

Am Puls der Sonne

Wie ein ruhig leuchtender Gasball erscheint uns die Sonne am Himmel. In Wirklichkeit brodelt es in ihrem Innern und der ganze Körper vibriert wie eine Glocke. Ähnlich wie Geophysiker den Aufbau unseres Planeten mithilfe von Erdbebenwellen erkunden, nutzen Sonnenforscher die Schwingungen des Tagesgestirns, um in dessen Eingeweide zu blicken.

LAURENT GIZON vom **MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR SONNENSYSTEM-FORSCHUNG** in Katlenburg-Lindau studiert auf diese Weise das Magnetfeld der Sonne. Und will diese Methode auch auf ferne Sterne anwenden.

Im Innern der Sonne steigen unablässig heiße Gasmassen zur Oberfläche auf, kühlen ab und sinken wieder zurück. Dieses Auf und Ab von Materie, das man in ähnlicher Weise in einem Kochtopf beobachten kann, bezeichnen Physiker als Konvektion. Häufig entsteht dabei ein Muster aus deutlich abgegrenzten Zellen, die man auf der Sonne als Granulen beobachtet. Diese Konvektion erzeugt auch Schallwellen, die den Sonnenkörper durchlaufen und ihn zum Schwingen bringen, ähnlich wie ein Klöppel eine Glocke. Der gesamte Gasball wabert wie ein mit Wasser gefüllter Ballon.

Auf dieses Phänomen stießen erstmals vor etwa 40 Jahren Forscher um Robert Leighton vom California Institute of Technology. Sie registrierten eine Pulsation in lokalen Bereichen der oberen Sonnenschichten mit einer Periode von etwa fünf Minuten. Dabei heben und senken sich diese Regionen um wenige Kilometer mit Geschwindigkeiten bis zu 1800 Kilometern pro Stunde. Kurze Zeit nach dieser Beobachtung wurde bereits die Vermutung geäußert, dass akustische Wellen diese Schwingun-

gen erzeugen könnten. Diese Interpretation bestätigte 1975 der deutsche Sonnenphysiker Franz-Ludwig Deubner mit verbesserten Beobachtungen. Eine neue Disziplin war geboren: die Helioseismologie.

Die Erforschung dieser solaren Oszillationen erfordert lange, nahezu ununterbrochene Beobachtungen der Sonnenoberfläche. Möglich ist das heute durch ein weltweites Netz von erdgebundenen Teleskopen und vor allem durch das europäisch-amerikanische Weltraumobservatorium *SOHO*. Seit 1996 liefert es fast ohne Unterbrechung pro Minute eine Aufnahme vom Geschwindigkeitsfeld an der Sonnenoberfläche.

EIN SPEKTRUM MIT VIELEN ÄSTEN

Heute wissen wir, dass die von Leighton entdeckte Fünf-Minuten-Oszillation eine Überlagerung von Millionen von Schwingungsmoden mit unterschiedlichen Frequenzen ist. Die Art und Weise, wie Frequenz und Wellenlänge aneinander gekoppelt sind, gibt Auskunft über die Art der Wellen und somit über den inneren Aufbau der Sonne. Sonnenphysiker tragen diesen

Recht friedlich präsentiert sich eine blaue Sonne auf diesem Bild des Satelliten SOHO. Doch die Lichtbögen am linken und rechten Rand sowie die körnige Oberfläche lassen erahnen: Der Stern, von dem wir leben, ist ständig in Aufruhr.

Foto: SOHO/ESA/NASA

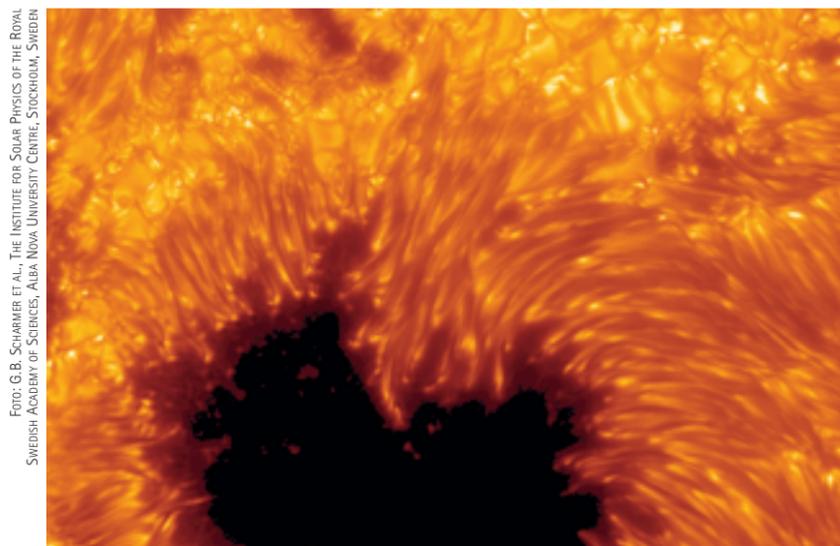


Foto: G.B. SCHARNER ET AL., THE INSTITUTE FOR SOLAR PHYSICS OF THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES, ALBA NOVA UNIVERSITY CENTRE, STOCKHOLM, SWEDEN

