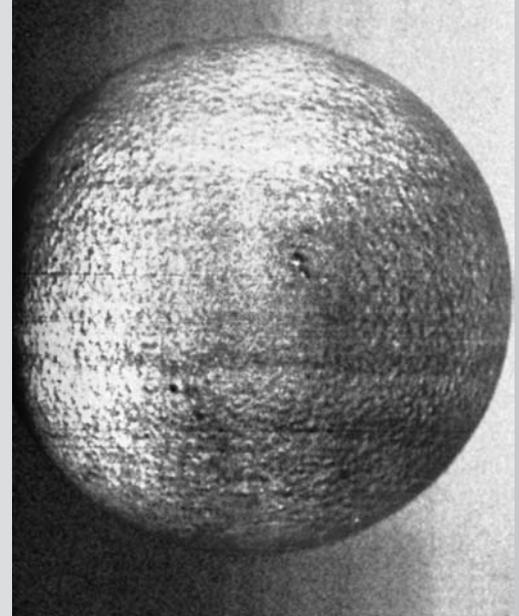


Die Anfänge der Helioseismologie

VON JOHANN REITER

Seit dem Anfang der sechziger Jahre beobachten Astronomen Schwingungen auf der Sonnenoberfläche. Die Helioseismologie ist ein Forschungsgebiet, das mehrfach eine überraschende Wendung genommen hat. Ein Blick zurück auf ihren Ursprung.



Ende der fünfziger Jahre befasste sich Robert Leighton, Professor für Physik am California Institute of Technology in Pasadena (USA) damit, die Geschwindigkeit von Gasen auf der Sonnenoberfläche zu untersuchen. Dabei ging es ihm vor allem darum, die Granulation zu erforschen, das Muster auf- und absteigender Gaspakete in der äußeren Atmosphäre der Sonne. Zu diesem Zweck entwickelte er eine raffinierte Technik. Leighton (Abb. 1) benutzte das 60-Fuß-Turmteleskop des Mount-Wilson-Observatoriums am Stadtrand von Los Angeles (Abb. 2) und modifizierte für sein Projekt den dort installierten Spektroheliographen. Das ist ein Gerät, mit dem man das Sonnenbild im Licht einzelner Spektrallinien aufnehmen kann und dabei so genannte Spektroheliogramme erhält. Mittels eines Strahlteilers und anderer optischer Komponenten gelang es ihm, gleichzeitig zwei Spektroheliogramme zu belichten: eines im langwelligen, roten Flügel einer Spektrallinie und das andere in deren blauem Flügel. Ein Vergleich dieser beiden gleichzeitig belichteten Spektroheliogramme mittels einer photographischen Subtraktionstechnik ergab ein so genanntes Doppler-Spektroheliogramm: eine Photoplatte, deren unterschiedliche Schwärzung die Geschwindigkeiten des Gases an verschiedenen Orten auf der Sonnenoberfläche widerspiegelt.

Wie der Name andeutet, beruht diese Technik auf der Doppler-Verschiebung einer Spektrallinie zu längeren oder kürzeren Wellenlängen, abhängig davon, ob deren Licht von Gebieten ausgesandt wird, die sich dem Beobachter nähern oder von ihm entfernen. Bewegt sich das Gas vom Beobachter weg, so verschiebt sich aufgrund des Dopplereffekts die Spektrallinie zu größeren Wellenlängen hin. In Abb. 4 ist das durch die gestrichelte grüne Linie dargestellt. Bei einer Bewegung des Gases auf den Beobachter zu würde sich



▲ Abb. 1: Robert Leighton (1919–1997). (Bild: Caltech)

▶ Abb. 2: Das 60-Fuß-Turmteleskop auf dem Mount Wilson. (Bild: Mount Wilson Observatory)

