

Härtetest in den Wolken

Ein kompakter optischer Frequenzkamm lässt sich an Bord eines Flugzeugs betreiben und ermöglicht es, die Treibhausgas-Konzentration in der Atmosphäre genauer zu messen.

Thorsten Naeser und Benjamin Sprenger

Flug über den Vulkan Ätna in Sizilien während einer Messkampagne

Mit dem SmartComb ist erstmals ein Frequenzkamm der Firma Menlo Systems in einem Flugzeug zur Klimabeobachtung zum Einsatz gekommen. Die Technik unterstützte das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt bei der CoMet-Mission zur Erfassung von Treibhausgasen über Europa. Der Frequenzkamm trug dazu bei, die LIDAR-Messungen zu kalibrieren. Dies nährt die Hoffnung, einfacher Daten zum Klimawandel gewinnen zu können.

Unsere Klimasystem droht zu kippen: Massenweise werden Treibhausgase wie Kohlendioxid (CO_2) und Methan (CH_4) in die Atmosphäre gepustet. Sie erwärmen die Erde – mit drastischen Folgen für das Ökosystem. Die Erwärmung durch Treibhausgase verrät sich aber erst nach langer Zeit. Weltweit arbeiten Klimaforscher daran, die verantwortlichen Prozesse zu quantifizieren. Bislang gibt es allerdings nur wenig direkte Messungen. Verlässliche Messsysteme sind die Basis, um die Konzentration und Auswirkung von Treibhausgasen zu



Der SmartComb (rechts) lässt sich mit anderen Messinstrumenten im HALO-Flugzeug des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt unterbringen.

erforschen. Hier wird die Lasertechnologie zu einem immer wertvolleren Werkzeug.

Um präzise Daten über die Emission von Treibhausgasen in die Atmosphäre über Europa zu erhalten, hat das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) mit Unterstützung der Firma Menlo Systems 2018 die Mission CoMet (Carbon Dioxide and Methan Mission) durchgeführt. Ziel war es, mit der LIDAR-Technik direkt aus dem Flugzeug die lokale Konzentration von Kohlendioxid und Methan

in der Atmosphäre mit bislang unerreichter Genauigkeit zu bestimmen. Dazu haben die DLR-Ingenieure ihr LIDAR-Lasersystem CHARM-F mit dem optischen Frequenzkamm SmartComb von Menlo Systems kombiniert. Die Frequenzkamm-Technik erlaubt es, hochpräzise die Frequenzen elektromagnetischer Strahlung zu bestimmen. Für die Erfindung erhielten Theodor Hänsch und John Hall 2005 den Physik-Nobelpreis. Hänsch ist auch Mitbegründer von Menlo Systems. Der SmartComb ist eine Wei-

terentwicklung des Frequenzkamms. Das Gerät ist kompakt und lässt sich ohne spezielles Fachwissen an andere Lasersysteme anschließen. Laserlicht dringt nicht nach außen, sodass keine besonderen Schutzmaßnahmen erforderlich sind. Das System ist für die unterschiedlichsten Wellenlängen im sichtbaren und infraroten Wellenlängenbereich verfügbar.

Das mit dem SmartComb-Frequenzkamm verbundene LIDAR-System CHARM-F nutzt die Eigenschaft chemischer Verbindungen, Licht bestimmter Wellenlängen zu absorbieren. Dabei kommt die differentielle Absorptionsspektroskopie zur Anwendung, bei der zwei Laserpulse unterschiedlicher Wellenlänge ausgesandt werden. Eine Wellenlänge wird von einem spezifischen Treibhausgas absorbiert, die zweite nicht. Die Absorptionskoeffizienten der Treibhausgase sind aus Laborexperimenten bekannt. Beide Lichtpulse treffen während der Messung den Erdboden und werden gestreut. Ein kleiner Teil des Lichts kehrt zum System zurück, wo es von einem empfindlichen Sensor detektiert wird. Aus dem Verhältnis des zum System zurückgestreuten Lichts beider Laserpulse leitet sich die Konzentration der Treibhausgase ab. Wenn also Methan oder CO₂ vorhanden ist, wird mehr Licht absorbiert und das Verhältnis ist größer. Wenn keine Treibhausgase präsent sind, wird gleichviel zurück gestreut. Dabei sind jeweils zwei unabhängige Messungen notwendig, denn Methan und Kohlendioxid reagieren auf unterschiedliche Wellenlängen.

