

Atmosphärenforschung auf Deutschlands höchstem Berg – der Zugspitze 2.962m



White Paper



Abb. 1: Schneefernerhaus Forschungsstation an der südlichen Seite der Zugspitze (2680m) ©Hannes Vogelmann

Excimerlaser ermöglicht erstmals Wasserdampfmessungen in der Stratosphäre in nur einer Stunde.

Quantitative Messungen des atmosphärischen Wasserdampfgehalts in relativ kurzen zeitlichen Abständen müssen bis in die Stratosphäre ermöglicht werden. Wissenschaftler des Karlsruher Instituts für Technologie in Garmisch-Partenkirchen verwenden hierzu einen schmalbandigen Hochleistungs-UV-Laser und Raman-Streuung, um den Messbereich nach oben hin zu erweitern..

In einem Labor auf 2675 m Höhe in der Mess-Station Schneefernerhaus (UFS) auf der Zugspitze (2962 m) in den deutschen Alpen modifizierten Wissenschaftler des KIT einen industriellen 350 W XeCl-Excimerlaser der Firma Coherent und statteten die Messanordnung mit einer größeren Optik für die Signalerfassung zur Erzielung eines besseren Signal/Rauschverhältnisses (S/R) aus. Damit konnte ein 40-fach besseres S/R im Vergleich zu vorhandenen Raman-Lidar Systemen erzielt werden. Dadurch lässt sich jetzt Wasserdampf mit guter Genauigkeit bis zu einer Höhe von 20 km und um einen Faktor 10 schneller messen als bisher.

“

Wissenschaftler die Wasserdampf – Verteilung in der Atmosphäre nahezu in Echtzeit messen

”

Wasserdampf ist als wichtigstes Treibhausgas eine wesentliche Komponente der Atmosphäre mit einer sehr inhomogenen und dynamischen Verteilung. Zum besseren Verständnis und zur Vorhersage von Wettererscheinungen und Klimaänderungen müssen Wissenschaftler die Wasserdampf – Verteilung in der Atmosphäre nahezu in Echtzeit messen. Insbesondere möchte man Wasser in der Troposphäre (bis etwa 12 km Höhe) und darüber hinaus in der unteren Stratosphäre messen.

Es gibt mehrere spektroskopische Methoden zur Fernmessung von atmosphärischen Komponenten als zusätzliche Möglichkeiten zu einer Direktmessung z.B. mit Ballon-Instrumenten. Dr. Thomas Trickl und Dr. Hannes Vogelmann vom KIT entwickelten und optimierten eine Reihe von Laser-Mess-Systemen für unterschiedliche Spezies. Zwei Geräte – ein Differential-Absorptions-Lidar (DIAL) und ein Hochleistungs-Raman-Lidar System sind an der UFS, 300 m unter dem Gipfelkreuz der Zugspitze, im Einsatz.

DIAL ist eine Laser-Methode, bei der die Rückstreuung von zwei nahe beieinanderliegenden Wellenlängen verglichen wird. Die Wellenlängen sind entweder in „on“ oder „off“ -Resonanz zu einer einzelnen H₂O Absorptionslinie (817nm). Daraus kann die Konzentration entlang der Ausbreitungslinie des Laserstrahls ermittelt werden. Das System besteht aus einem Ti:Saphir Laser mit geringer Linienbreite und einer Pulsenergie bis zu 250 mJ in Kombination mit einem Newton-Teleskop von 650 mm Öffnung [1]. Durch diese Spezifikationen wird ein maximaler Messbereich von 12 km erreicht.

Um noch größere Höhen zu erreichen, müssen Absorptionsverluste in der Troposphäre minimiert werden. Dies ist der Fall für Raman-Lidar-Systeme, bei denen man die Stokes-verschobene Raman-Rückstreuung der Laser-Strahlung misst. Die Raman-Streuintensität hat eine stark nichtlineare inverse Abhängigkeit von der Wellenlänge ($1/\lambda^4$). Daher ist ein UV-Laser mit hoher Pulsenergie eine ideale Lichtquelle. Man nutzt den schmalen Q-Zweig des Vibrations-Rotations-Spektrums von Wasserdampf. Dieser wird im Detektionssystem durch einen Interferenzfilter mit 0,75 nm Bandbreite komplett selektiert. Die Anforderung an das Lasersystem ist somit eine ausreichend geringe Linienbreite zur effizienten Unterscheidung des erzeugten Signals. Und da das Raman-Signal auch polarisationsabhängig ist, erhält man durch einen linear polarisierten Laserstrahl optimale Messdaten.