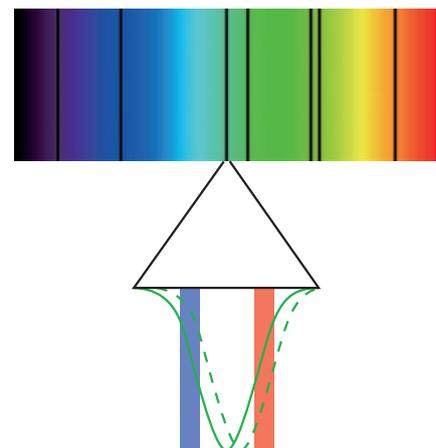
die Linie zu kürzeren Wellenlängen hin verschieben. Durch Vergleich der mittels schmalbandiger Filter im »roten« und »blauen« Bereich der Spektrallinie simultan gemessenen Intensitäten lässt sich die momentane Geschwindigkeit des absorbierenden Gases relativ zum Beobachter messen. Der Durchlassbereich der beiden Filter ist durch den rot bzw. blau schraffierten Streifen angedeutet. Die beiden Durchlassbereiche liegen symmetrisch zum Zentrum der unverschobenen Spektrallinie.

Bei der Untersuchung ist zu berücksichtigen, dass die Sonne rotiert und demzufolge über die gesamte Sonnenscheibe systematische Geschwindigkeiten auftreten. Am Sonnenäquator beträgt die Rotationsgeschwindigkeit etwa zwei Kilometer pro Sekunde. Das entspricht

▲ Abb. 3: Eine Dopplersummenplatte Leightons, aufgenommen im Licht der Kalzium-Linie bei 610.3 nm am 11. Juni 1961. Die Auswirkung der Sonnenrotation ist hier korrigiert. Regionen, die vom mittleren Grau abweichen zeigen aufsteigende und absteigende »Zellen« auf der Sonnenoberfläche an. (Bild: Astrophys. J. 1962)



▽ Abb. 4: Messung von Geschwindigkeiten auf der Sonnenoberfläche mittels des Dopplereffekts (siehe Text).



einer Dopplerverschiebung von 0.004 Nanometern. Leighton gelang es, diesen Rotationseffekt in seiner Apparatur zu kompensieren.

Doppler-Differenzen

Leightons Idee war es, die Lebensdauer der Granulen mit Hilfe so genannter Dopplerdifferenz-Platten zu bestimmen. Mit einer weiteren photographischen Subtraktion konnte er Platten, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen worden waren, voneinander abziehen. Das ergab die Differenz der Geschwindigkeiten nach der Zeitdifferenz Δt . Auf ähnliche Weise erzeugte er auch Dopplersummen-Platten (Abb. 3). Leighton betrachtete Zeitintervalle bis zu $\Delta t = 7$ Minuten. Bei einem stationären Geschwindigkeitsfeld auf der Sonne wären beide Dopplergramme identisch, und die Dopplerdifferenz-Platte würde ein strukturloses Grau zeigen. Die Erwartung war jedoch, dass die Differenz der Dopplergeschwindigkeit für $\Delta t \sim 0$ fast Null ist und mit wachsendem Δt einem Maximum zustrebt, weil die Geschwindigkeiten der Granulen nicht mehr korreliert sind, wenn Δt größer ist als die mittlere Lebensdauer der Granulen. Leighton erhoffte sich, auf diese Weise die Lebensdauer der Granulen bestimmen zu können.

An einem Montag im Frühjahr des Jahres 1960 kam Leighton in das Arbeitszimmer seines Doktoranden Robert Noyes und berichtete ihm, dass er am Wochenende eine aufregende Entdeckung gemacht habe. Er hatte festgestellt, dass die Dopplerdifferenz-Platten zunächst einen Anstieg der Geschwindigkeit mit Δt zeigten. Bei noch längeren Zeitdifferenzen fiel die Geschwindigkeit wieder ab und erreichte bei $\Delta t \sim 296 \pm 3$ Sekunden, also etwa fünf Minuten, einen Minimalwert. Anschließend stieg die Geschwindigkeit wieder an (Abb. 5). Dies konnte Leighton nur so deuten, dass es Gebiete auf der Sonne gibt, die sich mit einer Periode von etwa fünf Minuten rhythmisch auf- und abbewegen.

