

**WIS** wissenschaft  
in die schulen!

# Das Sonnenteleskop

## Leistungsfähiges Observatorium auf Teneriffa nimmt Betrieb auf

*Die Kanareninsel Teneriffa gehört zu den besten Standorten für die beobachtende Astronomie in Europa. Deutsche Wissenschaftler erforschen bereits seit vierzig Jahren von dort aus den uns nächsten Stern, die Sonne. Mit GREGOR steht ihnen nun ein hochmodernes Sonnenteleskop zur Verfügung, das unser Tagesgestirn mit bislang unerreichter Qualität und Auflösung abbildet.*

Von Carsten Denker, Wolfgang Schmidt, Oskar von der Lüche und Reiner Volkmer

**A**uf einem 2400 Meter hohen Berggrücken, nur wenige Kilometer entfernt vom Pico del Teide, einem beeindruckenden Vulkankegel und Wahrzeichen von Teneriffa, steht ein neues Glanzstück europäischer Sonnenforschung: GREGOR ist das bisher größte und leistungsfähigste Sonnenteleskop, das unter der Leitung deutscher Wissenschaftler gebaut wurde.

Die ersten Ideen für ein neues deutsches Sonnenteleskop gehen auf das Jahr 1998 zurück. Zwei Jahre später wurde das Projekt einer breiteren Öffentlichkeit vorgestellt. Heute befindet sich GREGOR in einer Phase, in der die wissenschaftlichen Instrumente auf »Herz und Nieren« geprüft werden, um sie unter realen Bedingungen mit typischen Beobachtungsabläufen zu testen.

### Sonnenforschung mit GREGOR

Die veränderliche Aktivität der Sonne wird wesentlich durch das solare Magnetfeld gesteuert. Magnetische Prozesse sind auch verantwortlich für die meisten Vorgänge, die wir an der Oberfläche unseres Tagesgestirns beobachten. Das Magnetfeld liefert zudem den Antrieb für die gewaltigen Explosionen und Materieauswürfe, die sich in der Umgebung der

Erde in unterschiedlicher Form bemerkbar machen. Um die Sonne verstehen zu können, müssen wir daher in erster Linie verstehen, wie das solare Magnetfeld entsteht, wie es sich entwickelt und wie es wieder von der Oberfläche verschwindet.

Bei »Magnetfeld« denkt man zunächst an einen Stabmagneten, das heißt an einen Dipol, mit einem magnetischen Nordpol auf der einen und einem Südpol auf

### *Über Messungen im optischen Licht untersucht GREGOR die komplexen Magnetfeldstrukturen der Sonne.*

der anderen Seite. Für das Magnetfeld der Erde ist dies eine passende Vorstellung – da gibt es diesen Dipol, dessen Enden in der Nähe der geografischen Pole liegen, und der sich ansonsten nur sehr langsam, in Zeiträumen von Jahrtausenden ändert.

Das Magnetfeld der Sonne ist völlig anders: Es ist reich strukturiert, zeigt sich in Form von riesigen Sonnenflecken und anderen Erscheinungen. Die kleinsten magnetischen Strukturen sind deutlich kleiner als 100 Kilometer. Sonnenflecken erreichen bis zu 50 000 Kilometer Durchmesser. Protuberanzen wiederum erstrecken sich 100 000 Kilometer oder mehr in die Höhe. Die typischen Lebensdauern variieren dabei von Minuten bis Monaten.

Diese kurze Beschreibung skizziert auch die Herausforderungen, denen ein Sonnenteleskop genügen muss, damit die komplexen Magnetfeldstrukturen erforscht und verstanden werden können.

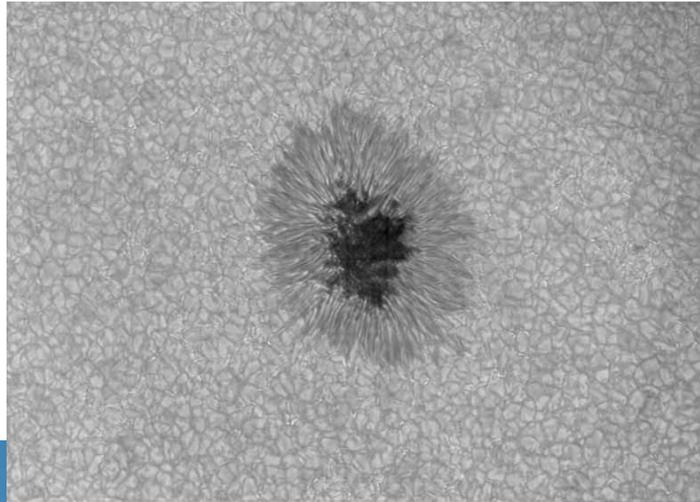
Mit GREGOR verfügen die Sonnenphysiker nun über ein leistungsfähiges Instrument, mit dem sie das Magnetfeld der Sonne quasi auf mikroskopischer Skala untersuchen können. Die Optik des

Teleskops ermöglicht eine Winkelauflösung von besser als einer Zehntel Bogensekunde, was einer räumlichen Auflösung von rund 50 Kilometern auf der Sonne entspricht. Mit GREGOR ließe sich der vorliegende Artikel aus einer Entfernung von 25 Kilometern problemlos lesen! Ohne Teleskop würde man aus dieser Entfernung nicht einmal die Zeitschrift erkennen.

