

Forschung mit Fernblick

Unterhalb des Zugspitzgipfels bietet das Schneefernerhaus hervorragende Bedingungen für die Klima- und Umweltforschung.

Stefan Jorda

Auf Deutschlands höchstem Berg drängeln sich wie an jedem schönen Tag die Touristen aus der ganzen Welt und bestaunen das großartige Panorama, das von den Voralpen bis zu den schneebedeckten Tiroler und Schweizer Bergen reicht. Aber mein Ziel ist nicht der Gipfel. Mit einer Seilbahn fahre ich in wenigen Minuten hinunter zur Station Sonnalpin unweit der kärglichen Reste des größten deutschen Gletschers. Im Winter tummeln sich hier die Skifahrer, aber im Sommer geht es ruhig zu. Hannes Vogelmann, mit dem ich verabredet bin, fordert routiniert eine dritte Seilbahn an, die uns zum Ziel bringt: zur Umweltforschungsstation Schneefernerhaus.¹⁾ Der mehrstöckige und verschachtelte Gebäudekomplex „klebt“ mitten in einem Südhang, 2650 Meter über dem Meeresspiegel und 300 Meter unter der Zugspitze. „Heute käme kein Bauplaner mehr auf die Idee, so ein Gebäude mitten in den steinschlag- und lawinengefährdeten Hang zu setzen“, sagt der 43-jährige Physiker.

Mit dem Ziel, die Zugspitze für Touristen zu erschließen, wurde Ende der 1920er-Jahre ein über vier Kilometer langer Stollen durch das Bergmassiv getrieben für eine Zahnradbahn, die noch heute in Betrieb ist. An ihrer Endstation eröffnete 1930 das Luxushotel Schneefernerhaus, dessen Betrieb nach einer jahrzehntelangen und wechselvollen Geschichte Anfang der 1990er-Jahre endgültig eingestellt wurde. Bayern und der Bund nutzten damals die Gunst der Stunde und investierten mehrere Millionen in den Umbau zur Forschungsstation, in der heute mehrere Institutionen, darunter das Karlsruher Institut für Technologie (KIT), das Helmholtz-Zentrum München und das Umweltbundesamt, langfristig

S. Jorda



Mit der eigenen Seilbahn geht es von der Station Sonnalpin zum Schneefernerhaus, das mitten im Steilhang liegt.

Der Zugspitzgipfel befindet sich 300 Meter höher (rechts)

angelegte Forschungs- und Beobachtungsprogramme durchführen.

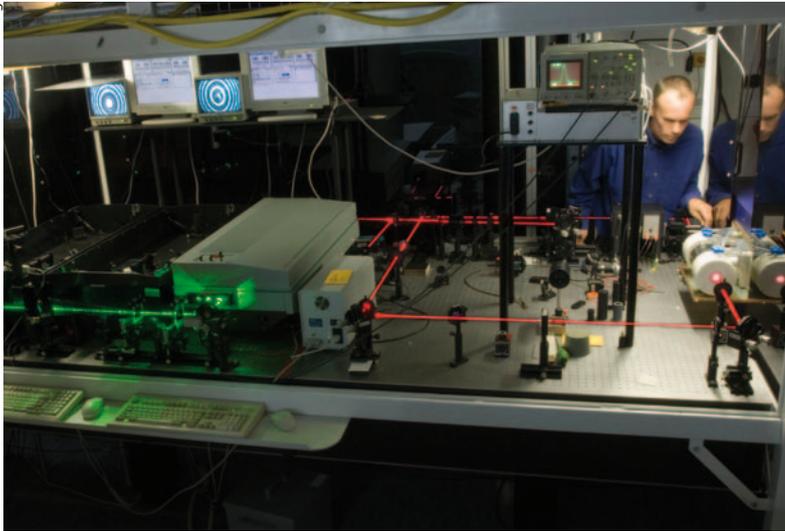
Hannes Vogelmann nutzt diese Möglichkeiten, um die Konzentration von Wasserdampf in Höhen zwischen drei und zwölf Kilometer zu messen. Wasser macht zwei Drittel des gesamten Treibhauseffekts aus und verweilt im Mittel nur wenige Tage in der Atmosphäre, in der es in allen drei Aggregatzuständen vorkommt. „Dies führt zu einer hohen Dynamik, die schwer zu erfassen ist“, erklärt er. In seinem Labor in der obersten Etage angekommen, betätigt er diverse Schalter, läuft um den optischen Tisch mit einem komplizierten Aufbau herum und öffnet eine Beobachtungskuppel. Während die Apparatur warmläuft, erklärt er, wie er mit einem Nd:YAG-Laser und nichtlinearen Kristallen Lichtpulse mit zwei leicht unterschiedlichen Frequenzen erzeugt. Ein Ti:Saphir-Kristall, den Blitzlampen pumpen, verstärkt die wenige Nanosekunden