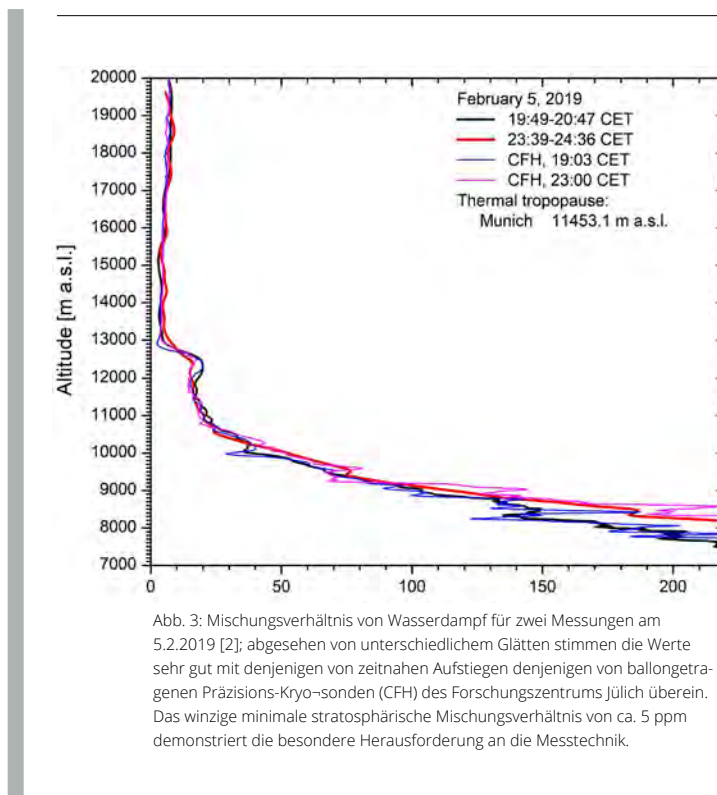


Abb. 2: vlnr: Dr. Trickl (KIT), Dr. Emmerichs (Coherent), Dipl. Betr. Wallenta (Coherent), Dr. Vogelmann (KIT) – Projektbesprechung auf der Zugspitze (2962m) auf Deutschlands höchstem Punkt: Die erfolgreiche Installation des UV-Coherent-Laser-Systems für die Klimaforschung.

Aus den oben genannten Gründen kommt üblicherweise ein frequenz-verdreifachter, gütegeschalteter Nd:YAG-Laser mit 355 nm und Pulsdauern von einigen Nanosekunden zur Verwendung. Solche Laser sind am Markt verfügbar mit durchschnittlichen Leistungen von 18 W. Damit erreicht man typische Messlängen von 20 km, aber die Messzeiten können aufgrund der extrem schwachen Raman-Streuung eine ganze Nacht betragen, was Nutzen und zeitliche Auflösung beeinträchtigt.

Um diese Einschränkung zu überwinden, suchten Trickl und Vogelmann nach einer alternativen ultravioletten Laser-Lichtquelle. Exzimer-Laser erzeugen von allen UV-Lasern die höchste Pulsenergie und höchste Durchschnittsleistung. Die Pulsdauer im ebenso unteren Nanosekunden-Bereich. Es sind wissenschaftliche und industrielle Lasersysteme verfügbar, jedoch verfügen die industriellen Systeme über die größte Leistung. Diese Xenon-Chlorid-Laser ($\lambda = 308 \text{ nm}$) sind optimiert für Anwendungen in der Präzisions-Materialbearbeitung in der Display- und Elektronikindustrie, einschließlich Tempern von Silizium und „Laser-Lift-Off“ (LLO). Sie zeichnen sich durch eine hervorragende Puls-zu-Puls Energie- und Strahlstabilität aus. In der Materialbearbeitung sind die Kontrolle von Ausgangswellenlänge und Linienbreite nicht erforderlich.

Die Arbeitsgruppe an der Zugspitze erwarb einen Industrielaser von Coherent mit Pulsenergien bis zu 1 Joule bei Repetitionsraten bis 350 Hz. Der Laser wurde anschließend von der Arbeitsgruppe zur Optimierung der Linienbreite und Stabilität der Wellenlänge, die für Raman-Lidar erforderlich sind, modifiziert. Trickl berichtet, „Zuerst optimierten wir den Laser zur Erzielung linear-polarisierter Pulse mit geringer Linienbreite und reduzierter Divergenz. Dazu verlängerten wir den Resonator für den Einbau eines Dünnschicht-Polarisators und eines durchstimmbaren resonatorinternen Etalons. Dieses Etalon ermöglichte einen Einzellinienbetrieb des Lasers mit 0.036 nm Linienbreite. Wir erreichen derzeit eine durchschnittliche Leistung von 180 W erreichen, was dem 10-fachen eines leistungsstarken 355 nm-Systems entspricht. Weitere Verbesserungen sind mit verlustärmeren Optiken und einer



“Dazu verlängerten wir den Resonator für den Einbau eines Dünnschicht-Polarisators und eines durchstimmbaren resonatorinternen Etalons.“

Verkürzung des Resonators zur Erzielung von mehr Durchläufen zu erwarten. Im Lidar-Empfangssystem nutzen wir gleichzeitig einen riesigen Sammelspiegel mit 1.5 m Durchmesser, wodurch unser System insgesamt ein 40-fach besseres S/R im Vergleich zu anderen Systemen erreicht“.

