

Atmosphärische Arktis

Auf der norwegischen Forschungsstation Alomar betreibt das Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik Instrumente zur Untersuchung der mittleren Atmosphäre.

Maike Pfalz

Die Forschungsstation Alomar befindet sich nördlich des Polarkreises in Andenes auf der norwegischen Insel Andøya.



Ende Februar besuche ich das erste Mal in meinem Leben die Arktis. Morgens um acht stehe ich bei strahlendem Sonnenschein vor dem Andøya Space Center, das am Fuße eines rund 400 Meter hohen Hügels auf der kleinen Insel Andøya in Nordnorwegen liegt.

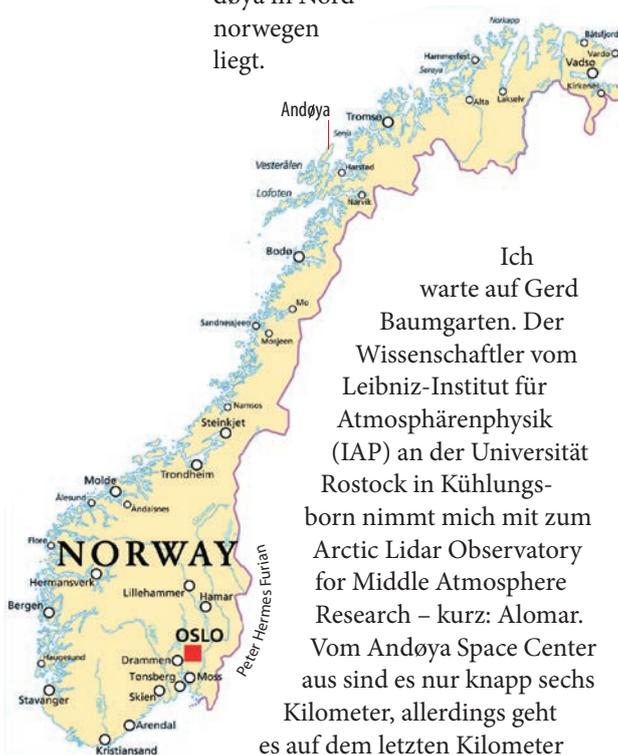
steil den kleinen Berg hinauf: Unser Wagen hat daher Vierradantrieb und Spikes an den Reifen. Vor uns fährt der Schneepflug und schiebt Schneemassen zur Seite. Nach rund zehn Minuten Fahrt sehen wir unser Ziel: ein achteckiges Gebäude mit schrägen Fenstern.

Ein eisiger Wind fegt uns um die Ohren, als wir aus dem Auto steigen und uns schnell in die Forschungsstation flüchten.

Im Eingangsbereich schlüpfen wir in die bereit stehenden Sandalen, die verhindern sollen, dass mit den Winterstiefeln Schnee und Dreck in das Gebäude gelangen – schließlich stehen hier sehr teure optische Geräte. Der erste Weg führt Gerd Baumgarten und mich in den großen Aufenthaltsraum im ersten Stock. Dort bietet sich ein spektakulärer Ausblick auf das Meer, die vielen Fischerboote vor der Küste und die schneebedeckten Nachbarinseln. Keine Frage: Die fast 15-stündige Anreise – mit zwei langen Zwischenstopps in Oslo und Bodø – hat sich gelohnt!

Bereits seit seiner Doktorarbeit vor 20 Jahren kommt Gerd Baum-

garten dreimal im Jahr für zwei bis drei Wochen auf die Forschungsstation, um das Rayleigh/Mie/Raman-Lidar (RMR-Lidar) zu betreuen, welches das Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik seit 1994 zusammen mit dem Service d'aéronomie du CNRS aus Frankreich betreibt. Mit dem Experiment lassen sich beispielsweise Temperaturen und Winde und deren zeitliche Variation aufgrund von Schwerewellen oder Gezeiten analysieren. Zudem ist es möglich, Aerosolschichten, polare Stratosphärenwolken im Winter oder leuchtende Nachtwolken im Sommer zu untersuchen. Das erlaubt Rückschlüsse auf die thermische Struktur und dynamische Prozesse der mittleren Atmosphäre.^{#)} Diese spielt beim Verständnis des Klimawandels und für Klimamodelle eine wichtige Rolle. Zudem lassen sich in der Arktis besondere Phänomene untersuchen wie der Polarwirbel oder die damit zusammenhängende plötzliche Stratosphärenenerwärmung. Bei dieser steigt die Temperatur der Stratosphäre innerhalb weniger Tage um mehr als 50 Grad an.