Klug gekämmt

Doch bei den einfachen LIDAR-Messungen verfälschen Ungenauigkeiten die Ergebnisse. Die Wellenlängen der Laser müssen mit extremer Genauigkeit auf die Resonanz kalibriert werden. Driftet die Wellenlänge, die vom Kohlendioxid absorbiert wird, unter- oder überschätzt man bei der Rückstreuung die Konzentration des Gases. Bisher ist es üblich, die Drifts des Lasers durch Absorptionsspektroskopie zu beobachten und zu korrigieren, anhand einer mit Kohlendioxid und Methan gefüllten Zelle.



Das Forschungsflugzeug HALO wird aus dem Hangar gerollt.

Allerdings erschweren Vibrationen, Temperatur- und Druckschwankungen in der Kabine die Messung. Abhilfe schafft der SmartComb. Das Frequenzkamm-System misst zeitgenau einen kleinen Anteil des Lasers der Absorptionswellenlänge, während der große Anteil zur Erde gerichtet ist. Damit ist zu jedem Zeitpunkt die ausgesandte Wellenlänge genau bekannt. Da die Form der Spektrallinie von Kohlendioxid ebenso bekannt ist, lässt sich in der Nachbearbeitung die Konzentration, die über die Differenz von ausgesandtem und zurückgestrahltem Licht entsteht, exakter bestimmen. Durch den Einsatz des Frequenzkamms weiß man im Nachhinein, wo die tatsächliche Wellenlänge des Absorptions-Lasers zum Zeitpunkt der Ausstrahlung genau lag im Vergleich zu der immer gleichen Absorptionslinie.

Die innovative Analysetechnik kam bei der Mission CoMet über Europa zum Einsatz. Dies war die weltweit erste Flugzeug-Messkampagne für Treibhausgase, die einen Frequenzkamm nutzte. Die Flüge führten die Forscher unter anderem über das Oberschlesische Kohlebecken oder den Ätna auf Sizilien. Das Forschungsflugzeug legte insgesamt 40 000 Kilometer zurück und befand sich manchmal nicht höher als 200 Meter über der Erdoberfläche. „Die Messbedingungen in Flugzeugen sind äußerst anspruchsvoll“, erläutert Michael Mei, Geschäftsführer bei Menlo Systems. „Präzisionsmessungen sind daher besonders schwierig.“ Kabinendruck und Temperatur ändern sich, es gibt Turbulenzen und Lärm.

Dennoch lieferte der vollautomatisierte Menlo-Frequenzkamm verlässliche Daten für die Messungen der CO₂-Konzentrationen, die mit einer Wellenlänge von rund 1572 Nanometer erfolgten. Die Absorptionslinie bei CO₂ ist sehr schmal, daher ist die Messung sehr empfindlich auf Abweichungen des Lasers. Bei Methan ist es weniger kritisch, sodass der SmartComb nicht nötig war.

Die Kampagne ist ein Meilenstein für Frequenzkamm-Messungen von einem Flugzeug aus, wie dem High Altitude and Long Range Research Aircraft HALO. „Das Projekt hat uns gezeigt, dass präzise optische Frequenzkamm-Messungen gut zwei Jahrzehnte nach ihrer Erfindung auch unter harten Bedingungen vor Ort zuverlässige Ergebnisse liefern“, resümiert Michael Mei.

Die Menlo- und DLR-Ingenieure sind zuversichtlich, dass für künftige Messungen nur noch eine Stabilisierung durch den SmartComb-Frequenzkamm notwendig ist, aber kein Umweg mehr über die Absorptionsspektroskopie. So steht der nächsten Bewährungsprobe des SmartComb nichts mehr im Weg. Künftig ist geplant, LIDAR-Treibhausgas-Messungen von einem Satelliten aus durchzuführen, der SmartComb von Menlo könnte dann mit an Bord sein.

Autoren

Dipl.-Geogr. Thorsten Naeser, Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Hans-Kopfermann-Str. 1, 85748 Garching und **Dr. Benjamin Sprenger**, Menlo Systems GmbH, Am Klopfer-spitz 19a, 82152 Martinsried