kurzen Pulse. „Dieser Ti:Saphir-Laser ist eine Gewaltmaschine“, sagt Vogelmann, „wir haben schon eine Pulsenergie von 250 mJ erreicht, was für einen abstimmbaren Einmodenlaser wohl Weltrekord ist“. Er illustriert diese „Gewalt“ eindrucksvoll, indem er den unsichtbaren Infrarotpuls mit einer Linse auf ein Stück Metall fokussiert. Im Takt der Entladungen entstehen kleine Blitze – sogar in der Luft, als er das Metall entfernt. Die Energie dafür liefert ein 30 000-Volt-Netzteil, in dem anfangs wegen der dünnen Luft massiv Probleme mit Überschlügen auftraten. Doch heute knattert das Netzteil zuverlässig vor sich hin. Inzwischen wäre die Apparatur auch messbereit, aber draußen ist Nebel aufgezogen, sodass es heute nichts wird mit der Messung.

Als Messprinzip nutzt Vogelmann das differentielle Absorptions-LIDAR, das auf der Absorption von Wasser im Nahinfrarot

1) www.schneefernerhaus.de

Markus Breig



Im Rahmen seiner Doktorarbeit hat Hannes Vogelmann das LIDAR-System aufgebaut, mit dem sich die Wasser-

beruht. Dazu sind die beiden Frequenzen so gewählt, dass eine absorbiert wird und die andere nicht. Ein Spiegel lenkt die Lichtpulse senkrecht in den Himmel, und ein Empfangssystem mit großem Teleskop registriert das rückgestreute Licht. Aus dem Vergleich der beiden Signale lässt sich die Konzentration berechnen. Die Höhe ergibt sich aus der Laufzeit. Möchte man die Konzentration bis in die oberen Schichten der Troposphäre messen, was für die Klimaforschung besonders interessant ist, muss die betrachtete Absorptionslinie stark sein – dann würde vom Tal aus aber gar kein Licht in der Höhe ankommen. Daher führt kein Weg daran vorbei, von einem hochgelegenen Standort aus zu messen.

dampfkonzentration messen lässt. Zur Illustration wurde der Strahlengang des Infrarotlichts rot gefärbt.