Diese Erklärung widersprach völlig der Erwartung, und so wurde zunächst die gesamte Messapparatur einer kritischen Prüfung unterzogen, ob nicht irgendein nicht-solarer Effekt beobachtet worden war. Nach kurzer Zeit waren sich Leighton und seine Mitarbeiter sicher, dass sie tatsächlich Oszillationen der Sonnenoberfläche beobachtet hatten.

Vorläufer

Leightons Entdeckung von Oszillationen kam nicht für alle Forscher überraschend. Bereits Anfang der fünfziger Jahre hatte Harry Plaskett von der Universität Oxford bei der Auswertung von

Spektren Hinweise auf ein oszillatorisches Geschwindigkeitsfeld in der Photosphäre gefunden. Allerdings blieb seine Entdeckung weitgehend unbeachtet. Auch Theoretiker hatten Schwingungen der Sonnenoberfläche in Erwägung gezogen. Solche Schwingungen galten als Hoffnung, die erstaunlich hohen Temperaturen der Chromosphäre und Korona zu verstehen, welche viel heißer sind als die darunter liegende Photosphäre (letztere markiert den sichtbaren Sonnenrand). Ende der vierziger Jahre vermuteten Ludwig Biermann vom Max-Planck-Institut für Physik in Göttingen und Martin Schwarzschild von der Princeton University, dass Wellen in der Sonnenatmosphäre die Chromosphäre und Korona mechanisch aufheizen könnten.

Innerhalb weniger Jahre wurde die Existenz der Fünf-Minuten-Oszillation von anderen Arbeitsgruppen bestätigt. Die Schwingungen sind zeitlich periodisch, zeigen räumlich jedoch keine ausgeprägte Periodizität. Da sie vorwiegend aus vertikalen Bewegungen der Sonnenoberfläche bestehen, können sie am besten im Zentrum der Sonnenscheibe be-

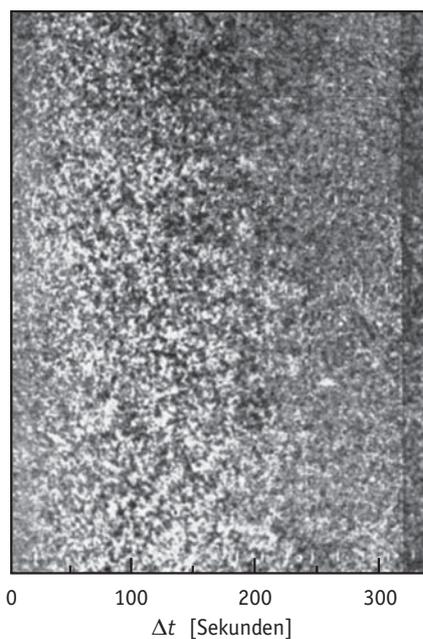
obachtet werden. Die Größe der oszillierenden Bereiche beträgt meist etwa 1000 bis 6000 Kilometer. Gelegentlich werden jedoch auch wesentlich größere, in Phase schwingende Gebiete beobachtet. Eine Schwingung erlischt nach typischerweise zwei bis fünf Perioden, um dann wieder von neuem zu beginnen. Die Geschwindigkeitsamplitude beträgt einige hundert Meter pro Sekunde. Mit zunehmender Höhe in der Photosphäre wächst diese bis auf einige Kilometer pro Sekunde an. In größerer Höhe werden kürzere Periodendauern beobachtet.