Besonders turbulent geht es in der Umgebung von Sonnenflecken zu. Helioseismologen eröffnet sich hier ein fruchtbares Forschungsfeld.

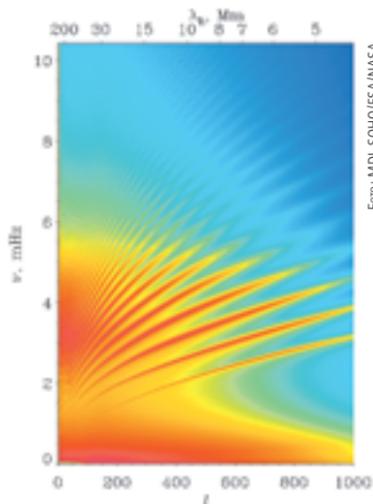


Foto: MDI-SOHO/JESA/NASA

Das Leistungsspektrum zeigt die gemessenen Schwingungsmoden. Jeder Ast stellt ein Verhältnis zwischen Frequenz und Wellenlänge der Schwingungen her.

Zusammenhang in einem Leistungsspektrum auf. Darin entspricht der unterste Ast bei geringsten Frequenzen horizontal wandernden Oberflächenwellen, die denen auf einer Wasseroberfläche ähneln. Alle anderen Äste entsprechen verschiedenen Obertönen der akustischen Schwingungsmoden. Bei größten Wellenlängen erfassen die Oszillationsmoden die tiefsten Schichten der Sonne.

In der globalen Helioseismologie konstruiert man dann aus den Messwerten der Millionen von Oszillati-

onsfrequenzen ein Sonnenmodell. Hierbei wird eine Reihe von physikalischen Größen berücksichtigt, wie Temperatur, Dichte, Druck und Geschwindigkeit der Gasströmung in Abhängigkeit von der Tiefe und der heliografischen Breite.

Die globale Helioseismologie kann bereits auf eine ganze Reihe von Erfolgen zurückblicken. In der modernen Astrophysik spielen die Standardtheorien über Aufbau und Entwicklung der Sterne eine zentrale Rolle. Heutige Modelle beschreiben nicht nur den Aufbau der Sterne, sondern sagen auch deren Entwicklung voraus. Insbesondere ermöglichen sie es den Astrophysikern, Alter und chemische Zusammensetzung von Galaxien und dem Universum als Ganzem einzuschränken. Die Sonne ist ein wichtiger Testfall für diese Theorien, denn sie ist der nächstgelegene Stern. Kein anderer Stern lässt sich so genau untersuchen wie sie.

GASBLASEN ALS ENERGIEBÜNDEL

Ein entscheidender Punkt in den Sternmodellen ist die Frage, wie die Energie aus dem Zentralgebiet – wo sie bei Kernfusionsreaktionen freigesetzt wird – an die Oberfläche gelangt. Zunächst tragen Lichtteilchen (Photonen) die Energie aus dem

Kernbereich fort. Auf ihrem Weg durch das Sonnenplasma geben sie einen Teil ihrer Energie bei zahllosen Absorptions- und Streuvorgängen mit Atomen ab. In den oberen Schichten, die immer dünner und kühler werden, ändert sich jedoch das Verhalten. Hier tritt die bereits erwähnte Konvektion ein, bei der überwiegend aufwallende Gasblasen die Energie weiter transportieren.

Eine der ersten spektakulären Entdeckungen der Helioseismologie war die Erkenntnis, dass sich diese äußere konvektive Hülle bis in eine Tiefe von 0,71 Sonnenradien erstreckt. Dies erlaubte es, das richtige Modell der Konvektionszone aus vielen sehr unterschiedlichen Vorhersagen herauszufinden. Darüber hinaus mussten die bisherigen Werte für die Opazität (das ist die Strahlungsdurchlässigkeit von Materie) revidiert werden, um das Temperaturprofil in den Modellen mit den helioseismologischen Daten in Übereinstimmung zu bringen. In irdischen Laboratorien wäre es nicht gelungen, die Opazitätswerte zu messen, weil sich dort die extremen Bedingungen im Sonneninnern nicht reproduzieren lassen.