Die Inbetriebnahme von GREGOR markiert den vorläufigen Höhepunkt einer Entwicklung von Sonnentelaskopen am Standort des Observatorio del Teide auf Teneriffa. Es begann bereits im Jahr 1972, als ein am Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik in Freiburg gebautes Newton-Teleskop mit 40 Zentimeter Öffnung in

# GREGOR

KIS



KIS

## DAS GRÖSSTE SONNENTELESKOP EUROPAS

Am Observatorio del Teide auf der Kanareninsel Teneriffa wurde am 21. Mai 2012 das Sonnentelerskop GREGOR mit seiner markanten Falkuppel eingeweiht. Mit einem Hauptspiegel von 1,5 Meter Durchmesser ist es das größte Instrument seiner Art in Europa. Es ermöglicht Beobachtungen der solaren Photosphäre und Chromosphäre im sichtbaren und infraroten Licht. Ein neues System adaptiver Optik kompensiert Störungen durch Turbulenzen in der Erdatmosphäre, so dass GREGOR die Sonne mit bislang unerreichter Qualität und Auflösung abbildet.

GREGOR ist ein Projekt deutscher Forschungseinrichtungen unter der Leitung des Kiepenheuer-Instituts für Sonnenphysik in Freiburg, mit dem Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam und dem Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Katlenburg-Lindau als Partnern. Weitere Beiträge zu Teleskop und Instrumenten lieferten das Institut für Astrophysik der Georg-August Universität Göttingen, das Instituto de Astrofísica de Canarias und das Astronomische Institut der Tschechischen Akademie der Wissenschaften.

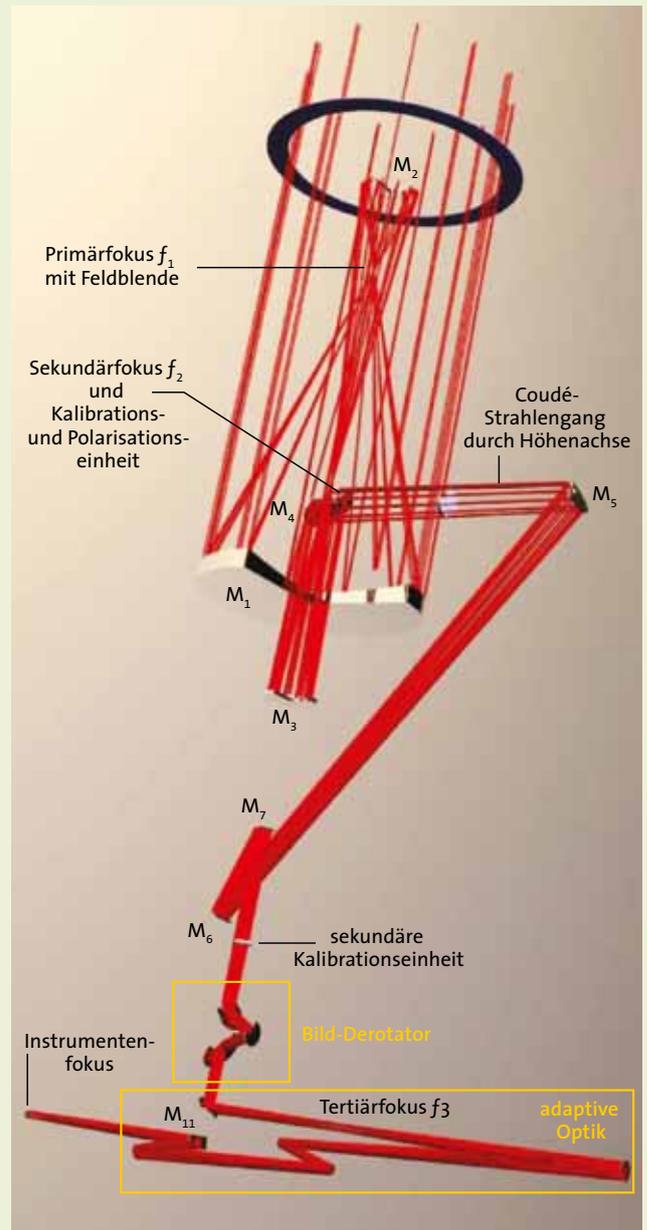
## Der optische Strahlengang des Sonnentelekops GREGOR

Die Optik von GREGOR ist nach einem Prinzip konstruiert, das der schottische Mathematiker und Astronom James Gregory (1638–1675) ersann. Hierbei wird das vom parabolischen Hauptspiegel  $M_1$  aufgefangene Sonnenlicht in einem Brennpunkt  $f_1$  fokussiert und fällt dann auf einen konkaven, elliptisch geformten Sekundärspiegel  $M_2$ , der das Strahlenbündel in dem zweiten Brennpunkt  $f_2$  erneut fokussiert.  $f_1$  und  $f_2$  bilden die Brennpunkte eines Ellipsoids, das durch die Krümmung des Sekundärspiegels  $M_2$  definiert wird. Der Sekundärspiegel verlängert also die Brennweite und vergrößert das Primärbild.

Hinter dem Sekundärfokus  $f_2$  fächert das Strahlenbündel wieder auf und fällt durch eine zentrale Bohrung im Hauptspiegel  $M_1$  auf den dritten abbildenden Spiegel  $M_3$ . Dieser ist ebenfalls elliptisch geformt und bildet den Sekundärfokus  $f_2$  mit Hilfe von Planspiegeln ( $M_4$  bis  $M_7$ ) auf den tertiären Fokus  $f_3$  im Optiklabor unter dem Teleskop ab.