Heute wissen wir, dass diese Bewegungen an der Oberfläche die Überlagerung von einigen Millionen verschiedener Resonanzschwingungen der Sonne widerspiegeln. Die wechselnden Phasenunterschiede der einzelnen Schwingungen untereinander bewirken die Zu- und Abnahme der Amplituden der Oszillationen und ihre wechselnde räumliche Verteilung (Schwebung).

Glanz und Elend des Kolbenmodells

Zunächst wurden die Fünf-Minuten-Oszillationen als Oberflächenphänomen der Sonne betrachtet, das mit der Granulation zusammen hängt. Als theoretische Erklärung wurde zunächst die Biermann-Schwarzschild-Theorie favorisiert. Gemäß dieser Theorie handelt es sich bei den Oszillationen um Schallwellen, die durch die permanenten Stöße der aus der Konvektionszone aufsteigenden Granulen gegen die Grenze der stabil geschichteten Photosphäre erregt werden. Der laufende Anteil dieser Wellen wurde zu der für die Heizung der Chromosphäre und Korona benötigten mechanischen Energie in Beziehung gesetzt. Die zurückbleibenden stehenden Wellen sollten für die Schwingungen der Sonnenoberfläche verantwortlich sein. Dieses so genannte »Kolbenmodell« wurde in den sechziger Jahren insbesondere von Friedrich Meyer, H.U. Schmidt, Michael Stix und Jack Zirker vertreten. Bereits Anfang der sechziger Jahre hatte Franz Kahn vom Institute for Advanced Study in Princeton ein Modell stehender Wellen mit horizontaler Ausbreitung in der Sonnenatmosphäre vorgeschlagen.

Nachdem die Existenz der Fünf-Minuten-Oszillation bereits um 1965 als gesicherte Tatsache galt, wurde es nun zur Aufgabe der Beobachter, das Kolbenmodell mit genaueren Beobachtungen zu überprüfen. Ende der sechziger Jahre waren Bilddetektoren, Rechenanlagen und effiziente numerische Verfahren weit genug entwickelt, um die Analyse der räumlich-zeitlichen Eigenschaften der Schwingungen in Angriff zu nehmen.



▲ Abb. 5: Dopplerdifferenz-Platten, gemessen in einer Spektrallinie des einfach ionisierten Bariums bei einer Wellenlänge von 455.4 nm. Graue Bereiche bedeuten eine geringe Geschwindigkeitsänderung, während ein »Pfeffer-und-Salz-Muster« eine größere Geschwindigkeitsänderung anzeigt. Der graue Bereich bei $\Delta t \sim 300$ Sekunden bedeutet, dass sich das Geschwindigkeitsfeld nach ungefähr dieser Zeitspanne wiederholt. (Bild: Astrophys. J. 1962)

Dabei hat sich das so genannte Diagnostik-Diagramm als besonders nützlich erwiesen (siehe S. 26). Die Darstellung der Messdaten in solchen Diagrammen zeigte, dass die in gleicher Weise schwingenden Bereiche auf der Sonne wesentlich größer und langlebiger sind als die Granulen. Numerische Berechnungen ergaben, dass das Frequenzspektrum des Energieflusses der durch die turbulenten Gasströmungen in der Konvektionszone erzeugten Schallwellen ein scharfes Maximum bei etwa 40 Sekunden zeigt. Gemäß der Kolbentheorie sollte diese Periode aber bei etwa 300 Sekunden liegen. Darüber hinaus bemerkte Edward Frazier von der University of California in Berkeley, dass die Entstehung der Granulen und die Oszillationen zwei völlig voneinander unabhängige Prozesse sind. Er hatte 1968 beobachtet, dass ein auftauchendes Granulum eine Schwingung nicht auslöst (wie vom Kolbenmodell angenommen), sondern vielmehr eine bereits existierende Schwingung stört oder sogar unterbricht.