Ein anderer herausragender Beitrag der Helioseismologie betrifft das solare Neutrino Problem. Neutrinos sind Elementarteilchen, die in großer Zahl bei den Fusionsprozessen im Sonnenkern entstehen. Nahezu ungehindert durchqueren sie die Sonne und entweichen ins All. Das Standardsonnenmodell sagte recht genau voraus, wie viele dieser Sonnenneutrinos auf der Erde ankommen müssten. Umso überraschter waren die Forscher, als sie mit ihren Messgeräten rund 30 Prozent weniger Neutrinos registrierten als erwartet.

Anfangs vermuteten einige Wissenschaftler, Temperatur und Druck seien im Zentralgebiet der Sonne geringer als es die Standardmodelle vorhersagten. Dadurch würden dann auch weniger Neutrinos entstehen. Diese Hypothese erwies sich jedoch als unhaltbar, denn die Helioseismologie bestätigte schließlich die damaligen Modelle. Sie waren also nicht

die Ursache für das Rätsel der Sonnenneutrinos. Heute gilt es als sicher, dass das Standardmodell der Teilchenphysik nicht stimmte: Neutrinos besitzen – anders als bis dahin angenommen – eine Masse. Das ermöglicht es ihnen, auf dem Weg von der Sonne zur Erde ihre „Identität“ zu wechseln und in andere Rollen zu schlüpfen. Damit schien ein Teil von ihnen für die Neutrino Detektoren auf der Erde nicht zu existieren.

Seit diesen ersten Erfolgen hat sich die Helioseismologie wesentlich weiterentwickelt. Heute wendet man sie an, um lokale Effekte von Gasbewegungen oder Einflüsse des Magnetfelds zu ermitteln. Von zentraler Bedeutung ist die Suche nach Hinweisen auf die Entstehung und Variabilität des solaren Magnetfelds. Dieses spielt eine entscheidende Rolle bei der Sonnenaktivität, die mit einer Periode von etwa elf Jahren schwankt. Zu Zeiten starker Aktivität ereignen sich gewaltige Eruptionen auf der Oberfläche, und aus der äußeren Sonnenatmosphäre, der Korona, lösen sich riesige Plasmawolken, die mit hoher Geschwindigkeit das Planetensystem durchziehen.

ERUPTIONEN LEGEN STROMNETZE LAHM

Eine verstärkte Sonnenaktivität wirkt sich in ganz unterschiedlicher Weise auf unseren Planeten aus. Ein oder zwei Tage nach einer Eruption kann eine Plasmawolke auf das Erdmagnetfeld treffen. Unter bestimmten Umständen können einige Teilchen den Magnetkäfig durchdringen. Dann schießen sie in die Atmosphäre hinein und erzeugen dort bei Zusammenstößen mit Atomen und Molekülen imposante Polarlichter. Aber die energiereichen Teilchen können für Astronauten gefährlich werden, Satelliten in der Erdumlaufbahn beschädigen oder gar komplett außer Gefecht setzen und den Radio- und Funkverkehr stören. In Extremfällen brechen ganze Stromnetze zusammen.

