

Eine neue, fasergekoppelte offene White-Zelle für die „open-path“-Gasanalyse auf Forschungsflugzeugen

B. Buchholz* **, A. Afchine***, A. Klein*, J. Barthel***, T. Klostermann***, S. Kallweit*, M. Krämer***, C. Schiller***, V. Ebert* **

* *Physikalisch Technische Bundesanstalt Braunschweig, Germany*

** *Center of Smart Interfaces, Technische Universität Darmstadt, Germany*

*** *Forschungszentrum Jülich, IEK-7, 52425, Jülich, Germany*

[mailto: volker.ebert@ptb.de](mailto:volker.ebert@ptb.de)

Für die direkte Gasanalyse auf der Außenhaut von Forschungsflugzeugen wurde eine fasergekoppelte, freidurchströmte, auf dem TDLAS-Prinzip basierende Messzelle entwickelt. Für Wasserdampfmessungen eingesetzt, können durch parallele Messungen auf zwei Wellenlängen die H₂O Konzentrationen von der Troposphäre bis in die Stratosphäre erfasst werden.

1 Motivation

Bei chemischen Analysatoren auf der Basis optischer Absorptionsmessungen ergibt sich - insbesondere bei mitunter sehr rauen Umgebungsbedingungen, wie z.B. bei der Messung auf der Außenhaut eines Flugzeuges - die Problematik, dass die optische Messstelle von der Lichtquelle räumlich getrennt werden muss, um Störeinflüsse auf diese zu minimieren, Platzrestriktionen zu umgehen, Gefahrenbereiche zu meiden und eine Gasanalyse ohne Probennahme zu ermöglichen. Bei spektroskopischen Messungen, bspw. mit Diodenlasern, kann das Licht in single-mode-Fasern eingekoppelt und mittels dieser bis zur Messstelle geführt werden, so dass bei geeigneter Wahl von Faserkomponenten und Messmethode, im Konkreten dem TDLAS-Prinzip (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy) [1], der Einfluss des Abstandes zwischen Messzelle und eigentlichem Instrument minimiert oder im Idealfall vernachlässigt werden kann. In der Vergangenheit wurden von uns verschiedene, eher einfache optische Messzellen erfolgreich fasergekoppelt, wie z.B. [2] [3].

2 Wissenschaftliche Zielsetzung

Präzise Feuchtemessungen in der Atmosphäre sind für viele Klimamodelle die wichtigsten Eingangsgrößen, sei es, weil Wasserdampf selbst das in Summe stärkste Treibhausgas ist, Messwerte anderer Gasanalysegeräte auf den Feuchtigkeitsgehalt der Luft korrigiert werden müssen, oder auch, weil Wasser als Tracer-Gas in die Modellierungen Eingang findet. Da Wasserdampf in der Atmosphäre über einen sehr großen Konzentrationsbereich von 1 – 30000 ppmv vorkommt, müssen die Hygrometer einen sehr großen Messbereich, kombiniert mit einem großen Dynamikbe-

reich, abdecken; denn vor allem beim Durchfliegen von Wolken können Gradienten von mehreren 1000 ppmv/s vorkommen. Erschwerend stellt das Benetzungsverhalten von Wasser die typischerweise auf Forschungsflugzeugen durchgeführten Probennahmen mittels Einlasssystemen vor große Herausforderungen – insbesondere bei sehr niedrigen Wasserdampfkonzentrationen in der Stratosphäre (einstellige ppmv), die von hohem wissenschaftlichen Interesse sind [4].

