

## Atmosphärenforschung auf Deutschlands höchstem Gipfel – der Zugspitze (2962 m)

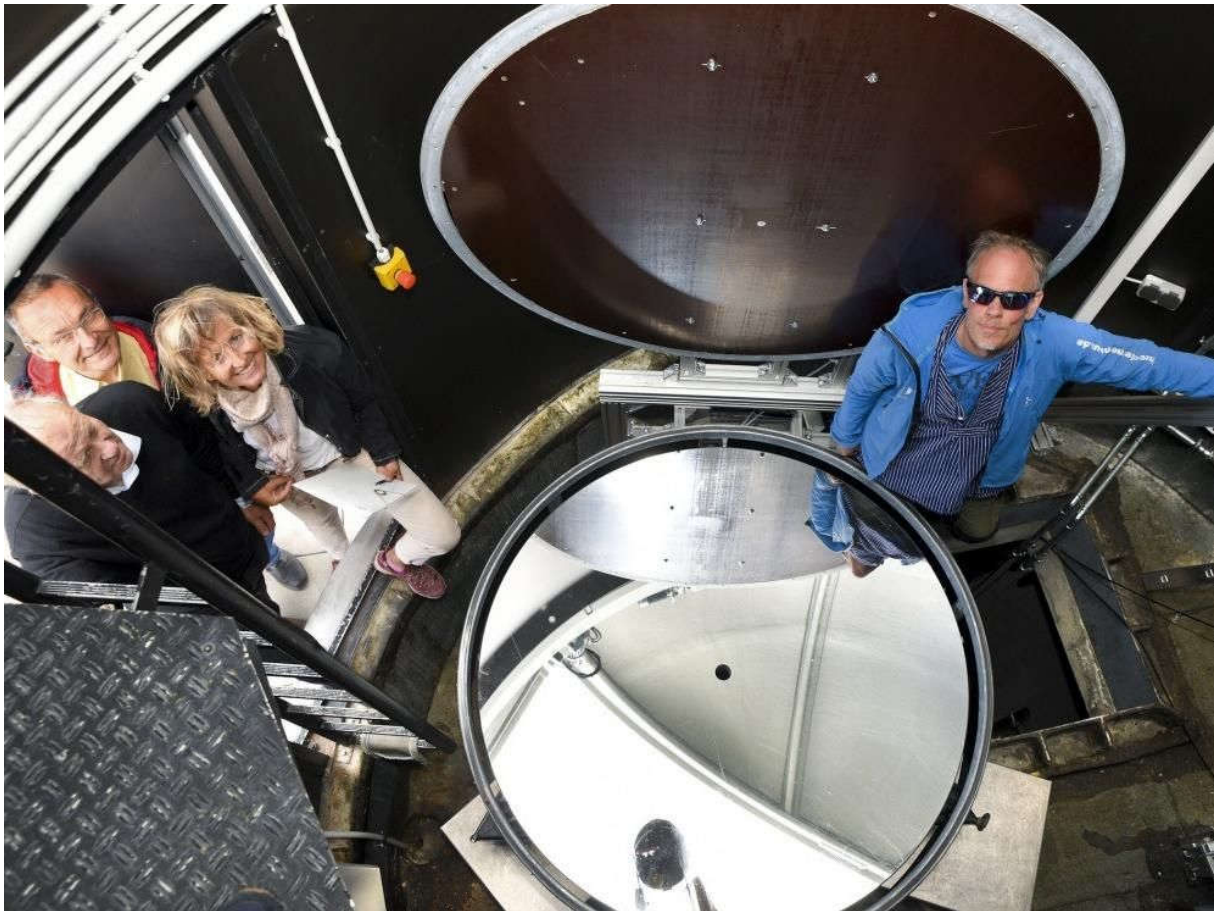
### Excimerlaser ermöglicht erstmals Wasserdampfmessungen in der Stratosphäre.

Atmosphären-Wissenschaftler suchen Wege zur Messung des atmosphärischen Wasserdampfgehalts mittels Raman-Rückstreuung in größeren Höhen. Dazu wurde ein schmalbandiger Hochleistungs-UV-Laser zur Erweiterung des Messbereiches für große Höhen verwendet.

Für eine Messstation auf der Zugspitze in den deutschen Alpen modifizierten Wissenschaftler 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/N) aus. Damit konnte ein 40-fach besseres S/N im Vergleich zu typischen Raman-Lidar 355nm Nd:YAG-basierten Systemen erzielt werden. Dadurch lässt sich jetzt Wasserdampf quantitativ bis zu einer Höhe von 22 km und um einen Faktor 10 schneller messen als bisher.