Heiß diskutiert wird derzeit die Frage, ob sich Schwankungen in der

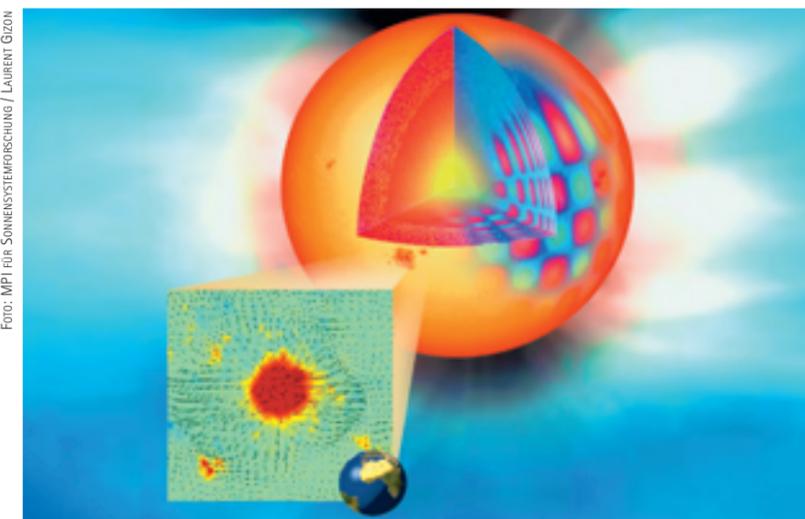


Foto: MPI FÜR SONNENSYSTEMFORSCHUNG / LAURENT GIZON

Der Querschnitt durch das Tagesgestirn verdeutlicht farblich kodiert eine Schwingungsmode. Das vergrößerte „Kuchenstück“ zeigt die Gasströmungen unterhalb eines Sonnenflecks, wie sie mithilfe der lokalen Helioseismologie ermittelt wurden. Unten rechts die Erde als Größenvergleich.

Sonnenaktivität langfristig auf das Klima auswirken. So ging die Periode zwischen 1640 und 1710, in der die Sonnenfleckaktivität nachweislich ungewöhnlich gering war, in Europa mit einer Kaltperiode – dem Höhepunkt der so genannten Kleinen Eiszeit – einher. Die Untersuchung der solaren magnetischen Aktivität hat somit einen ganz direkten Bezug zu unserem Alltag.

Auf welche Weise diese Ausbrüche entstehen, ist noch nicht endgültig geklärt. Ein vollständiges Verständnis ist aber von großer Bedeutung für eine zukünftige Vorhersage des „Weltraumwetters“, an der das Interesse sowohl in der Forschung als auch in einigen Industriezweigen weltweit wächst. Derzeit vermuten wir, dass Eruptionen auftreten, wenn sich schleifenförmige Magnetfelder oberhalb von Sonnenflecken neu arrangieren. Dann springen sie in eine weniger energiegeladene Konfiguration um und setzen Energie frei.

Doch der Aktivitätszyklus äußert sich nicht nur in Form von Ausbrüchen. Am offensichtlichsten macht er sich in einer stark schwankenden Häufigkeit der Sonnenflecken bemerkbar. Je näher sich die Sonne am Maximum befindet, desto mehr Flecken entstehen. Gleichzeitig treten diese Flecken im Lauf des

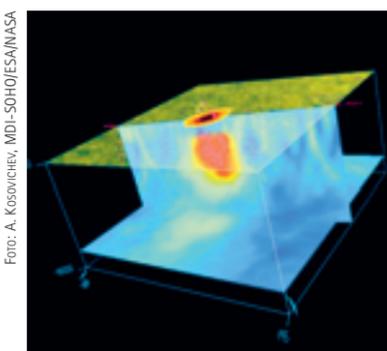
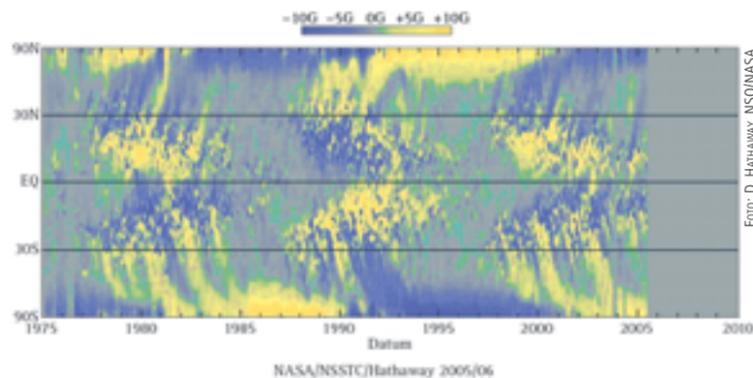


Foto: A. Kosovichev, MDI-SOHO/JESA/NASA

Unterhalb eines Sonnenflecks gibt es bis in 24 000 Kilometer Tiefe erhebliche Störungen in der Gasströmung. Hohe Geschwindigkeiten sind rot gekennzeichnet.

Zyklus jeweils bevorzugt in unterschiedlichen heliografischen Breiten auf: Wenn die Aktivität dem Minimum zustrebt, erscheinen die Flecken immer näher am Sonnenäquator. Außerdem hat man festgestellt, dass Flecken meist in Paaren von entgegengesetzter Polarität auftreten. Die Polaritäten kehren sich innerhalb der Fleckengruppen alle elf Jahre um, was zum Hale-Magnetzyklus von 22 Jahren führt.