Nachdem sich das Granulum aufgelöst hat, setzt die Schwingung in der ursprünglichen Phasenlage wieder ein. Eine ähnliche Beobachtung machte im Jahr 1967 Franz-Ludwig Deubner, der damals am Fraunhofer-Institut für Sonnenphysik in Freiburg arbeitete. Mit Beobachtungen am Schauinsland-Observatorium bemerkte er, dass die Schwingungen nicht abrupt einsetzen, sondern vielmehr stets mit kleinen Amplituden beginnen und enden. Das machte die Anregung der Schwingungen durch aufsteigende Granulen unwahrscheinlich.

Stehende Wellen?

Alle diese Befunde zeigten, dass das Kolbenmodell die beobachteten Eigenschaften der Fünf-Minuten-Oszillationen nicht erklären kann. Die Anregung der Schwingungen schien vielmehr wesentlich komplexer zu sein. Die großen horizontalen Wellenlängen der Schwingungen, die sich aus den neuen Beobachtungen ergaben, machten es unwahrscheinlich, dass die Oszillationen ein reines Oberflächenphänomen der Sonne sind. Auf irgendeine Weise musste auch das Sonneninnere an den Schwingungen beteiligt sein. Inspiriert durch zwei spektrale Maxima, die Edward Frazier in seinen Diagnostik-Diagrammen fand, spekulierte er, dass die Fünf-Minuten-Oszillationen stehende Wellen innerhalb der Konvektionszone der Sonne sein könnten.

Diese faszinierende Idee griff Roger Ulrich auf, ein Studienfreund Fraziers von der University of California in Berkeley. Ulrich (Abb. 6) war nach Abschluss seiner Doktorarbeit an das California Insti-



▲ Abb. 6: Roger Ulrich. (Bild: UCLA)

▶ Abb. 7: Der große Coudé-Refraktor auf Capri.

tute of Technology in Pasadena gegangen, um dort am solaren Neutrinoproblem zu arbeiten. In seiner Freizeit beschäftigte er sich jedoch eifrig mit den Fünf-Minuten-Oszillationen und entwickelte numerische Modelle der äußeren Schichten der Sonne, welche die Temperaturverteilung innerhalb dieser Schichten in die Rechnungen mit einbezogen. Bei der numerischen Lösung dieses erweiterten Problems bemerkte Ulrich, dass sich in den äußeren Schichten der Sonne, ähnlich wie in einem Resonanzkörper, stehende Schallwellen ausbilden können.

Ulrich erkannte, dass sich die Fünf-Minuten-Oszillationen als Manifestation solcher stehenden Wellen im Inneren der Sonne deuten lassen. Aufgrund des Resonanzcharakters der Schwingungen können nur bestimmte Kombinationen von Wellenzahl und Frequenz auftreten, so dass sich in einem Diagnostik-Diagramm die maximalen spektralen Intensitäten in Form von schmalen Bändern anordnen sollten. Dass solche Streifen bisher noch nicht beobachtet worden waren, erklärte Ulrich zwanglos mit der unzureichenden zeitlichen und räumlichen Auflösung der bis dahin durchgeführten Messungen. Unter dem Titel »The five-minute oscillations on the solar surface« veröffentlichte Ulrich 1970 seine Ergebnisse im *Astrophysical Journal*, wobei er im letzten Abschnitt seiner Arbeit Minimalbedingungen formulierte, unter denen die vorhergesagten Streifen im Diagnostik-Diagramm zu beobachten sein sollten. Eine ähnliche,



aber weniger vollständige Theorie der Fünf-Minuten-Oszillationen wurde kurze Zeit später von Leibacher und Stein veröffentlicht.