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



*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.*

Wasserdampf ist eine wesentliche Komponente der Atmosphäre mit einer sehr inhomogenen und dynamischen Verteilung. Zum besseren Verständnis und zur Vorhersage von Wettererscheinungen und klimatischen Änderungen müssen Wissenschaftler die Wasserdampf – Verteilung in der Atmosphäre in Echtzeit messen. Insbesondere möchte man Wasser in der Troposphäre (bis  $\approx 12\text{Km}$  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 (Ballon-Instrumente) oder hochgelegene Wetter-Messstationen. Verschiedene Laser-basierte Systeme wurden von Dr. Thomas Trickl und Dr. Hannes Vogelmann im Institut für Meteorologie und Klimaforschung in Garmisch-Partenkirchen des KIT (Karlsruhe Institut für Technologie) auf der Zugspitze, Deutschlands höchstem Berg (2962m) entwickelt und optimiert. Zwei Geräte – ein Differential-Absorptions-Lidar (DIAL) und ein Hochleistungs-Raman-Lidar System sind im Forschungslabor des Schneeferner-Hauses, 300 m unter dem Gipfelkreuz der Zugspitze im Einsatz.



DIAL ist eine laserbasierte Methode, bei der die Rückstreuung von zwei nahe beieinander liegenden Wellenlängen verglichen wird. Die Wellenlängen sind entweder in „on“ oder „off“-Resonanz zu einer einzelnen H<sub>2</sub>O 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 650mm Öffnung. Durch diese Spezifikationen wird ein maximaler Messbereich von 12 km erreicht.

Raman-Lidar ist ein etabliertes Verfahren, bei dem ein Laserpuls in die Atmosphäre abgegeben wird und bei der man die Stokes-verschobene Raman-Rückstreuung misst, die durch die Rotations- und Schwingungsbanden des Wassers erzeugt wird. Das Signal wird zeitaufgelöst gemessen, wodurch sich die Distanz des erzeugten Signals (die Höhe) ermitteln lässt. 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 Q-Zweig des Wasserdampf-Rotationspektrums, der aus einem schmalen Band von Linien mit geringem Abstand besteht. Diese werden im Detektionssystem durch einen Interferenzfilter mit 0,75 nm Bandbreite selektiert. Die Anforderung an das Lasersystem ist eine 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.

Aus den oben genannten Gründen kommt üblicherweise ein frequenz-verdreifachter, gütegeschalteter Nd:YAG-Laser mit 355 nm und Pulsdauern von einigen ns 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 hierbei viele Stunden (eine ganze Nacht) betragen, was Nutzen und zeitliche Auflösung beeinträchtigt.

Zur Vermeidung dieser Limitierungen suchten Trickl und seine Kollegen nach einer alternativen ultravioletten Laserlichtquelle. Excimer Laser erzeugen von allen UV-Lasern die höchste Pulsenergie und höchste Durchschnittsleistung. Ebenso liegt die Pulsdauer im unteren ns-Bereich. Es sind wissenschaftliche und industrielle Lasersysteme verfügbar, jedoch verfügen die industriellen Systeme über die größte Leistung. Diese Xenon-Chlorid-Laser ( $\lambda = 308$  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 Intracavity-Etalons. Dieses Etalon erlaubt die Festlegung der Laserwellenlänge auf 0.025 nm mit Hilfe eines kalibrierten Spektrometers. Dadurch können wir eine schmalbandige Laseremission mit einer durchschnittlichen



Leistung von 180 W erreichen, was dem 10-fachen eines leistungsstarken 355 nm –Systems entspricht. Wir nutzen auch einen Sammelspiegel mit 4-fach größerer Fläche, dadurch erzielt unser System ein 40-fach besseres Rauschverhalten im Vergleich zu anderen 355 nm-Instrumenten.“



Es ist wirklich Eindrucksvoll- selbst mit einem Dynamikbereich von 9 Dekaden, erzielt durch die Reduktion des Photonen-Hintergrundrauschens auf 1 Ereignis per vertikaler Messzelle ( 50 ns oder 7,5 m) pro Stunde – wird die Leistungsfähigkeit des Systems immer noch optimiert. Schon konnten Trickl und Vogelmann Wasserdampf bis 18 km Höhe mit einer vertikalen Auflösung von weniger als 300 m und bis zu einer bisher nicht erreichten Höhe von 22 km mit 1 km Auflösung messen. Zusätzlich stellt eine nur 1-stündige Integrationszeit eine deutliche Verbesserung gegenüber der Vergangenheit dar. Als Nebenprodukt erwartet man von diesem System Temperaturmessungen bis in 80 km Höhe. Die Temperatur wird in einem standardisierten Verfahren aus der Atmosphärendichte abgeleitet, die das Rückstreusignal beeinflusst.

Referenzkunden:

Dr. Thomas Trickl; Dr. Hannes Vogelmann [www.kit.edu](http://www.kit.edu)