Ich warte auf Gerd Baumgarten. Der Wissenschaftler vom Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik (IAP) an der Universität Rostock in Kühlungsborn nimmt mich mit zum Arctic Lidar Observatory for Middle Atmosphere Research – kurz: Alomar. Vom Andøya Space Center aus sind es nur knapp sechs Kilometer, allerdings geht es auf dem letzten Kilometer

Die beiden gepulsten Nd:YAG-Laser des RMR-Lidar emittieren gleichzeitig Licht bei einer Wellenlänge von 1064, 532 und 355 Nanometer und werden bei einer Puls wiederholrate von 30 Hertz abwechselnd gefeuert. Wellenlänge und Richtung sind dabei hoch stabilisiert. Nach Aufweitung auf 20 Zentimeter Durchmesser wird der Laserstrahl über verschiedene Spiegel in die Atmosphäre emittiert. Die beiden Teleskope des Systems besitzen jeweils 1,8 Meter große Primärspiegel und empfangen das aus der Atmosphäre zurückgestreute Licht. Ein aufwändiger optischer Aufbau sorgt für dessen Nachweis. Aus der Lichtlaufzeit der Signale lässt sich auf die Entfernung zum Ort der Streuung schließen.

Bei seinen Besuchen in Andenes checkt Gerd Baumgarten beispielsweise die optischen Komponenten, die Justage und die Teleskope. Er prüft, ob die Software korrekt läuft und überwacht das komplette System. Zudem muss er einmal im Jahr mit dem Senior Engineer Reidar Lyngra die aufwändige Reinigung der beiden Spiegel besprechen und planen. Bei seinem jetzigen Besuch hat er die ersten Teile dabei, um den Umbau auf zwei neue Laser vorzubereiten, der im kommenden Jahr geplant ist. „Das wird ein irrsinniger Aufwand! Die Repetitionsrate der neuen Laser ist dreimal so groß, sodass wir die Synchronisation entsprechend anpassen müssen“, erklärt der Wissenschaftler. Die Zeit auf der Forschungsstation nutzt er, um sich intensiv dem RMR-Lidar zu widmen. „Wenn ich in Kühlungsborn bin, arbeite ich an verschiedenen Problemen oder



Gerd Baumgarten in der Teleskophalle. Die beiden Laser werden über die Primärspiegel entweder parallel zueinander oder um bis zu 30 Grad aus dem Zenit geschwenkt in die Atmosphäre geleitet.

Projekten gleichzeitig. Hier kann ich mich auf dieses eine Experiment konzentrieren“, betont er.

Beim Blick hinter die Kulissen auf Alomar ist schnell klar, dass dieses Experiment tatsächlich volle Konzentration erfordert – das System ist durchdacht bis ins letzte der unzähligen Details: Der optische Tisch ist zunächst kaum zu sehen, weil schwarze Platten die teuren optischen Komponenten abdecken und vor Staub schützen. Vorsichtig hebt Gerd Baumgarten nach und nach die einzelnen Platten an, um mir alles zu zeigen. Die Justage erfolgt computergesteuert, weil der Tisch so groß ist, dass viele Komponenten gar nicht zu erreichen sind.

Der große apparative Aufwand ist nötig, um Lidar-Messungen bei Tag und Nacht in über 80 km Höhe zu ermöglichen. Dort ist die Luft-

dichte um sechs Größenordnungen geringer als auf der Erde. Entsprechend wenige Partikel stehen für Streuprozesse mit dem Laserlicht zur Verfügung. Für Gerd Baumgarten und seine Kollegen geht es darum, jedes der wenigen zurückgestreuten Photonen zu empfangen und auszuwerten. „Dafür braucht man ordentliche Messtechnik – erst Recht, wenn tagsüber das Sonnenlicht an Luftpartikeln streut und den Untergrund extrem erhöht“, erläutert Gerd Baumgarten. Bei Tageslicht zu messen verdoppelt die Messzeit und bietet die Möglichkeit, leuchtende Nachtwolken in der Arktis zu untersuchen.