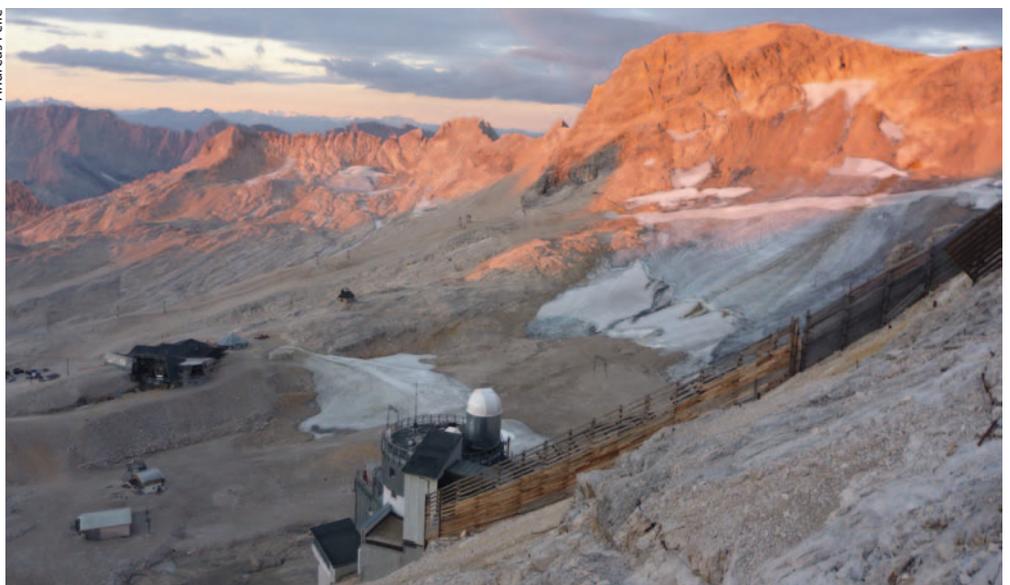
Seit inzwischen über sieben Jahren nimmt Vogelmann an ein bis zwei Tagen pro Woche ein Höhenprofil der Wasserdampfkonzentration auf. Dabei hat er zum Beispiel nur wenige hundert Meter dünne Luftschichten nachgewiesen, die praktisch keine Feuchtigkeit enthalten. Diese sog. stratosphärischen Intrusionen entstehen über Grönland oder Nordkanada an der Grenze zur Stratosphäre und sind oft viele Tage unterwegs bis nach Deutschland. „Dass derart trockene Schichten auf tausenden Kilometern Luftweg erhalten bleiben, ist eine große Überraschung und zugleich ein Herausforderung für die Meteorologen und ihre Modelle“, sagt Vogelmann.

Als der begeisterte Bergsportler vor über zehn Jahren im Rahmen

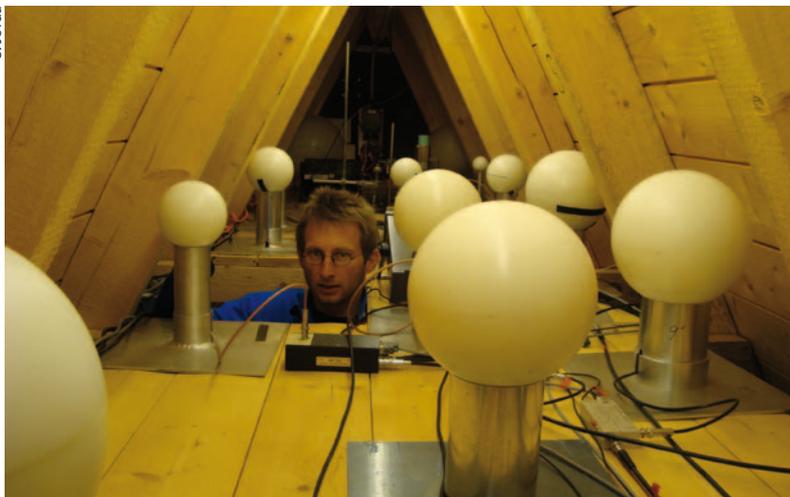
seiner Doktorarbeit mit dem Aufbau der Messapparatur begann, genügte die kommerziellen Lasersysteme nicht den Anforderungen an Schmalbandigkeit, Frequenzstabilität und Pulsenergie. Daher musste er viel selbst entwickeln und war dazu teilweise wochenlang allein im Schneefernerhaus. „Das war mental anstrengend“, erinnert er sich, auch weil durch die alten Stollen der Wind pfeift und das Haus „allerlei Geräusche“ macht. Während er damals wegen „jeder einzelnen Schraube“ ins Tal fahren musste, gibt es heute eine komplette Werkstatt. Und statt der anfänglichen „Besenkammer mit Bett“ sind inzwischen fünf recht komfortable Doppelzimmer aus der Hotelzeit renoviert. Hinzu kommen einige Mehrbettzimmer, sodass mehr als 30 Wissenschaftler übernachten können. Diesen stehen auch zwei Konferenzräume zur Verfügung, der angesichts des großartigen Ausblicks auf das Bergpanorama für Vortragende aber zweifellos sehr „undankbar“ sind. Essen können die Wissenschaftler in der Station Sonnalpin bestellen, angeliefert wird dann nicht auf Rädern, sondern per Seilbahn. Oder sie kochen selbst, meist gibt es dann Spaghetti.