Schwingungen aus der Tiefe

Ulrichs Theorie blieb zunächst weitgehend unbeachtet. Dies mag zum einen daran gelegen haben, dass sie nur eines von mehreren Modellen war, die auf resonanten Schwingungen basierten. Die Unterschiede in den Modellen bestanden lediglich darin, wo sich der Resonanzkörper in der Sonne befindet und von welcher Art die Wellen sind (Schall- oder Schwerewellen). Zum anderen wurde an der Ulrichschen Theorie Kritik geübt, weil sie auf einem planparallelen Modell der äußeren Schichten der Sonne beruhte. Deshalb war sie genau genommen nur auf Schwingungen anwendbar, deren Wellenlänge wesentlich kleiner ist als der Sonnenradius. Andererseits belegten aber Beobachtungen, dass die Schwingungen über mindestens einem Zehntel des Sonnenradius in Phase sind. Eine wirklich erfolgreiche Erklärung der Fünf-Minuten-

Literaturhinweise

Franz-Ludwig Deubner: »Das Innere der Sterne bloßlegen«, *SuW* 1/1981, S. 7–11.

Johann Reiter: »Helioseismologie«, *Naturw. Rdsch.* 53, 609 (2000).



▲ Abb. 8: Franz-Ludwig Deubner Anfang der siebziger Jahre während der Beobachtung mit dem Magnetographen am Coudé-Refraktor auf Capri.

Oszillationen müsste die gesamte Sonne mit einbeziehen.

Da er eindeutige Voraussagen gemacht hatte, welche Beobachtungen seine Theorie bestätigen könnten, war Ulrich überrascht, dass sich niemand die Mühe machte, diese Beobachtungen anzustellen. Er selbst hielt Vorträge am Sacramento Peak National Observatory (SPNO) in New Mexico, dem besten Sonnenobservatorium in den USA, aber es fand sich niemand bereit, entsprechende Beobachtungen durchzuführen. Mehr als zwei Jahre gingen ins Land, doch nichts passierte. Inzwischen war Ulrich Professor an der University of California in Los Angeles (UCLA) geworden, und so beschloss er, die Nachprüfung seiner Theorie als Thema einer Doktorarbeit an seinen Studenten Edward Rhodes Jr. zu vergeben.

Nach vergeblichen Bemühungen, an anderen Observatorien für diese Arbeit geeignete Beobachtungen zu erhalten, kontaktierte Rhodes den Sonnenphysiker George W. Simon vom SPNO. Dieser Mitentdecker der Fünf-Minuten-Oszillationen war gerade dabei, am Spektrographen des Vakuum-Turmteleskops einen so genannten Multidiodendetektor zu installieren. Simon war sich sicher, dass dieser neuartige Detektor für die geplanten

Messungen hinreichend leistungsfähig war, und willigte sofort ein, am Projekt von Ulrich und Rhodes mitzuarbeiten. Rhodes traf am 26. Dezember 1974 am SPNO ein, um mit den Beobachtungen zu beginnen. Bereits am 8. Januar 1975 hatte er alle für seine Doktorarbeit notwendigen Messungen abgeschlossen.

Die Sonne auf Capri

Völlig unabhängig von den Aktivitäten in den USA hatten in Deutschland Bemühungen eingesetzt, die Ulrichsche Hypothese experimentell nachzuprüfen. Im Jahre 1973 erschien in der Zeitschrift *Solar Physics* eine Arbeit von Charles Wolff vom Goddard Space Flight Center der NASA, die darlegte, dass die Fünf-Minuten-Oszillationen unter der Voraussetzung, dass es sich um Resonanzschwingungen handelt, je nach den verwendeten Beobachtungstechniken sowohl als klein- als auch als großräumige Schwingungen erscheinen können. Da jedoch anhand der bisherigen Daten nicht entschieden werden könne, was die Fünf-Minuten-Oszillationen nun tatsächlich darstellen, schließt Wolff seine Arbeit mit dem eindringlichen Aufruf, neue Beobachtungen mit dem Ziel durchzuführen, diese Frage zweifelsfrei zu klären. Franz-Ludwig Deubner, damals wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut in Freiburg, nahm sich diesen Aufruf zu Herzen. Mit dem modernen kuppellosen Coudé-Refraktor an der Außenstelle des Instituts auf Capri (Abb. 7) gelang ihm am