3 Technische Anforderungen an die Zelle

Für die hochspezifische Wasserdampfmessung auf dem neuen deutschen Forschungsflugzeug HALO (High Altitude and Long Range Research Aircraft, www.halo.dlr.de) wurde ein neues Konzept einer direkt fasergekoppelten, zwei Wellenlängen-White-Zelle auf die spezifischen Bedingungen von HALO übertragen. Diese „offene Pfad“-Zelle wird direkt auf der Außenhaut des Flugzeuges in den Standardöffnungen des Rumpfes installiert. Ziel ist dabei, trotz einer bis zu 900 km/h schnellen Durchströmung des offenen, frei liegenden Lichtpfades, Gastemperaturen von -70°C bis +50°C und eines Außendrucks von 100-1000 hPa die absolute Bestimmung des Wasserdampfgehaltes der Luft (1 bis 30000 ppmv) mit hoher Zeitauflösung zu ermöglichen. Neben den für die spätere Messung nötigen optischen Anforderungen mussten in einer komplexen Nachweisführung sämtliche luftfahrttechnischen Zulassungsvoraussetzungen erfüllt werden, um sicherzustellen, dass die Betriebssicherheit während des Fluges zu jeder Zeit gewährleistet ist. Wie bei allen äußeren Anbauten an Flugzeugen mussten z.B. neben Stabilitäts-, Verbiegungs- und Schwingungsnachweisen auch Sicherheitsbetrachtungen durchgeführt und Maßnahmen gegen mechanische Belastung, wie z.B. Vogelschlag, dargelegt bzw. entwickelt werden.

4 Die offene Pfadzelle

Die offene Pfadzelle baut in der mechanischen Grundkonstruktion auf zwei parallelen, 27 cm hohen Grundkörpern (Pylonen) zugelassener Einlasssysteme auf. Die Doppelspiegel der White-Zelle sind in einem der Pylonen eingebaut und können mittels Festkörpergelenken in zwei Dimensionen zur Justierung verstellt werden. Der andere Pylon beinhaltet den Feldspiegel der White-Zelle mit den direkt angrenzenden Detektoren und Faserausgängen. Das Besondere an dieser White-Zelle ist der simultane Einsatz zweier optischer Wellenlängen (1.4 μm für hohe und 2.6 μm für niedrige Wasserkonzentrationen), die räumlich getrennt mittels zweier single-mode-Lichtwellenleiter in die gemeinsame Zelle eingekoppelt werden. Durch die direkte Einkopplung des Lichtes, ohne weitere Transferoptiken, können parasitäre Absorptionsstrecken, also Bereiche, in denen das Licht von der Umgebungsatmosphäre absorbiert wird, die sich jedoch nicht im eigentlichen Messbereich befinden, wirkungsvoll unterdrückt werden. Der Abstand der Spiegel beträgt 15 cm, wodurch für jeden Lichtpfad eine Absorptionsstrecke von 4.2 m erreicht wird.

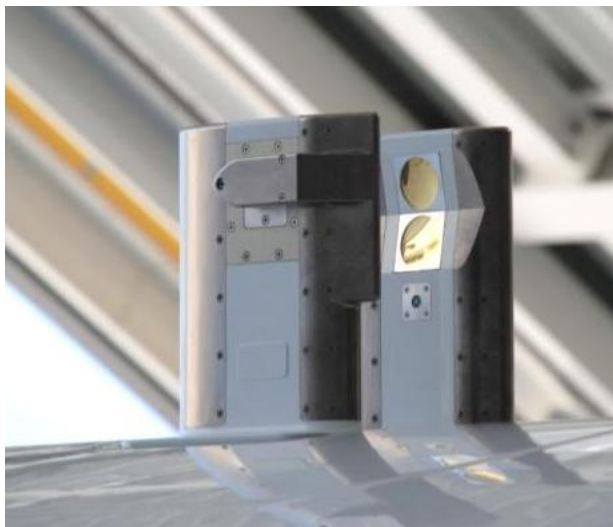


Abbildung (1): Offene Pfadzelle in der Seitenansicht: Die Luft durchströmt die Zelle von links, sichtbar auf dem hinten liegenden Pylon sind die Doppelspiegel der White-Zelle mit einem Spiegelabstand von 15 cm, einer optischen Pfadlänge von 4.2 m und einer Pylonhöhe über dem Flugzeugrumpf von 27 cm.