An das Hotel erinnern heute ansonsten nur noch alte Fotos sowie das Stationsschild „Bahnhof Hotel Schneefernerhaus“ im feuchten und muffigen Stollen der Zahnradbahn. „Wir sind das einzige Gebirgslabor

Andreas Felle



Blick von oben auf das Schneefernerhaus (vorne) sowie die Station Sonnalpin (Mitte links). Der nördliche Schneeferner (rechts) ist der größte deutsche Gletscher.



Till Rehm gehört zur Betriebsmannschaft des Schneefernerhauses und hilft weiter, wenn es Probleme mit Instrumenten

gibt wie dem Neutronenspektrometer mit seinen charakteristischen Polyethylen-Kugeln.

mit U-Bahn-Anschluss“, kommentiert schmunzelnd der Geophysiker Till Rehm, der zum mehrköpfigen Team der Betriebsgesellschaft gehört und täglich mit der Seilbahn an seinen Arbeitsplatz fährt. Zu seiner Aufgabe gehört es nicht nur, das Haus mit der komplexen Infrastruktur am Laufen zu halten, sondern auch die Wissenschaftler nach Kräften zu unterstützen. „Unser Selbstverständnis ist, dass wir nicht nur Schnee räumen, sondern auch trouble shooting machen für die Messgeräte“, erläutert Rehm. Dies schließt den Neustart von Rechnern nach einem Stromausfall ebenso ein wie die Wartung einer Vakuumpumpe.

Wenn jedoch Probleme mit den Messgeräten des Deutschen Wetterdienstes oder des Umweltbundesamtes (UBA) auftreten, die im Schneefernerhaus gemeinsam eines der weltweit 30 Observatorien für das Programm „Global Atmosphere Watch“⁽²⁾ betreiben, dann ist primär Ludwig Ries vom UBA zuständig. Der Umweltwissenschaftler und Geoökologe ist ohnehin fast täglich im Schneefernerhaus und Herr über eine ganze Armada von Geräten, mit denen täglich die Konzentrationen von Aerosolen sowie rund 40 Gasen gemessen werden, angefangen von Treibhausgasen wie Kohlendioxid, Methan oder Lachgas über Ozon, Stickoxide bis zu halogenierten Kohlenwasserstoffen. Die Messwerte „erzählen“ Ries die Vorgeschichte der untersuchten

Luft. „Am Wochenende hatten wir hier Luft aus der Sahara“, sagt er – das ist immer der Fall, wenn die Konzentration der Stickoxide gering ist, die Luft aber viel Feinstaub mit Partikelgrößen zwischen 150 und 500 Nanometer enthält. Und als kürzlich Waldbrände in Kanada auftraten, hat Ries zwei Wochen später erhöhte Rußkonzentrationen gemessen. Damit sich Gaskonzentrationen bis herab in den ppt-Bereich zuverlässig messen lassen, ist es natürlich essenziell, dass am Schneefernerhaus selbst keine Emissionen auftreten. Daher wird die komplette Abluft über einen alten Stollen, der früher das Hotel mit der österreichischen Seilbahnstation verband, vom Schneefernerhaus weggeführt. Und selbstverständlich treibt nicht ein Zweitakter

die Schneefräse an, sondern ein Elektromotor, den Münchner Maschinenbauabsolventen gemeinsam mit der Betriebsgesellschaft entwickelt haben.

Noch erfordern die Messungen mit Gaschromatographie und Massenspektrometrie viel Handarbeit, doch die Zukunft gehört einer modernen spektroskopischen Methode, ist Ries überzeugt. Diese Cavity-Ring-Down-Spektroskopie lässt sich besser automatisieren und erlaubt es sogar, beim Wasserdampf zwischen leichten und schweren Sauerstoffisotopen oder beim Kohlendioxid zwischen Kohlenstoff-12 und Kohlenstoff-13 zu unterscheiden. Das Verhältnis dieser beiden Isotope nimmt seit Jahren zu, da die Pflanzen, aus denen Erdöl und Kohle entstanden sind, bei der Photosynthese Kohlenstoff-12 bevorzugt haben.