Zu der ausgefeilten Messtechnik des RMR-Lidars zählen eine starke räumliche und spektrale Filterung, ein kleines Gesichtsfeld der Teleskope, Interferenzfilter und aktiv

#) vgl. auch den Artikel von F.-J. Lübken et al. in diesem Heft





Die Forschungsstation in der Dämmerung mit den beiden grünen Laserstrahlen des RMR-Lidar-Experiments

stabilisierte Fabry-Pérot-Interferometer. Das gesamte Experiment ist Weltspitze, wie Gerd Baumgarten verdeutlicht: „Manchmal sind wir anderen Forschergruppen so weit voraus, dass wir uns mit einer Veröffentlichung monatelang Zeit lassen können!“

Als wir zusammen in den Teleskopraum gehen, wird es spürbar kälter, denn nur eine dünne Dachluke trennt uns von der kalten Luft der Arktis. Wenn die Messung läuft, fährt diese über den Teleskopen weg und macht den Weg für die Laserstrahlen frei. Heute allerdings sind zu viele Wolken aufgezogen. Daher ist das Experiment ausgeschaltet, und Gerd Baumgarten hat Zeit, mir alles zu erklären. Eine seiner ersten Aufgaben schon während der Doktorarbeit bestand darin, die beiden Teleskope und die Laserstrahlen schwenkbar zu machen. „Es hat einige Jahre gedauert, bis das endlich funktioniert hat“, erzählt er. Die Spiegel liegen inzwischen auf einer ausgeklügelten Metallkonstruktion. Diese stellt sicher, dass sie nicht verrutschen, wenn die Teleskope geschwenkt werden.

Das Schwenken der Teleskope nutzen die Wissenschaftler, um

gleichzeitig zwei verschiedene Volumina untersuchen zu können, beispielsweise zur Analyse der horizontalen Struktur von leuchtenden Nachtwolken oder für Horizontalwindmessungen in der Atmosphäre, die auf einer sehr kleinen Doppler-Verschiebung bei der Streuung des Lichts beruhen.

Leuchtende Nachtwolken bestehen aus nanometerkleinen Eisparkeln und treten im Sommer in der Dämmerung in einer Höhe von rund 82 km auf. In der oberen Mesosphäre unterschreiten die Temperaturen im Sommer nämlich den Frostpunkt von Wasserdampf, sodass sich Eisteilchen bilden können – Ursache der leuchtenden Nachtwolken. Ihre Existenz ist bereits seit Ende des 19. Jahrhunderts bekannt, ihre Untersuchung mittels Lidar gelang allerdings erst in den Neunzigerjahren. Da die leuchtenden Nachtwolken in hohen Breiten im Sommer auftreten, wo es rund um die Uhr hell ist, verhindert die Mitternachtssonne normalerweise die Lidar-Experimente. Das RMR-Lidar kann aber seit Sommer 1994 leuchtende Nachtwolken messen und hat den

umfangreichsten Datensatz dieser Wolken aufgezeichnet und dabei auch ihren Aufbau entschlüsselt. Da die Wolkenpartikel winzig sind, folgen sie der Bewegung der Luft zumindest für einige Minuten fast vollständig und können somit als eine Art „Tracer“ für die Luftmassen in diesen Höhen dienen. „Die leuchtenden Nachtwolken malen sozusagen die Atmosphäre an, sodass wir sie mit unserem Lidar-Experiment sehen können“, sagt Gerd Baumgarten.

Aus der Untersuchung der leuchtenden Nachtwolken lassen sich Rückschlüsse auf die Wolkenbildung ziehen und auf die Vorgänge in der oberen Atmosphäre. Wenn die Wolkenschicht dünn ist, reagiert sie sehr empfindlich auf Luftbewegungen in der Atmosphäre. „Dann können wir den Übergang zur Turbulenz beobachten und die zugehörigen charakteristischen Zeit- und Längenskalen genau angeben“, erläutert Gerd Baumgarten. Diese Angaben fließen in die Modelle ein und helfen, die dynamischen Vorgänge in der Atmosphäre an der Grenze zum Weltraum auf Skalen von wenigen Metern bis hunderten von Kilometern besser zu verstehen.