5 Feldeinsatz

Die Außenzelle wird an die Haupteinheit des HAI (Hygrometer for Atmospheric Investigations)-Instruments angeschlossen, wodurch sich die Diodenlaser, im Gegensatz zum direkten Einbau in der Außen-Zelle, in der temperierten und bedruckten Kabine des Flugzeuges befinden und damit wesentlich stabiler und einfacher betrieben werden können. Durch eine spezielle Variante der TDLAS-Spektroskopie [1] können die Messdaten kalibrie-

rungsfrei ausgewertet werden. Die Zelle wurde erstmalig im Oktober 2012 auf einem Forschungsflugzeug erfolgreich während einer über 100 Flugstunden dauernden Kampagne (TACTS, ESMval) eingesetzt, was für die Zelle über 100.000 Flugkilometer bedeutete. Die Auswertung der Daten läuft aktuell, erste Messdaten sehen sehr vielversprechend aus.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellte Messzelle eignet sich für den direkten Anbau auf die Außenhaut von Forschungsflugzeugen. Mit ihren beiden komplett fasergekoppelten Absorptionspfaden (4.2 m) können durch die Verwendung zweier Diodenlaser Feuchtemessungen in der gesamten Troposphäre durchgeführt werden. Durch die Kombination mit einem extraktiven, in Flugrichtung ausgerichteten Einlasssystem lassen sich künftig die im Labor bereits erfolgreich gezeigten Multiphasenmessungen [5] (Eis-Phase, Wasserdampfphase) nun auch direkt in der Atmosphäre durchführen. Die Auswertung mittels einer speziellen Variante der TDLAS-Spektroskopie, die bereits in mehreren Laborvergleichen ihre Eignung unter Beweis stellte, wie z.B. [6] [7], liefert zusätzlich zum Verzicht auf die Probenahme kalibrierungsfreie, präzise Messwerte.

7 Referenzen

- [1] V. Ebert and J. Wolfrum, "Absorption spectroscopy," in *OPTICAL MEASUREMENTS-Techniques and Applications*, ed. F. Mayinger, Springer, 1994, pp. 273–312.
- [2] S. Hunsmann, S. Wagner, and V. Ebert, "Kalibrationsfreies, fasergekoppeltes 1.6 μm Mehrkanal-Laserabsorptionsspektrometer für absolute CH₄-Messungen mit extremem Dynamikumfang," in *6. Konferenz über Optische Analysenmesstechnik in Industrie und Umwelt*, 2008, pp. 1–4.
- [3] V. Ebert, H. Teichert, C. Giesemann, H. Saathoff, and U. Schurath, "Fasergekoppeltes In-situ-Laserspektrometer für den selektiven Nachweis von Wasserdampfpuren bis in den ppb-Bereich," *tm - Technisches Messen*, vol. 72, no. 1, pp. 23–30, Jan. 2005.
- [4] T. Peter, C. Marcolli, P. Spichtinger, and T. Corti, "When dry air is too humid," *Science*, vol. 314, no. December, 2006.
- [5] B. J. Murray, T. W. Wilson, S. Dobbie, Z. Cui, S. M. R. K. Al-Jumur, O. Möhler, M. Schnaiter, R. Wagner, S. Benz, M. Niemand, H. Saathoff, V. Ebert, S. Wagner, and B. Kärcher, "Heterogeneous nucleation of ice particles on glassy aerosols under cirrus conditions," *Nature Geoscience*, vol. 3, no. 4, pp. 233–237, Mar. 2010.
- [6] B. Buchholz, B. Kühnreich, H. G. J. Smit, and V. Ebert, "Validation of an extractive, airborne, compact TDL spectrometer for atmospheric humidity sensing by blind intercomparison," *Applied Physics B*, vol. 110, no. 2, pp. 249–262, 2013.
- [7] D. Fahey and R. Gao, "Summary of the AquaVIT Water Vapor Intercomparison: Static Experiments," source: <https://aquavit.icg.kfa-juelich.de/WhitePape>, no. October, 2009.