Diese Phänomene sind auf irgendeine Weise mit dem globalen Magnetfeld der Sonne verknüpft. Doch dessen Entstehung verstehen wir immer noch nicht vollständig. Nach heutiger Vorstellung entspringt das Magnetfeld in der äußeren Schicht,



Sonnenflecken treten meist paarweise mit entgegengesetzter magnetischer Polung auf. Im Verlauf des elfjährigen Aktivitätszyklus variiert nicht nur die heliografische Breite, in der die Flecken bevorzugt erscheinen, sondern es wechselt auch die Polarität (gekennzeichnet durch Gelb und Blau).

wo besagte Konvektion am Werk ist. Hier steigt die Materie nicht nur auf und ab, sondern gerät durch die Rotation der Sonne in eine komplizierte Bewegung. Magnetfeldlinien sind an dieses heiße Gas gekoppelt und werden in der Strömung gedehnt und verdrillt. Die interne Rotation des Sonnenplasmas variiert sowohl senkrecht zur Oberfläche als auch in der heliografischen Breite. Das spielt eine bedeutende Rolle in der Theorie des Sonnendynamos. Die ungleichförmige Rotation der Sonne „verschert“ die magnetischen Feldlinien und pumpt so Energie in das Magnetfeld hinein. Die Magnetfeldlinien speichern diese wie ein Gummiband, das gedehnt und verzwirbelt wird.

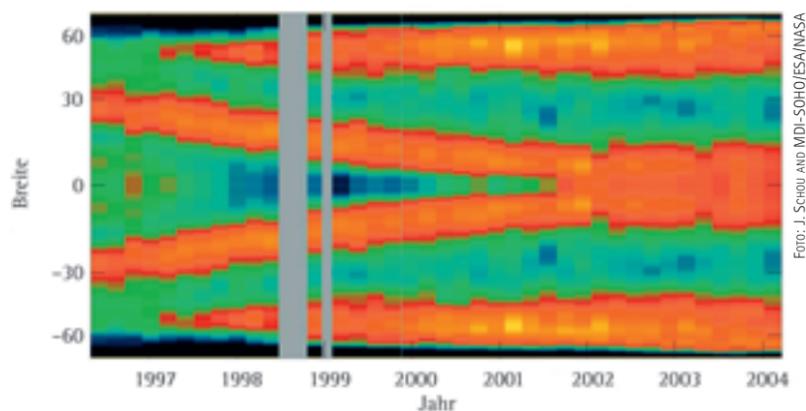
Bewegungen in Nord-Süd-Richtung gelten auch als eine der Ursachen für die Umkehr der Polarität des globalen Magnetfelds alle elf Jahre, doch liegt hier noch vieles im Dunkeln. Eines der Hauptziele der Helioseismologie besteht nun darin, diese inneren Gasbewegungen und ihre zeitlichen Schwankungen zu erfassen, um der Lösung des Rätsels um den Sonnenzyklus näher zu kommen.

Hier gelangen bereits einige bedeutende Fortschritte. So fand man heraus, dass in der Konvektionszone die Rotation mit der heliografischen Breite variiert: Am Äquator dreht sich die Sonnenmaterie in 25 Tagen einmal um die Achse, in hohen Breiten dauert es 35 Tage. Das war bereits von visuellen Beobachtungen der

Sonnenoberfläche her bekannt. Der Kernbereich hingegen scheint als Gesamtheit wie ein starrer Körper mit einer Periode von etwa 27 Tagen zu rotieren; dieses Resultat weicht von früheren Modellen ab. Das bedeutet aber, dass beim Übergang vom inneren Kernbereich zur Konvektionszone ein starker Bruch in der Rotation der Sonnenmaterie stattfindet. In dieser Übergangszone – auch Tachocline genannt – vermutet man den Sitz des Sonnendynamos.

INDIZIEN FÜR DIE WANDERnde WELLE

Kürzlich gelang es sogar, mittels helioseismologischer Analysen eine Verbindung zwischen Materiebewegungen im Innern und den Merkmalen des Sonnenzyklus herzustellen. So fand man heraus, dass die Rotationsdauer nicht nur räumlich mit der



Während des elfjährigen Zyklus verändert sich die Geschwindigkeit des strömenden Gases im Sonneninneren. Rot bedeutet hohe, blau und grün geringe Geschwindigkeit.

heliografischen Breite schwankt, sondern auch zeitlich: Bänder mit schneller Rotation wandern zum Äquator hin. Dieses zeitlich veränderliche Rotationsmuster weist eine Periodizität von elf Jahren auf und besteht in der gesamten oberen Hälfte der Konvektionszone. Das könnte ein Hinweis auf eine „wandernde Welle“ sein, die einige Dynamotheorien vorhersagen.