Eine lange Geschichte

Das Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik zählt weltweit zur Spitze der Institutionen, welche die mittlere Atmosphäre erforschen.^{+) Die Aktivitäten in Andenes sind dafür ein wichtiger Baustein. Die erfolgreiche Zusammenarbeit mit dem dortigen Andøya Space Center (ASC) besteht seit mehr als 25 Jahren, wie mir Michael Gausa, der wissenschaftliche Direktor des ASC, erzählt. Der deutsche Physiker ist vor fast 20 Jahren mit seiner Familie nach Norwegen umgezogen und arbeitet seit dem Jahr 2000 beim ASC. Initiator des RMR-Lidar und damit auch}

+) Zu den Evaluationen durch den Leibniz-Senat siehe Physik Journal, Mai 2016, S. 12 und Januar 2009, S. 8



der Forschungsstation Alomar war der heute 83-jährige Ulf von Zahn, der erste Direktor des IAP in Kühlungsborn. „Der hatte damals unzählige gute Kontakte“, wie Michael Gausa verrät. Dadurch hatte von Zahn Anfang der Neunzigerjahre erfahren, dass die Europäische Südsternwarte ESO zwei große Aluminiumspiegel hergestellt hatte, um verschiedene Fertigungstechniken zu testen, und diese zehn Jahre lang einlagern wollte. „Daraufhin hat er der ESO den Vorschlag gemacht, die Spiegel für diesen Zeitraum zu nutzen, um damit Lidar-Experimente zu machen“, erzählt Gausa. Die Spiegel waren mehrere Millionen Mark wert und gaben den Anstoß für Alomar: Nachdem die Wahl für das Lidar-Experiment auf Andenes gefallen war, begannen die Planungen für eine neue Forschungsstation. „Mit großem Einsatz ist es Ulf von Zahn, dem damaligen Direktor des ASC Kolbjørn Adolfsen und Eivind Thrane, einem Professor aus Oslo, gelungen, das Geld für das Forschungsgebäude zu beschaffen – immerhin mehrere Millionen Mark“, betont Gausa.

Das Gebäude wurde Anfang der Neunzigerjahre speziell für das RMR-Lidar gebaut – unter von Zahns Aufsicht. „Er hat alles genauestens durchdacht und war an vielen Detaillösungen beteiligt“, sagt Michael Gausa, der die Forschungsstation zehn Jahre lang geleitet hat. Diese Akribie bei der Planung und beim Bau hat sich ausgezahlt: „Alomar ist das einzige Lidar-Observatorium weltweit, das in diesem Maße durchgeplant ist“, ist er überzeugt. Dazu zählt, dass die Teleskope beispielsweise auf einem eigenen Fundament stehen und vom Rest des Gebäudes entkoppelt sind. So können sich Menschen im Gebäude frei bewegen, ohne dabei die Messungen zu stören. Auch die Versorgung ist gut durchdacht, die Station ist völlig autark: Fällt auf der Insel der Strom aus, so springen zunächst Notstromaggregate an, bevor zwei alte Dieselaggregate von 1960 die Stromversorgung auch längerfristig sicherstellen. Die



Auf dem Dach der Forschungsstation mit Blick auf die schneebedeckten Berge der Nachbarinsel. Wenn das RMR-Lidar misst, fährt die Decke zur Seite und gibt den Weg frei für die Laserstrahlen.

Notversorgung setzt automatisch ein, damit die Experimente auch weiterlaufen können, wenn nur ein Mitarbeiter auf der Station ist. Und strandet dieser aufgrund eines Unwetters dort oder mag nachts nicht mehr zu Fuß den Berg hinabwandern, kann er in einem der zwei Schlafräume übernachten. Nur die Wasserpumpe, die das Wasser aus der Tiefe des Berges in die Station befördert hat, funktioniert nicht mehr. Daher wird heute das Wasser in regelmäßigen Abständen auf den Berg geschafft.

Betreiber der Forschungsstation ist das Andøya Space Center, das seit der Gründung 1962 mehr als tausend Höhenforschungsraketen gestartet hat. Einige davon werden mit den Lidar-Experimenten koordiniert. Dann schwenken beispielsweise die Wissenschaftler des IAP ihre Laserstrahlen in die Richtung, in welche die Rakete fliegt. „Wenn sich etwa an Bord der Rakete Detektoren für Aerosole befinden, können wir deren genaue Teilchengrößen liefern“, freut sich Gerd Baumgarten.

Kunden des Space Centers sind unter anderem das DLR oder die NASA. Andere wichtige Projekte sind Ballonexperimente und die Entwicklung von Drohnen, die beispielsweise Strommasten oder

Ölverschmutzung kontrollieren können. Beim ASC arbeiten rund 90 Mitarbeiter, davon sind meist vier bis fünf auf der Alomar-Station im Einsatz, um die dortigen Experimente wie das Ozon-Lidar, das Natrium-Lidar, das Troposphären-Lidar oder das Wasserdampfspektrometer des MPI für Sonnensystemforschung zu betreuen. Für das RMR-Lidar gewährleisten die ASC-Mitarbeiter Messzeiten bis Mitternacht. „Norwegen ist kein Billiglohnland. Wenn die Messungen über Nacht laufen sollen, decken Studenten aus Kühlungsborn diese Zeiten ab“, erläutert Michael Gausa.