Im Gegensatz zu Ludwig Ries kommt der Strahlenphysiker Werner Rühm oder einer seiner Mitarbeiter vom Helmholtz-Zentrum München nur etwa alle zwei Monate vorbei, denn der von ihnen betriebene Detektor arbeitet ferngesteuert und überträgt die Daten direkt nach München. Er weist die Neutronen nach, die bei der Wechselwirkung der kosmischen Strahlung mit der Atmosphäre entstehen, und zwar – und das ist das Besondere – energieaufgelöst. Dazu steht auf der großen Terrasse des Schneefernerhauses eine drei Meter hohe Holzhütte mit Spitzdach, in

2) www.dwd.de/gaw und https://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/gaw_home_en.html



Ludwig Ries vom Umweltbundesamt misst täglich die Konzentrationen von Aerosolen und rund 40 Gasen.

3) Auf www.helmholtz-muenchen.de/epcard-portal/ kann sich jeder Interessierte mit einer vereinfachten Version die Dosis berechnen, der er beim nächsten Flug ausgesetzt ist.

der 16 unterschiedlich große weiße Plastikugeln sofort auffallen. Da ihr Polyethylen Neutronen abbremst und sich im Mittelpunkt der Kugeln Detektoren befinden, die nur auf langsame Neutronen ansprechen, ist jeder Kugeldetektor auf eine andere Neutronenenergie empfindlich, sodass sich insgesamt ein Neutronenspektrometer ergibt.

Eine ganz praktische Anwendung dieser gemessenen Spektren besteht darin, das vom Helmholtz-Zentrum entwickelte Simulationsprogramm zu validieren, mit dem Fluggesellschaften wie die Luft-hansa die Dosis von Piloten und Kabinenpersonal berechnen lassen – individuell je nach Datum, Flugroute und -höhe.³⁾ Daneben geht es aber auch um Grundlagenforschung, beispielsweise darum, die saisonalen Schwankungen im Detail zu verstehen. „Das Neutronenspektrum pulsiert“, erläutert Rühm, „im Sommer nimmt zum Beispiel die Anzahl niederenergetischer Neutronen zu, im Winter dagegen wegen des absorbierenden Schnees wieder ab“. Ungeklärt ist auch noch die Frage, wie sich die Neutronendosis auf der Erde berechnen lässt – wenn auf der Sonne eine große Eruption stattfindet, kann diese innerhalb weniger Stunden auf das Hundertfache anwachsen. Und schließlich profitiert auch die Turmorthotherapie mit Protonen oder Schwerionen von den Ergebnissen,