Darüber hinaus wurden aber auch rätselhafte, nahezu periodische Veränderungen in der Rotationsgeschwindigkeit mit einer Periode von 1,3 Jahren gefunden, die nahe der Tachocline auftauchen. Diese Entdeckung lässt sich noch nicht erklären und verdeutlicht, dass uns ein vollständiges Verständnis der internen Dynamik der Sonne weitgehend fehlt.

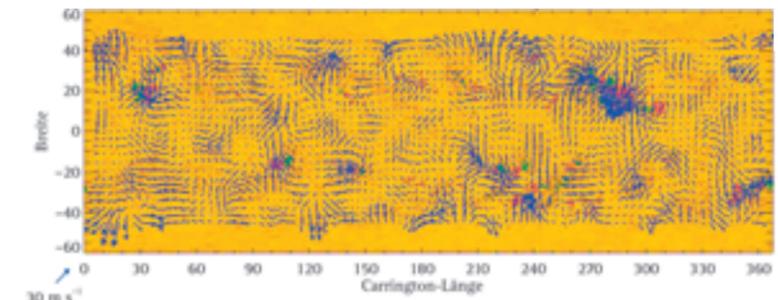
Die klassische Helioseismologie betrachtet die Sonne als Körper, der zu seiner Rotationsachse völlig symmetrisch ist. In jüngster Zeit haben wir damit begonnen, auch die Amplituden und Phasen der Oszillationen zu analysieren. Dies führt zur „lokalen“ Helioseismologie, mit der sich nun auch nicht symmetrische Anteile der Bewegungen im Sonneninneren erschließen. Dieses Verfahren ähnelt in gewisser Weise der medizinischen Ultraschall-Computertomografie. Bei dieser Technik misst man die Zeitspanne, die Sonnenwellen zwischen zwei bestimmten Stellen an der Oberfläche für ihre Ausbreitung im

Innern benötigen. Die Ausbreitungszeiten geben Auskunft darüber, ob sich im Innern entlang der Ausbreitungspfade verborgene Inhomogenitäten und Strömungen befinden. Mit dieser Methode gelang es, eine interne Strömung zwischen dem Äquator und den Polen nachzuweisen. Sie könnte für den Breitentransport des magnetischen Flusses sorgen und die Periode des Sonnenzyklus bestimmen.

Als ich mich mit lokalen Vorgängen im Sonneninneren beschäftigte, stieß ich auf komplexe Horizontalströmungen in den oberen Schichten der Konvektionszone, die auch als *Solar Subsurface Weather* („Untergrund-Sonnenwetter“) bezeichnet werden. Die Bewegungen scheinen in der Nähe großer magnetisch aktiver Regionen hoch organisiert zu sein. Abseits der aktiven Regionen treten Mäander, Strahlen und Wirbel auf, die möglicherweise in Verbindung mit starker Tiefenkonvektion stehen.

Mittlerweile können wir auch verhältnismäßig kleinskalige Phänomene untersuchen. Ein aktuelles Beispiel dafür bietet die so genannte Supergranulation. Hierbei handelt es sich um Konvektionszellen, die Ausdehnungen um 30 000 Kilometer besitzen. Sie spielen eine wichtige Rolle in der Umverteilung des magnetischen Flusses auf der Sonnenoberfläche. Wir waren erstaunt festzustellen, dass sich das Muster der Supergranulen in Rotationsrichtung der Sonne schneller ausbreitet als der lokale Plasmastrom. Dieses Verhalten erinnert an eine fortschreitende Welle. Wir sind jedoch noch weit von einem Verständnis der Supergranulation entfernt und setzen auf weitere Beobachtungen und verfeinerte theoretische Methoden.

Auch das älteste bekannte Phänomen auf der Sonne, die oben angesprochenen dunklen Flecken, gehören mittlerweile zu den Forschungsobjekten der Helioseismologie. Sonnenflecken sind Gebiete, in denen die Energieversorgung aus dem Innern beeinträchtigt ist und



Strömungen in tausend Kilometer Tiefe (blaue Pfeile) orientieren sich an magnetisch aktiven Gebieten an der Oberfläche (rot, grün).

deren Temperatur etwa um 1500 Grad unter jener der ungestörten Oberfläche (Photosphäre) liegt – weshalb sie im Kontrast schwarz erscheinen. So gelang es, die räumliche Geschwindigkeitsverteilung des Gases unterhalb von solchen Flecken zu messen. Wir gehen davon aus, dass die beobachteten Störungen in der Strömung durch eine Kombination aus magnetischen und Temperatur-Anomalien verursacht werden, die wir derzeit noch nicht enträtseln können. Die Entdeckung organisierter Strömungen unterhalb von Sonnenflecken könnte die Frage klären helfen, warum die Flecken über viele Wochen hinweg als stabile Strukturen bestehen bleiben.