Der Hauptspiegel von 1,5 Meter Durchmesser besteht aus der Glaskeramik Zerodur, ist in Leichtbauweise hergestellt und wird temperaturstabilisiert. Eine gekühlte Feldblende an  $f_1$  begrenzt das Gesichtsfeld auf nominell 150 Bogensekunden (maximal 300 Bogensekunden) und reflektiert das nicht genutzte Licht aus dem Teleskop, um eine unerwünschte Erwärmung zu verhindern. Eine Kalibrations- und Polarimetrie-Einheit ist in der Nähe der Sekundärfokalebene in der Symmetrieachse des Teleskoptubus eingebaut.

Zum Fokussieren im tertiären Fokus  $f_3$  lässt sich der Spiegel  $M_3$  axial verschieben. Die Bildrotation, verursacht durch die azimutale Nachführung, kann durch einen in den Strahlengang hinein bewegbaren Bild-Derotator mit drei Spiegeln kompensiert werden. Ein ebener Spiegel  $M_{11}$  lenkt den Strahl horizontal in die adaptive Optik. Der durch diese erzeugte Instrumentenfokus kann durch einen rotierenden Umlenkspiegel auf verschiedene Postfokus-Instrumente verteilt werden.



einem schon vorhandenen Turm des Observatoriums installiert wurde.

Anlass dieses Aufbaus war eine partielle Sonnenfinsternis im Jahr 1973. Die Beobachtungen mit dem Newton-Teleskop waren von hervorragender Qualität und führten zu viel beachteten wissenschaftlichen Ergebnissen. Diese Resultate belegten die hervorragende Qualität des Standorts in den 2400 Meter hohen Bergen der Insel Teneriffa. Ende der 1970er Jahre wurde dieser Befund durch ausgedehnte Messungen vor Ort und durch Vergleich mit anderen Standorten bestätigt.

So wurde 1983 in direkter Nachbarschaft zum Newton-Teleskop das Gregory-Coudé-Teleskop mit 45 Zentimeter Öffnung in einem 22 Meter hohen Gebäude errichtet. Das von der Universitätsstern-

warte Göttingen betriebene Gerät wurde aus der Schweiz an den neuen Standort verlegt. Gleichzeitig entstand das 50 Meter hohe Gebäude für das 70-Zentimeter-Vakuumturmteleskop des Kiepenheuer-Instituts für Sonnenphysik, das 1987 fertig gestellt wurde. Dieses Teleskop ist bis heute ein zuverlässiges und produktives »Arbeitspferd« für die Sonnenphysiker in Deutschland, Europa und darüber hinaus.

Das Gregory-Coudé-Teleskop wurde 2002 samt seiner Kuppel von seinem Standort entfernt, um Platz zu machen für GREGOR. Die Entscheidung, das vorhandene Gebäude weiter zu verwenden, hat erhebliche Vorteile, aber auch einige Nachteile, die beispielsweise in einem etwas komplizierten optischen Design zum Ausdruck kamen.

### Eigenschaften von GREGOR

Je größer der Teleskopspiegel, desto mehr Licht sammelt er von dem beobachteten Objekt. Andererseits steigt die räumliche Auflösung linear mit dem Durchmesser der Teleskopöffnung. Mit größeren Spiegeln lassen sich also kleinere Strukturen untersuchen. Eine genaue Betrachtung zeigt, dass die Lichtmenge, die von der kleinsten gerade noch auflösbaren Fläche kommt, stets gleich ist. Mit der Öffnung von 1,5 Metern bietet GREGOR nun die Möglichkeit, entweder die aller kleinsten Strukturen mit der bisherigen Genauigkeit zu vermessen, oder aber – mit reduzierter Auflösung – die Messgenauigkeit erheblich zu steigern.

Für Magnetfeldmessungen sind Beobachtungen im infraroten Spektralbereich

Im Optiklabor unterhalb von GREGOR befinden sich die Beobachtungsinstrumente. Eines von ihnen ist ein Fabry-Pérot-Interferometer, das schmalbandige Sonnenbilder aufnimmt, indem es eine Spektrallinie Schritt für Schritt abtastet. Aus den Daten werden Informationen über Magnet- und Geschwindigkeitsfelder extrahiert, die eine hohe zeitliche Auflösung besitzen.



KIS

sehr geeignet, weil die Empfindlichkeit für das Magnetfeld mit dem Quadrat der Wellenlänge der untersuchten Spektrallinien zunimmt. Bei 1,5 Mikrometer (im Infraroten) kann man das Magnetfeld somit fast zehnmal genauer messen als bei 500 Nanometer (im sichtbaren Spektralbereich). Dank der großen Öffnung von GREGOR kann man nun im Infraroten messen und die hohe Empfindlichkeit mit guter räumlicher Auflösung verbinden. Der große nutzbare Wellenlängenbereich vom nahen Ultraviolett über den sichtbaren Spektralbereich bis zu Wellenlängen oberhalb 2 Mikrometer erlaubt eine Vielzahl von Experimenten in unterschiedlichen Schichten der Sonnenatmosphäre und somit räumliche tomografische Messungen.