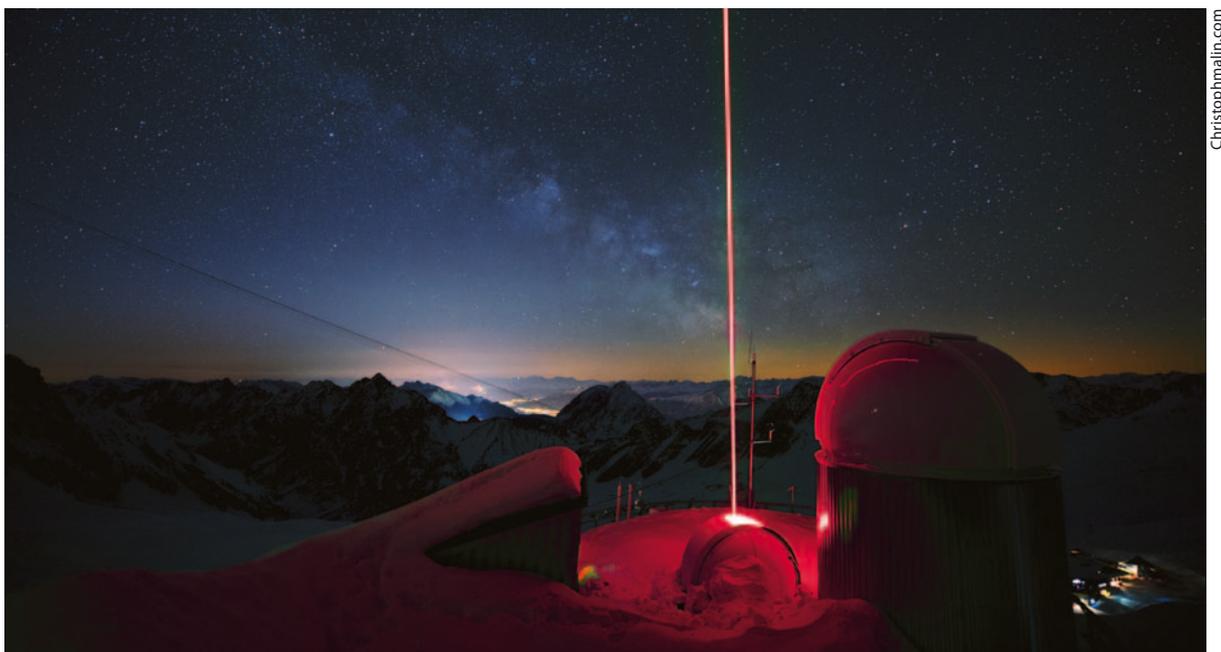
Nur noch selten kommt Werner Rühm vom Helmholtz-Zentrum München zum Schneefernerhaus, denn „sein“ Neutronenspektrometer in der im Hintergrund erkennbaren Hütte arbeitet automatisiert.

denn bei der Bestrahlung erhält der Patient eine unerwünschte zusätzliche Dosis durch Sekundärteilchen. „Der Patient liegt quasi in einem Bad aus Neutronen, zu dem Neutronen mit Energien jenseits von 20 MeV wesentlich beitragen – Neutronen, die auch für das Spektrum auf der Zugspitze typisch sind“, sagt Rühm.

Neben den langfristigen Messprogrammen steht das Schneefernerhaus auch Wissenschaftlern oder Unternehmen für zeitlich begrenzte Messkampagnen offen, unabhängig davon, ob sie zu einem

Konsortialpartner gehören oder nicht. „Wenn jemand mit einer guten Idee kommt, finden wir in der Regel auch Platz“, sagt Till Rehm. Dann kann es auch passieren, dass das eigens dafür vorgesehene Wechselnutzlerlabor voll steht mit Messgeräten und einige Woche lang Trubel herrscht. Davon bekommt Hannes Vogelmann in seinem Labor hoch oben aber nichts mit. Dort baut er derzeit gemeinsam mit seinem langjährigen Weggefährten Thomas Trickl ein zweites LIDAR-Gerät auf, das auf der Raman-Streuung beruht und Messungen der Wasserdampfkonzentration bis in Höhen von 30 Kilometer und der Temperatur sogar bis über 80 Kilometer erlauben soll. Schwierig ist jedoch die Finanzierung des für den langfristigen Betriebs erforderlichen Personals. Vogelmann erhält daher sein Geld zum Teil über ein Technologietransfer-Projekt mit einem Industriepartner in Nordrhein-Westfalen, der Teile seiner Entwicklungsarbeit vermarkten möchte. Die Wissenschaft komplett zu verlassen und in ein Unternehmen zu wechseln, kann sich der Familienvater, der in Grainau am Fuß der Zugspitze lebt, aber nicht vorstellen: „Dieses interdisziplinäre Forschungsgebiet, den Arbeitsplatz in einer großartigen Berglandschaft und die Sonnenauf- und -untergänge möchte ich nicht missen“.

Aus der geöffneten Kuppel schießt der Laserstrahl in den Nachthimmel. Zur Illustration wurde dieses Foto mit einem grünen Laser aufgenommen und nachbearbeitet, im tatsächlichen LIDAR-Experiment ist der Infrarotlaser unsichtbar. Die rechte Kuppel gehört zu dem neuen Raman-LIDAR.



Christophmalin.com