Die lokale Helioseismologie befindet sich noch in ihrer Entwicklung, verspricht aber viele weitere Entdeckungen. Zu den zahlreichen ehrgeizigen Zielen gehört die direkte Abbildung des Magnetfelds im Innern der Sonne. Hierfür ist es nötig, lokale Anisotropien in der Wellenausbreitung zu messen, wobei die Wellengeschwindigkeiten entlang und quer zu den Magnetfeldlinien unterschieden werden müssen.

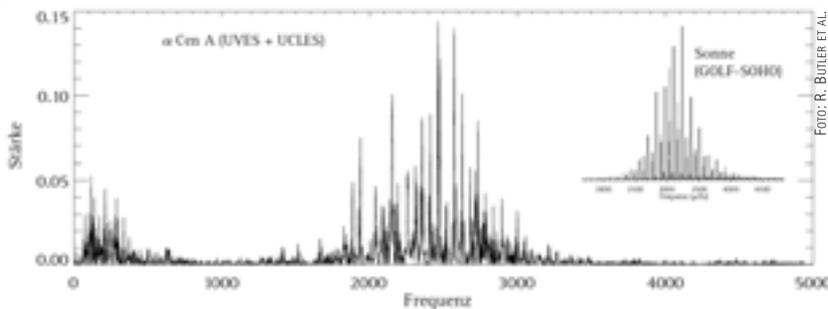
BEBEN AUF FERNEN STERNEN

Die Erfolge der Helioseismologie haben Astronomen bewogen, dieses Verfahren auch auf Sterne anzuwenden. Im Unterschied zur Sonne erscheinen Sterne wegen ihrer großen Entfernung punktförmig. Somit registriert man die vielen Oszillationsmoden gleichzeitig und über die gesamte Oberfläche gemittelt. Die

Herausforderung für die Astronomen in diesem jungen Gebiet der Astero-seismologie besteht darin, Oszillationsspektren zu messen, die detailliert genug sind, um wichtige Randbedingungen für die interne Struktur zu liefern. Erst in den vergangenen Jahren wurde dies mithilfe großer erdgebundener Teleskope für sonnenähnliche Sterne möglich.

Da sich die Oberfläche eines Sterns wie gesagt nicht als Scheibe beobachten lässt, können wir hier nur die einfachsten Moden – also Radial-, Dipol- und Quadrupolschwingungen – nachweisen. Dennoch ist es möglich, aus den Spektren zwei Grundgrößen zu extrahieren: Zum einen die Schallausbreitungszeit quer durch den Sterndurchmesser; sie ist eine globale Eigenschaft und eng mit der durchschnittlichen Massendichte und somit der Sternmasse verknüpft. Zum anderen lässt sich ein zunehmender Heliumgehalt im Kernbereich des Sterns nachweisen; das bietet die einzigartige Möglichkeit, das Alter eines Sterns einzugrenzen, weil dieser bei der Kernfusion Helium produziert und der Anteil dieses Elements daher mit der Zeit zunimmt.

Die Frequenzen stellarer Oszillationen enthalten noch weit mehr Informationen. Sie könnten zur Bestimmung wichtiger Merkmale des Sterninneren führen, wie den Grenzen von Konvektionszonen. Das würde es ermöglichen, die heute noch sehr grobe Theorie des Energietransports durch Konvektion zu verfeinern. Für die Theorie des Sternaufbaus wäre es wichtig, diese



Mit dem *Very Large Telescope* konnte bei dem nahen Stern Alpha Centauri eine Reihe von Oszillationen unterschiedlicher Stärke gemessen werden, die Aufschluss über das Innere des Sterns zulassen. Der Einsatz zeigt zum Vergleich das Sonnenspektrum.

Informationen für Sterne unterschiedlicher Masse zu erhalten. Im Prinzip lässt sich mit der Asteroseismologie auch die interne Rotation bestimmen, wie dies für die Sonne geschehen ist. Solche Informationen könnten helfen, stellare Aktivitätszyklen zu verstehen und die Dynamotheorie auf einer breiteren Datenbasis zu überprüfen.

Kürzlich habe ich aufgrund theoretischer Überlegungen gezeigt, dass es sogar möglich ist, die Neigung der Rotationsachse eines Sterns zu ermitteln. Im Fall von Doppelsternen sowie von Zentralsternen eines Planetensystems wäre diese Information besonders interessant.