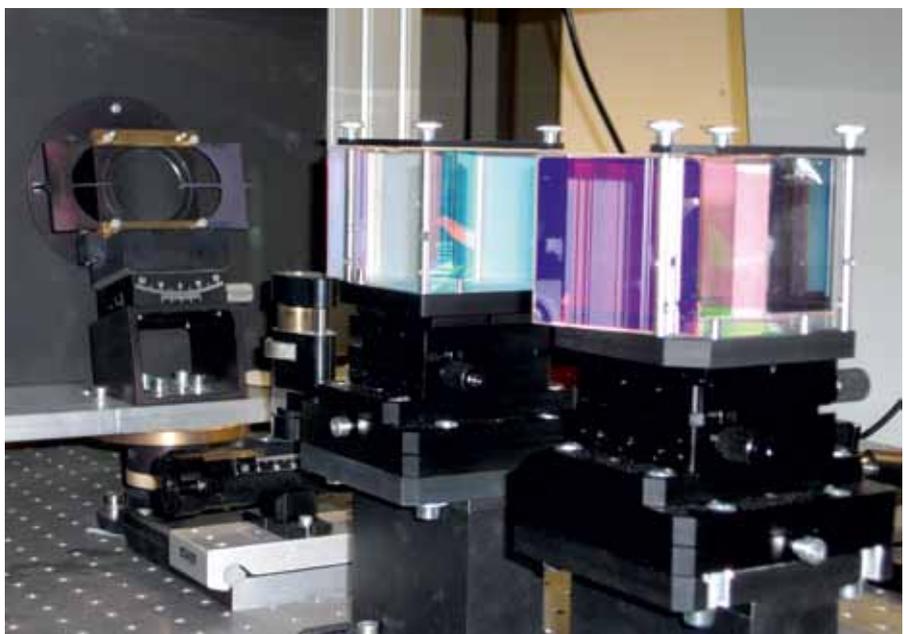
■ **Wissenschaftliche Ziele:** GREGOR ist zwar spezialisiert für Magnetfeldmessungen, ist aber keinesfalls darauf eingeschränkt. Das Messen von Magnetfeld ist sozusagen die »Königsdisziplin«, alles andere geht dann sowieso. Zu den wissenschaftlichen Zielen von GREGOR gehören vorrangig folgende Schlüsselthemen der Sonnenphysik:

- die Wechselwirkung zwischen der Konvektion in den oberen Schichten der Sonne und dem solaren Magnetfeld,
- das Entstehen und Vergehen von Sonnenflecken,
- das Magnetfeld und die Variation der Sonnenhelligkeit und
- die Aufheizung der äußeren Sonnenatmosphäre.

■ **Das GREGOR-Projekt:** Das Sonnenteleskop GREGOR ersetzt das frühere Gregory-Coudé-Teleskop. Daraus leitet sich auch der Name ab, der keine Abkürzung ist, sondern durch die Großschreibung andeutet, dass der GREGOR-Spiegel mit 1,5 Meter Durchmesser mehr als dreimal so groß ist wie der seines Vorgängers. GREGOR ist damit sozusagen der große Bruder des nun außer Betrieb genommenen Gregory-Coudé-Teleskops. Dieses verwandtschaftliche Verhältnis spiegelt sich in einer Reihe von optischen und mechanischen Designprinzipien wider, die im neuen Teleskop zum Einsatz kamen.

Der schottische Mathematiker und Astronom James Gregory (1638–1675) hatte die geniale Idee, einen elliptischen

Pentaprismen spalten das Sonnenlicht auf, so dass gleichzeitig im sichtbaren und infraroten Wellenlängenbereich beobachtet werden kann. Im Hintergrund ist der Eintrittsspalt des Infrarotspektrografen zu sehen.



KIS



KIS

Eine verwindungssteife Mechanik charakterisiert das Sonnenteleoskop GREGOR. Hier der Blick auf den elliptischen Sekundärspiegel und die Bildfeldblende, die als gleißend heller Fleck erscheint und einen Großteil des Sonnenlichts aus dem Teleskop heraus lenkt.



KIS

Vor dem Hauptspiegel mit einem Durchmesser von 1,5 Metern befinden sich die Kalibrationseinheit für polarimetrische Messungen und ein Umlenkspiegel, der das Licht durch die Höhenachse des Teleskops lenkt.

Sekundärspiegel für die Teleskopoptik zu benutzen. Die zwei Brennpunkte einer Ellipse erlauben es, im ersten Fokus eine Bildfeldblende einzusetzen, so dass ein kleiner Ausschnitt der Sonnenoberfläche und nicht die gesamte Sonnenscheibe beobachtet werden kann. Das restliche Licht wird einfach von der verspiegelten Blende aus dem Teleskop heraus gelenkt. Dies hat den Vorteil, dass die Luft im Teleskoptubus nicht erwärmt wird und es nicht zu turbulenten Bewegungen kommt, welche die Bildqualität beeinträchtigen würden. Aus diesem Grund sind die meisten der heutigen Sonnentelkope nach dem Gregory-Prinzip konzipiert.

GREGOR benutzt sogar eine doppelte Gregory-Konfiguration, wobei der zweite elliptische Spiegel das Einsetzen einer Kalibrationseinheit ermöglicht, mit der sich die instrumentelle Polarisation sehr genau bestimmen lässt (siehe Kasten S. 48).