Auf dem Radar

Neben dem RMR-Lidar und einem mobilen Eisen-Lidar betreibt das IAP in Andenes ein umfangreiches Radar-Experiment, das direkt am Meer gelegen ist: Middle Atmosphere Alomar Radar System (MAARSY). Ziel dabei ist es, die





Nicht weit entfernt vom Andøya Space Center und direkt am Meer liegt das 90 Meter große MAARSY-Experiment, das aus über 400 Antennen besteht.

horizontalen Strukturen polarer mesosphärischer Sommerechos, die durch mesosphärische Eiswolken entstehen, zu erfassen sowie das Windfeld und Turbulenzen dreidimensional zu untersuchen. Dazu werden Radarstrahlen bis zu 1000 mal pro Sekunde an verschiedene Positionen in die Atmosphäre gesendet.

Das Experiment, das Wissenschaftler um Ralph Latteck vom IAP betreiben, wird vollautomatisch von Kühlungsborn aus gesteuert. Daher besuche ich MAARSY zusammen mit Gerd Baumgarten. Das Feld hat einen Durchmesser von 90 Metern und besteht aus 433 einzelnen Antennen, die in Gruppen aus sieben bzw. acht Antennen gezielt phasensteuerbar sind (Phased-Array-Antenne). Jede Antenne ist über ein Kabel mit einem eigenen Sende-Empfangs-Modul verbunden, das sich in einem von sechs Containern am Rande des Feldes befindet. „Alle Kabel müssen exakt gleich lang sein, damit das Experiment überhaupt funktioniert“, stellt Gerd Baumgarten fest. Die Antenne besitzt ein symmetrisches Strahlungsdiagramm mit einer hohen Richtwirkung in einem schmalen Bereich. Bei MAARSY entstehen täglich rund 600 GB an Daten. Eine große Herausforderung besteht darin,

diese langfristig zu sichern und detailliert auszuwerten.

Beide Experimente des IAP ergänzen sich perfekt, denn das Lidar ist auf den Bereich zwischen 20 und 70 km ausgelegt, während das Radar in der Troposphäre und in der Mesosphäre messen kann. Dafür variieren die Wissenschaftler die Pulslänge des Radars: Zunächst senden sie einen 10 bis 15 km langen Puls hoch in die Mesosphäre. Sobald er die Troposphäre verlassen hat, schicken sie einen kurzen Puls los, der in der Troposphäre zu Echos führt. „Diese gemeinsamen

Messungen kommen uns besonders bei der Untersuchung von Wind zugute, weil wir mit beiden Experimenten den Bereich bis in 90 km Höhe abdecken können. Das ist wirklich sehr gut durchdacht“, freut sich Gerd Baumgarten.

Selbst nach 20 Jahren kommt er immer noch gerne nach Norwegen. Die Zusammenarbeit mit den Mitarbeitern des Andøya Space Centers und den Wissenschaftlern der anderen Forschungsgruppen funktioniert gut. „Wir helfen uns gegenseitig aus. Das ist der Alomar-Spirit“, sagt er. Das klingt trivial, ist aber auf Alomar umso wichtiger, weil man Ersatzteile oder fehlende Schrauben nicht einfach schnell im örtlichen Baumarkt besorgen kann.

Jedes Jahr kommen Studierende aus Kühlungsborn nach Andenes, um die Messungen zu betreuen. „Wer mal hier oben gewesen ist, hat einen völlig anderen Bezug zu dem Experiment. Ein solches Projekt lebt von den hochmotivierten jungen Leuten, die sich auch mal die Nacht um die Ohren schlagen“, ist Gerd Baumgarten überzeugt. Mein Tag auf der Station endet am späten Nachmittag kurz nach Sonnenuntergang: Ich leihe mir Spikes für die Winterstiefel und wandere gemütlich den Hang hinab. Dabei genieße ich das herrliche Licht und das Abendrot in der Dämmerung, während über mir das Lidar-Experiment seine Messungen macht.

M. Pfalz