Die Spezifikationen des Lidars werden mit einem erstaunlichen Signal-Dynamikbereich von 7 Dekaden (9 für Temperatur), erzielt durch die Reduktion des Photonen-Hintergrundrauschens auf 0-3 Zählereignisse pro Entfernungsintervall (7,5 m) und Stunde – wird die Leistungsfähigkeit des Systems immer noch optimiert. Trickl und Vogelmann messen nun Wasserdampf bis in 20 km Höhe maximal 400 m im obersten Höhenbereich (Abb. 3). Eine nur einstündige Integrationszeit eine deutliche Verbesserung gegenüber der Vergangenheit dar. Gleichzeitig wurden mit diesem System Temperaturmessungen bis in fast 90 km Höhe demonstriert (Abb. 4). Die Temperatur wird in einem standardisierten Verfahren aus der Atmosphärendichte abgeleitet, die das Rückstreuungssignal bestimmt.

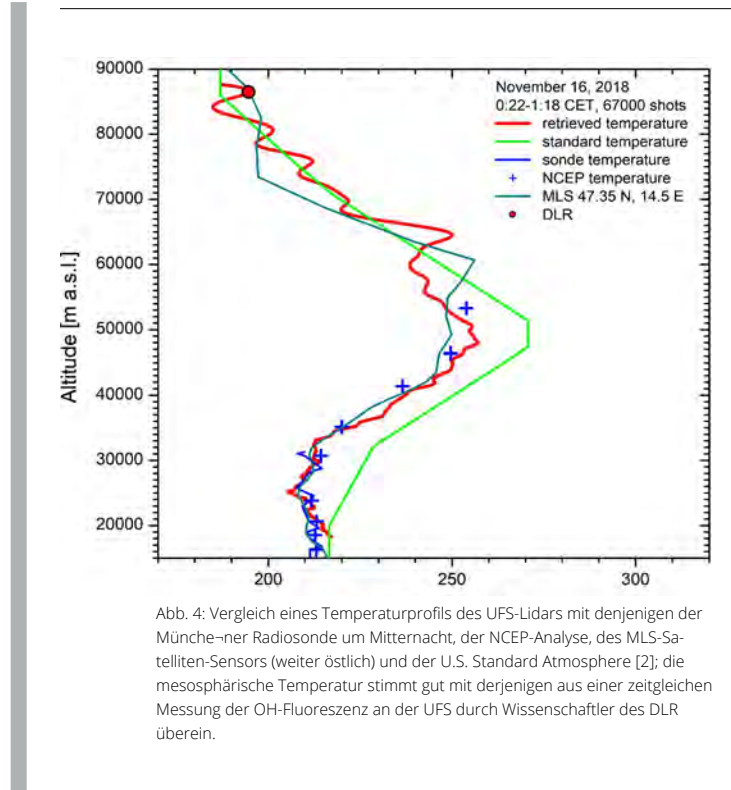


Abb. 4: Vergleich eines Temperaturprofils des UFS-Lidars mit denjenigen der Münchener Radiosonde um Mitternacht, der NCEP-Analyse, des MLS-Satelliten-Sensors (weiter östlich) und der U.S. Standard Atmosphäre [2]; die mesosphärische Temperatur stimmt gut mit derjenigen aus einer zeitgleichen Messung der OH-Fluoreszenz an der UFS durch Wissenschaftler des DLR überein.

[CLICK HERE TO SPEAK WITH OUR EXPERTS](#)



Literatur:

- [1] H. Vogelmann and T. Trickl, Wide-range sounding of free-tropospheric water vapor with a differential-absorption lidar (DIAL) at a high-altitude station, Appl. Opt. 47 (2008), 2116-2132
- [2] L. Klanner, K. Höveler, D. Khordakova, M. Perfahl, C. Rolf, T. Trickl, and H. Vogelmann, A powerful lidar system capable of one-hour measurements of water vapour in the troposphere and the lower stratosphere as well as the temperature in the upper stratosphere and mesosphere, Atmos. Meas. Tech. 14 (2021), 531-555

Referenzkunde und besonderen Dank gilt: KIT: Dr. Hannes Vogelmann hannes.vogelmann@kit.edu und Dr. Thomas Trickl