■ **Offenes Design:** Konventionelle Sonnentelkope, bei denen der Tubus zur Vermeidung von Luftturbulenzen evakuiert ist, stoßen bei einer Öffnung von etwa einem Meter an technische Grenzen. Größere Eintrittsfenster müssten sehr dick sein, damit sie dem von außen wirkenden

Luftdruck widerstehen, wären dann aber fast lichtundurchlässig. Außerdem ist es schwer, jederzeit eine gute optische Qualität zu gewährleisten, wenn die Optik nur am Rand gefasst werden kann. Deshalb werden große Sonnentelkope heute offen gebaut, so dass sie von der Umgebungsluft umspült werden. Viele Eigenschaften dieses »offenen Prinzips«, wie es bei GREGOR angewandt wurde, lassen sich auch beim Dutch Open Telescope (DOT) des Roque de los Muchachos Observatory auf der Nachbarinsel La Palma erkennen.

Die Teleskopstruktur muss winddurchlässig sein, damit sich Stahlträger und Optik leicht der Umgebungstemperatur anpassen können. Allerdings darf dabei nicht die Stabilität des Teleskops beeinträchtigt werden. Vibrationen oder ein Ruckeln der Teleskopstruktur würden sonst zu einem Bildversatz in den wissenschaftlichen Instrumenten führen.

Das auffälligste Detail eines offenen Designs ist die zusammenfaltbare Kuppel. Jeweils drei Kuppelsegmente sind an zwei beweglichen Stahlbögen befestigt, die während der Beobachtungen heruntergeklappt werden. Das Kuppelmaterial ist ein Kunststoff, der auch in Segeln und als Lkw-Plane seine Anwendung findet.

Das doppelwandige Zeltdach verhindert Kondensation im Kuppelinneren, und eine Teflonbeschichtung sorgt dafür, dass sich Schnee und Eis im Winter nicht auf der Zeltoberfläche absetzen können. Die Zeltsegmente sind als Minimalflächen zugeschnitten, so dass sie bei geschlossener Kuppel straff zwischen den Stahlbögen und weiteren Stahlrippen gespannt sind. Dazu wird die Kuppel, kurz bevor sie vollständig geschlossen ist, von zwei Greifarmen mit zwei Tonnen Zugkraft zusammengezogen.

Diese Kuppelkonstruktion ist so stabil, dass weder die widrige Winterwitterung im Gebirge noch ein Sturm, der im Jahr 2006 mit Geschwindigkeiten von mehr als 250 Kilometern pro Stunde um das Teleskopgebäude toste, Schäden anrichten konnten. Selbst bei Windgeschwindigkeiten von 20 Metern pro Sekunde lässt sich die Kuppel im Beobachtungsbetrieb noch problemlos öffnen und schließen.

Die Zeltkuppeln von DOT und GREGOR sind Prototypen für noch größere Bauvorhaben, wie sie beispielsweise für das European Solar Telescope (EST) notwendig sein werden. Deshalb sind beide Kuppeln und Teleskope mit einer umfangreichen Sammlung von Sensoren ausgestattet.

Wind, Luftfeuchte und Druck werden an mehreren Stellen mit hoher zeitlicher Auflösung gemessen. Des Weiteren kommen Messeinrichtungen zur optischen Triangulation zum Einsatz. Diese Sensoren basieren auf dem Prinzip einer optischen Computermaus und vermessen sehr genau die Verformung der Kuppelstruktur unter einer Windlast. Das von den Sensoren verwendete Laserlicht verleiht den Kuppeln in der Nacht einen roten Schein, der aber so schwach ist, dass er die anderen Teleskope am Observatorium nicht beeinträchtigt (siehe Bild unten).

■ **Die Teleskopstruktur:** Stahlstreben halten Sekundärspiegel, Feldblende und Kalibrationseinheit im richtigen Abstand vom Hauptspiegel, der in einer Zelle mit axialen und tangentialen Halterungen so aufgehängt ist, dass er in jeder Position seine Form behält. Die gesamte mechanische Konstruktion wurde im Vorfeld sehr genau auf Computern simuliert, um die beste Lösung für eine stabile und zugleich leichte Konstruktion zu finden. Die verbleibende Deformierung des Hauptspiegels und die Verbiegung der Teleskopstruktur sind so gering, dass sie keinen Einfluss auf die Bildqualität haben.

Da Haupt- und Sekundärspiegel stark gekrümmt sind, würden schon kleine Abweichungen von ihrer Idealposition zu starken Abbildungsfehlern führen. Deshalb ist der Sekundärspiegel auf einem Hexapod (einem »Sechsbein«) montiert, der sich sehr präzise in allen Translations- und Rotationsachsen bewegen lässt. Das Teleskop kann mit einer Genauigkeit von etwa zwei bis drei Bogensekunden positioniert werden. Überprüft wurde das, indem eine Vielzahl von Sternen am gesamten Nachthimmel beobachtet wurde. Die Abweichungen der gemessenen Sternörter von den Katalogwerten werden dann in einem Modell zusammengefasst, das für jede Stellung der Höhen- und Stundenachse die genauen Korrekturwerte für die Positionierung bereitstellt.

■ **Thermische Kontrolle:** In einem offenen Teleskop ist sehr genau darauf zu achten, dass es zu keinen Abweichungen von der Umgebungstemperatur kommt. Beim Hauptspiegel würde schon eine relative Temperaturerhöhung von 2 Grad Celsius Turbulenzen direkt oberhalb der Spiegeloberfläche erzeugen. Ein mit Aluminium beschichteter Spiegel absorbiert

etwa zehn Prozent der Sonnenstrahlung. Ohne aktive Luftkühlung auf der Rückseite könnte der erlaubte Temperaturbereich nicht eingehalten werden. Alle der Sonne zugewandten Teile der Teleskopstruktur sind mit weißer Farbe gestrichen, die Titandioxid enthält. Sie reflektiert das Sonnenlicht im optischen Wellenlängenbereich und emittiert Wärmestrahlung im Infraroten.