Helioseismologen benötigen qualitativ hochwertige Oszillationsspektren, Asteroseismologen hoffen zudem auf Messdaten für eine möglichst große Zahl von Sternen. Hier blicken wir in eine verheißungsvolle Zukunft. Den nächsten großen Technologieschritt für die Helioseismologie leitet die NASA mit ihrem *Solar Dynamics Observatory* (SDO) ein, das 2008 starten soll. Mit an Bord wird erstmals ein Instrument sein, das speziell für die lokale Helioseismologie entwickelt wurde. Zu den bedeutendsten wissenschaftlichen Zielen gehört die Erforschung der Feinstruktur und der zeitlichen Entwicklung magnetischer Regionen und Strömungen unter der Oberfläche. Mein Team am Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung wird an der Datenanalyse des SDO mitwirken.

Ungefähr im Jahr 2013 will die Europäische Weltraumorganisation

ESA den *Solar Orbiter* auf die Reise schicken. Diese Sonde soll die Hauptebene der Planetenbahnen, die Ekliptik, verlassen und auf die Polregionen der Sonne blicken. Darüber hinaus werden die Daten des *Solar Orbiter* mit denen anderer Teleskope kombiniert, die in einem anderen Blickwinkel auf die Sonne schauen. Auf diese Weise lassen sich stereoskopische Untersuchungen gewinnen, dank derer man in sehr tiefe Regionen der Sonne vordringen kann. Insbesondere ließen sich dann auch Variationen an der Basis der Konvektionszone detaillierter ermitteln, wo wir den Sitz des Sonnendynamos vermuten. An der Entwicklung des *Solar Orbiter* ist unser Team ebenfalls beteiligt.

SEISMOLOGEN SETZEN AUF NEUE INSTRUMENTE

Auch die Asteroseismologie tritt in eine aufregende Phase ein. Dabei profitiert sie von der derzeit mit Hochdruck betriebenen Suche nach Planeten, die um ferne Sterne kreisen. Hierfür muss man nämlich geringe periodische Schwankungen des Sterns um den gemeinsamen Schwerpunkt des extrasolaren Systems messen. In einem Spektrum äußern sich diese auf ähnliche Weise wie Pulsationen der Oberfläche. Die Schwankungen des gesamten Sterns sind jedoch viel langsamer als die Pulsationen – die beiden Bewegungen lassen sich also leicht voneinander trennen.

Derzeit gelingen die besten Messungen am European Southern Ob-

servatory in den chilenischen Anden. Hierfür stehen am 3,6-Meter-Teleskop in La Silla der HARPS-Spektrograf und am *Very Large Telescope* der UVES-Spektrograf zur Verfügung. In den kommenden Jahren werden an mehreren erdgebundenen Großteleskopen noch präziser arbeitende Spektrografen installiert, mit denen man die Geschwindigkeiten von Sternen mit bislang unerreichter Genauigkeit messen können.

Allerdings ist die Beobachtungszeit an den Großteleskopen begrenzt, weshalb spezielle Weltraumteleskope eine attraktive Lösung darstellen, um eine nahezu ununterbrochene, langfristige Beobachtung vieler Arten pulsierender Sterne zu ermöglichen. Die Satelliten *WIRE* und *MOST* haben bereits anhand von Helligkeitsschwankungen Sternoszillationen entdeckt. Erheblich leistungsfähiger wird der Satellit *COROT* der ESA sein, der 2006 starten soll. Weitere Missionen ähnlicher Art sind derzeit in Planung.

Wir hoffen deshalb, dass die Asteroseismologie in den nächsten Jahrzehnten große Fortschritte erzielt. Vielleicht wird es eines Tages sogar möglich sein, hunderte von Oszillationsmoden auf einem einzelnen Stern mit optischer Interferometrie wie bei der Sonne räumlich aufgelöst zu messen. Diese Daten werden jedoch nur dann zu neuen astrophysikalischen Erkenntnissen führen, wenn gleichzeitig die Sternmodelle verfeinert und theoretische Methoden weiter entwickelt werden.

FOTO: PRIVAT



DR. LAURENT GIZON (Jahrgang 1970) ist Leiter der Nachwuchsgruppe „Helio- und Asteroseismologie“ am Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Katlenburg-Lindau. Gizon studierte

Weltraumtechnik an der französischen Hochschule SupAero sowie Astrophysik an der Universität Toulouse. An der kalifornischen Universität Stanford wurde er in Physik promoviert. Für seine Arbeiten über die solare Supergranulation erhielt er in diesem Jahr den JOSO-Preis für Sonnenphysik.