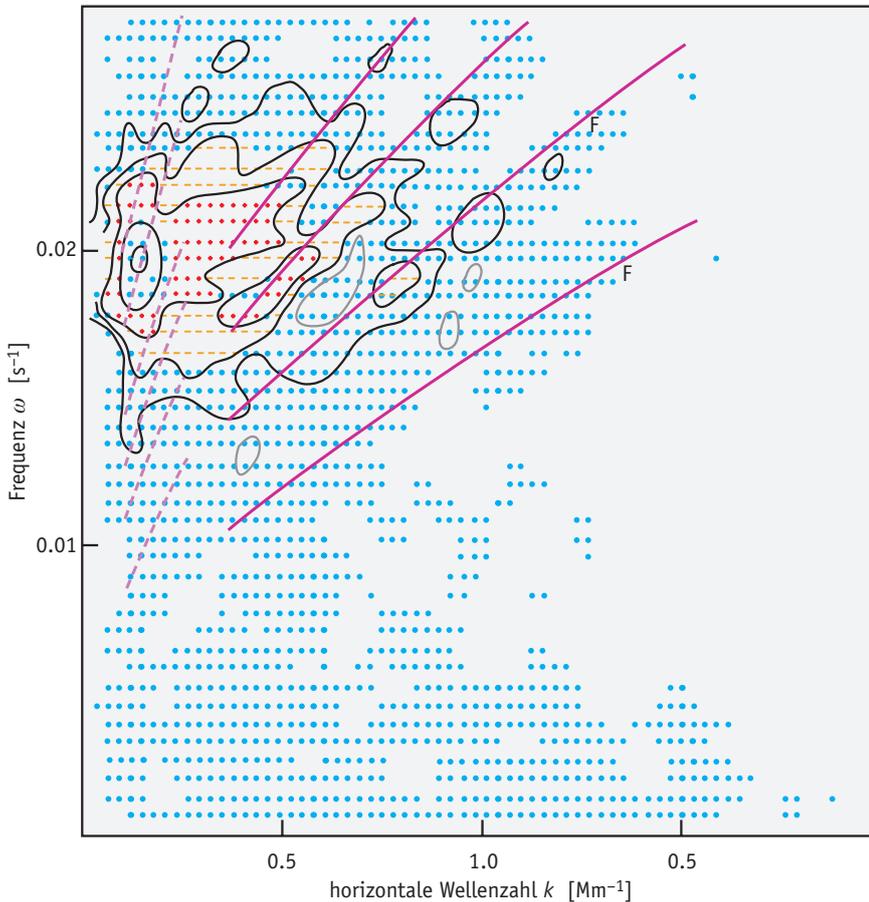
20. September 1974 die entscheidende Messung, drei Monate bevor Rhodes auf dem Sacramento Peak mit seinen Messungen begann.

