet. Erste Testmessungen wurden mit CO₂ bei 2 μm durchgeführt. Dabei wurde eine Nachweisgrenze von 25 ppm erzielt.

6 Zusammenfassung

Basierend auf dem Design einer White-Zelle wurden zwei Varianten einer kompakten, fasergekoppelte Multipass-Zelle entwickelt. Eine vollständig

fasergekoppelte Messzelle mit Licht-Einkopplung mittels SM_{NIR}-Faser und Auskopplung über eine MM_{NIR}-Faser vermeidet parasitäre Absorption und ist für den Einsatz in rauer Umgebung geeignet. Eine zweite Variante der Zelle, deren Signaleinkopplung über eine ZBLAN-MIR-SM-Faser realisiert ist, wurde zusätzlich vorgestellt. Die Transmission der Fasern von 400-4000 nm ermöglicht die Adressierung von starken Absorptionsbanden vieler verschiedener molekularer Spezies zum Beispiel CO₂, H₂O, N₂O oder CH₄. Beispielhaft wurden Konzentrationsmessungen von Wasser und CO₂ gezeigt, deren Nachweisgrenzen bei 3 ppm·m für H₂O und 37 ppm·m für CO₂ liegen.

In Zukunft sollen sowohl für die NIR, als auch für die MIR-Faserkopplung die Streulicht-Interferenzen reduziert werden. Des Weiteren steht die Übertragung der MM-Auskopplung vom NIR in den MIR-Bereich noch aus.

Literatur

- [1] O. Witzel et al., "High-speed tunable diode laser absorption spectroscopy for sampling-free in-cylinder water vapor concentration measurements in an optical IC engine", in *Applied Physics B* 109,521-532 (2012).
- [2] V. Ebert, et al "Diodenlaserbasierte, probennahmefreie Multikomponenten-Gasanalyse in einem 1000 MW th – Gaskraftwerk" in *tm - Technisches Messen*, vol. 68, no. 9, p. 406, (2001)
- [3] B. Buchholz, et al "Validation of an extractive, airborne, compact TDL spectrometer for atmospheric humidity sensing by blind intercomparison" in *Applied Physics B*, (2012)