■ **Die Teleskopoptik:** Der parabolische Hauptspiegel hat eine Öffnung von  $D = 150$  und eine Brennweite von 250 Zentimetern. Die beiden elliptischen Sekundär- und Tertiärspiegel mit Öffnungen von 40 und 30 Zentimetern haben Brennweiten von 52 und 140 Zentimetern. In dieser doppelten Gregory-Anordnung ergibt sich eine effektive Brennweite  $f_{\text{eff}}$  von fast 59 Metern (Öffnungsverhältnis von  $D/f_{\text{eff}} = 1/39$ ), obwohl das eigentliche Teleskop nur wenige Meter groß ist. Nach der Faustformel »Teleskopbrennweite in Meter ergibt Sonnenbild in Zentimeter« ergäbe sich ein fast 60 Zentimeter großes Sonnenbild. Allerdings wird nur ein kleiner Ausschnitt der Sonnenoberfläche mit einem Durchmesser von 180 Bogensekunden beobachtet (das entspricht etwa einem Zehntel des Winkeldurchmessers der Sonnenscheibe). Durch Austausch der Bildfeldblende im Primärfokus kann

das Bildfeld aber auf 300 Bogensekunden Durchmesser erweitert werden. Die Bildskala im Fokus der adaptiven Optik beträgt 3,5 Bogensekunden pro Millimeter.

■ **Spiegelmaterialien:** Die thermischen Eigenschaften der Spiegelmaterialien sind von entscheidender Bedeutung für die Leistungsfähigkeit eines Sonnentelekops. Ursprünglich sollten alle drei abbildenden Spiegel aus Cesium hergestellt werden, einem extrem steifen Material aus einer Kohlenstoff-Silizium-Verbindung, das eine hohe Wärmeleitfähigkeit besitzt. Allerdings traten Probleme im Herstellungsprozess auf, so dass schließlich nur die kleineren, elliptischen Sekundär- und Tertiärspiegel aus diesem Material gefertigt wurden. Der 1,5 Meter große Hauptspiegel besteht aus der Glaskeramik Zerodur, die in vielen Teleskopen zum Einsatz kommt. Um Gewicht zu sparen und um eine gute Kühlung der Spiegel zu ermöglichen, sind alle Spiegel leichtgewichtet, das heißt, eine dünne Spiegelfläche wird von einer stabilen Wabenstruktur getragen. Die Öffnungen auf der Rückseite des Hauptspiegels werden zusätzlich dazu genutzt, um mit kleinen Düsen kühle Luft auf die Spiegelfläche zu blasen, damit es keine signifikanten Temperaturunterschiede zwischen Spiegelfläche und Umgebung gibt.



Optische Bewegungssensoren verleihen der GREGOR-Kuppel einen schwachen rötlichen Schein, der sich in dieser Langzeitbelichtung deutlich vor der Silhouette des Vulkankegels des Pico del Teide abhebt.



KIS

**Die beiden deutschen Sonnentelkope GREGOR und VTT (Vakuumturmteleskop) sind an ihren hohen Gebäuden leicht zu erkennen.**

Neben einer konventionellen adaptiven Optik, die Wellenfrontstörungen direkt vor der Eintrittsöffnung des Teleskops korrigiert, ist von Anfang an auch eine multi-konjugierte adaptive Optik vorgesehen. Sie korrigiert auch störende Beiträge von höheren Luftschichten, wo beispielsweise in der Höhe des Jetstreams starke Scherwinde auftreten können. Multi-konjugierte adaptive Optik hat den entscheidenden Vorteil, dass sie ein größeres Bildfeld korrigiert. Zusammen mit Methoden der Bildrekonstruktion können so Daten gewonnen werden, die nahe am theoretischen Auflösungsvermögen des Teleskops liegen.

■ **Kalibrierung des polarisierten Sonnenlichts:** Die abbildende Optik besteht aus den ersten drei Spiegeln ( $M_1$  bis  $M_3$  in der Grafik S. 48). Alle nachfolgenden Spiegel sind Planspiegel, die das Licht zuerst in die Höhen- und danach in die Stundenachse lenken. So wird das Licht in ein Optiklabor gebracht, in dem sich die adaptive Optik und die Beobachtungsinstrumente befinden. Die azimuthale Montierung des GREGOR-Teleskops führt zu einer Bildfelddrehung, wenn die Sonne im Lauf des Tages am Himmel verfolgt wird. Fällt Licht unter einem Winkel auf eine Spiegeloberfläche, so ändern sich seine Polarisationsseigenschaften. Diese sollen aber gerade untersucht werden, um Aufschluss über das Sonnenmagnetfeld zu erhalten. Da die instrumentelle Polarisation zeitabhängig ist, muss ein Weg gefunden werden, sie zu kalibrieren.

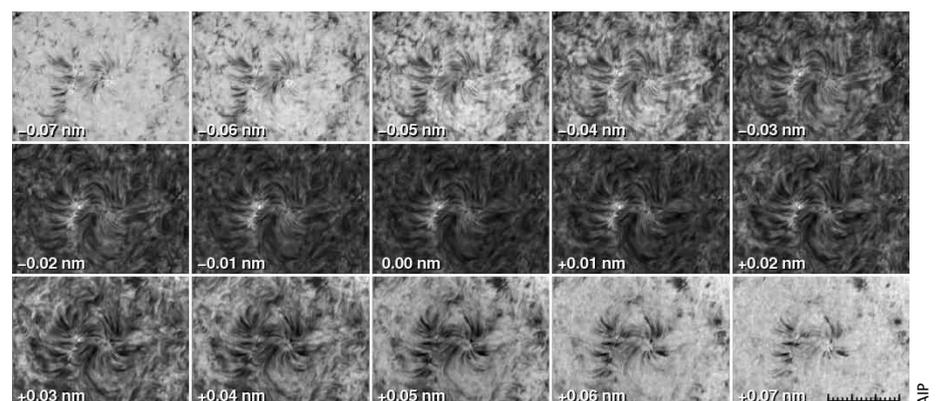
Eine Kalibrationseinheit befindet sich im Fokus zwischen Sekundär- und Tertiärspiegeln. Motorisch lassen sich Linearpolarisatoren und Verzögerungsplatten in das Lichtbündel fahren. Beide optischen Elemente sind drehbar, so dass dem Son-

nenlicht eine wohl definierte Polarisationsaufprägung gegeben werden kann. Aus diesen Kalibrationsmessungen wird ein Modell erstellt, das Korrekturwerte für jede Position des Teleskops enthält. Die Beiträge von linearer und zirkularer Polarisation lassen sich auf diese Weise mit einer Genauigkeit von 1:10000 bezogen auf die Kontinuumsintensität bestimmen.

■ **Die adaptive Optik:** Ohne adaptive Optik könnten moderne Teleskope heute nicht einmal ansatzweise ihr wissenschaftliches Potenzial entfalten. Die adaptive Optik wird zwischen Teleskop und Beobachtungsinstrument geschaltet. Mit einem Wellenfrontsensor werden die Verformungen von Wellenfronten gemessen, die sie auf dem Weg durch die turbulente Erdatmosphäre erleiden. Aber auch statische Abbildungsfehler vom Teleskop selbst können bestimmt werden. Diese Messungen werden mit hoher Zeitauflösung durchgeführt (etwa 2000 Hertz) und in Echtzeit umgerechnet in Stellwerte für einen verformbaren Spiegel, der diese Wellenfrontfehler korrigiert.

■ **Instrumente zur Sonnenbeobachtung**  
Auf den Kameraspiegel der adaptiven Optik folgt ein Spiegel auf einer rotierbaren Montierung, mit dem das Sonnenlicht zu verschiedenen Beobachtungsinstrumenten geleitet werden kann. Pentaprismen, die spezielle Dünnschichtfilme tragen, spalten das Licht in verschiedene Wellenlängenbereiche auf (siehe Bild S. 49 unten). Auf diese Weise können verschiedene Instrumente gleichzeitig betrieben werden. Es ist beispielsweise möglich, für eine Beobachtungskampagne ein Gastinstrument ans GREGOR-Teleskop zu bringen. Der Wellenfrontsensor erhält einen kleinen Anteil des grünen Lichts, und das sichtbare beziehungsweise infrarote Licht wird auf zwei spektroskopische Instrumente aufgeteilt. Mit diesen Maßnahmen werden die von der Sonne emittierten Photonen effizient genutzt, und auch das Spektrum der wissenschaftlichen Fragestellungen wird so erweitert.

**Das Fabry-Pérot-Interferometer erzeugt Scans durch einzelne Spektrallinien – hier durch die starke chromosphärische Absorptionslinie H-alpha des neutralen Wasserstoffs. In den einzelnen Bildern ist der Abstand von der Zentralwellenlänge in Nanometern angegeben.**



Im Infraroten wird ein Czerny-Turner-Spektrograf verwendet, der Licht durch Beugung an einem Gitter in diskrete Wellenlängen aufteilt und im Bereich von 1,0 bis 1,8 Mikrometer Daten mit hoher spektraler Auflösung aufnimmt. In diesem Wellenlängenbereich liegen viele interessante Spektrallinien. Da die Aufspaltung einer Linie im Magnetfeld durch den Zeemaneffekt proportional zum Quadrat der Wellenlänge ist, bieten die photosphärischen Linien des neutralen Eisenatoms bei 1,56 Mikrometer eine exzellente Möglichkeit, selbst schwächste Magnetfelder zu messen. Die chromosphärische Linie des neutralen Heliums bei 1,083 Mikrometer ist dagegen ein gutes diagnostisches Hilfsmittel für Filamente auf der Sonnenscheibe und für Protuberanzen am Sonnenrand. Der Spektrografenspalt hat eine Länge von 70 Bogensekunden.

***GREGOR misst nicht nur schwächste Magnetfelder auf der Sonne, sondern kann auch nachts eingesetzt werden.***

Die zweite Raumrichtung kann abgetastet werden, indem das Sonnenbild gegenüber der vorherigen Aufnahme jeweils um ein kleines Stück versetzt wird. Dabei dauert es etwa 20 Minuten, um ein Gebiet von 70 Bogensekunden zu scannen.

Das zweite Instrument für Spektroskopie und Polarimetrie ist ein Fabry-Pérot-Interferometer. Es lässt nur Licht aus einem engen Wellenlängenbereich durch. Das einfallende Licht wird hierzu zwischen zwei parallelen, verspiegelten Glasplatten vielfach hin- und her reflektiert. Nur Licht, das die durch den Abstand der Glasplatten vorgegebene Interferenzbedingung erfüllt, passiert das Interferometer. Auf diese Weise entsteht aus einem anfangs breitbandigen Lichtstrahl einer, der nur Licht aus einem sehr schmalen Wellenlängenbereich enthält. Durch Verstellen des Plattenabstands kann der Durchlassbereich leicht verändert werden.

Eine Serie solcher schmalbandigen Bilder ergibt dann einen dreidimensionalen Datenkubus mit zwei Raumdimensionen und einer Wellenlängenachse. Das Bildfeld beträgt 52 Bogensekunden × 40 Bogensekunden (siehe Bild links). Mit einem Fabry-Pérot-Interferometer lässt sich eine Spektrallinie innerhalb einer relativ kurzen Zeit von etwa einer Minute abtasten. Damit ist dieses Instrument insbesondere für die Beobachtung dynamischer Prozesse geeignet.

Neben den spektroskopischen Instrumenten gibt es noch großformatige CCD-Kameras mit 10 Megapixeln, mit denen ein großes Bildfeld beobachtet werden kann. Mit einer Bildrate von fünf Bildern pro Sekunde sind ihre Daten auch für die Bildrekonstruktion geeignet. Hierbei wird angenommen, dass in einer kurz belichteten Sonnenaufnahme die Turbulenz der Erdatmosphäre »eingefroren« ist. In einer Zeitserie ändert sich also nur der Beitrag der turbulenten Erdatmosphäre, nicht aber das beobachtete Objekt selbst. Mit geschickten mathematischen Verfahren lässt sich das beobachtete Objekt rekonstruieren, als hätte es keine störenden Einflüsse gegeben.

Mit einer geeigneten Auswahl von Filtern lassen sich verschiedene Schichten in der Sonnenatmosphäre beobachten. Filter für die beiden H- und K-Linien des einfach

ionisierten Kalziums geben beispielsweise Auskunft über die Chromosphäre. Ein weiterer beliebter Spektralbereich ist das Fraunhofersche G-Band, wo die besonderen Eigenschaften von Molekülen aus Kohlenstoff und Stickstoff (CN) beziehungsweise Kohlenstoff und Wasserstoff (CH) ausgenutzt werden, um kleinskalige Magnetfelder zu verfolgen, die in den Bildern als kleine Aufhellungen erscheinen.

**GREGOR bei Nacht**

Ist die Sonne ein besonderer Stern? Eigentlich sollte diese Frage einfach zu beantworten sein. Allerdings ist die Datenlage schwierig. Bisher gibt es nur zwei weitere Sterne, die der Sonne sehr ähnlich sind. Dies ist aber nur ein Auswahlereffekt. Obwohl die Sonne für das Leben auf der Erde eine herausragende Rolle spielt, erschien sie uns als ein lichtschwacher Stern, wenn wir sie vom Ort der uns am nächsten stehenden Sterne betrachteten.

Um weitere sonnenähnliche Sterne zu entdecken, bedarf es einer Durchmusterung von potenziellen Kandidaten in der Nachbarschaft der Sonne. Da Durchmusterungen zeitaufwändig sind, muss ein Teleskop mit einem leistungsfähigen Spektrografen für lange Zeiträume frei verfügbar sein. Das Sonnenteleskop GREGOR kommt so auch in der Nacht nicht zur Ruhe, wenn es sich auf die Suche nach den Zwillingen der Sonne begibt.



**CARSTEN DENKER** ist Leiter der Arbeitsgruppe für optische Sonnenphysik und des »Sonnenobservatoriums Einsteinurm« am Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam. Er beschäftigt sich mit Physik von Sonnenflecken und der Sonnenaktivität in all ihren Facetten, wozu er Beobachtungsinstrumente und Methoden zur Bildrekonstruktion entwickelt. Er lehrt an der Universität Potsdam und der Humboldt-Universität zu Berlin.



**WOLFGANG SCHMIDT** leitet die Abteilung für experimentelle Sonnenphysik am Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik in Freiburg. Er befasst sich mit der Entwicklung von Einrichtungen

zur Sonnenbeobachtung mit maßgeblichen Beiträgen zum Vakuumturmteleskop und GREGOR auf Teneriffa sowie zum Ballonteleoskop »Sunrise«. An der Universität Freiburg hält er Vorlesungen über Grundlagen und angewandte Methoden der Astrophysik.



**OSKAR VON DER LÜHE** ist Direktor des Kiepenheuer-Instituts für Sonnenphysik und Professor an der Universität Freiburg. Er befasst sich mit der Entwicklung von Instrumenten für die

astronomische Beobachtung an großen Sonnentelaskopen und mit Methoden zur hohen räumlichen Auflösung, adaptive Optik und Bildrekonstruktion. Er lehrt Grundlagen und angewandte Methoden der Astrophysik und Optik.



**REINER VOLKMER** studierte Physik und Astronomie an der Universität Göttingen mit Schwerpunkt Sonnenphysik. Nach seiner Promotion war er Projektleiter in Tübingen für das Datenver-

arbeitungssystem vom Instrument IBIS auf dem Satelliten INTEGRAL. Seit zehn Jahren leitet er das GREGOR-Projekt am Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik in Freiburg.