Deubner (Abb. 8) tastete mit seiner Apparatur einen in Nord-Süd-Richtung gelegenen Streifen auf der Sonnenscheibe im Rhythmus von etwa zwei Minuten in ununterbrochener Folge nahezu drei Stunden lang ab. Der Streifen hatte eine Länge von etwa einem Sechstel der Sonnenscheibe. Anschließend folgte über vier Stunden die Abtastung eines nach Ost-West gerichteten Streifens derselben Ausdehnung. In der Absicht, eine möglichst tiefe Schicht der Sonnenatmosphäre zu sondieren, bestimmte Deubner die Geschwindigkeit des Gases am Dopplereffekt der CI-Fraunhoferlinie bei 538,0 Nanometern. Aufgrund der geringen Linieneinsenkung und des damit verbundenen höheren instrumentellen Rauschens in Verbindung mit großen Schwankungen der Lichtdurchlässigkeit der Erdatmosphäre (Seeing) wurden die Messungen sehr erschwert, und waren unter den gegebenen Umständen für sich ein Kunststück. Die Auswertung der Daten ergab das in Abb. 9 gezeigte Diagnostik-Diagramm, in dem neben der gemessenen spektralen Intensität auch theoretisch vorhergesagte Frequenzen eingetragen sind. Mehr oder weniger deutlich sind mindestens drei Streifen maximaler Intensität erkennbar, die mit den theoretischen Voraussagen gut übereinstimmen. Die Tatsache, dass offensichtlich nur ganz bestimmte Kombinationen von Frequenzen und Wellenzahlen (bzw. Wellenlängen) auftreten, ist ein untrügliches Zeichen für den Resonanzcharakter der Schwingungen. Damit war erstmals der von Ulrich 1970 vorhergesagte modale Charakter der Fünf-Minuten-Oszillationen experimentell bewiesen. Die Fünf-Minuten-Oszillationen repräsentieren also globale Eigenschaften der Sonne und sind nicht, wie lange geglaubt wurde, ein lokales Oberflächenphänomen. Im April 1975 wurden Deubners Ergebnisse in der Zeitschrift *Astronomy and Astrophysics* veröffentlicht.

Erst im Mai 1976 gelang es auch Rhodes, aus seinen Daten ein Diagnostik-Diagramm zu berechnen. Auch darin waren die für die Eigenschwingungen typischen Äste zu erkennen. Das war eine unabhängige Bestätigung der Entdeckung Deubners.

Die Dicke der Konvektionszone

Die von Deubner gemessenen Frequenzen lagen systematisch um etwa fünf Prozent unter den theoretischen Frequenzen, die Ulrich sowie Hiroyasu Ando und Yoji Osaki von der Universität Tokyo berech-



▲ Abb. 9: Das Diagnostik-Diagramm des photosphärischen Geschwindigkeitsfeldes nach den Messungen Deubners vom 20. 9. 1974. Die Linien bezeichnen die Vorhersagen von Ulrich (1970, durchgezogen) und Wolff (1973, gestrichelt). Die Wellenzahl $k = 1$ entspricht einer Wellenlänge von 6280 km. Die von Frazier (1968) beobachteten zwei spektralen Maxima sind mit einem »F« markiert. (Bild: Astronomy and Astrophysics)

net hatten. Diese Diskrepanz war ein Indiz dafür, dass das damalige Standard-Sonnenmodell einer Korrektur bedurfte: Es sagte in der Konvektionszone eine zu starke Abnahme der Temperatur voraus. Wie Erika Böhm-Vitense, damals an der Universität Kiel, bereits 1958 gezeigt hatte, lässt sich eine allmählichere Abnahme der Temperatur im Außenbereich der Sonne mit den Modellen in Einklang bringen, wenn man eine größere Dicke der Konvektionszone annimmt. Wie Douglas O. Gough von der Universität Cambridge erkannte, sind demzufolge die Eigenfrequenzen der Schwingungen auf charakteristische Weise mit der Dicke der Konvektionszone verknüpft. Gough konnte zeigen, dass man für die Dicke dieser Zone anstatt des damals favorisierten Wertes von 150000 Kilometern bes-

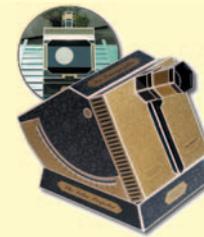
ser einen Wert von 225000 Kilometern annimmt. Davon berichtete er im September 1976 in seinem Eröffnungsvortrag bei einer internationalen Konferenz über Sonnenphysik in Nizza.

Unabhängig von Gough erkannten auch Rhodes und Ulrich, dass man aus den Schwingungsmessungen auf die Dicke der Konvektionszone schließen kann. Ihre Vorgehensweise bestand darin, numerische Modelle der äußeren Schichten der Sonne zu rechnen, und das Modell auszuwählen, dessen theoretische Frequenzen am besten mit den Beobachtungen übereinstimmen.

Mit den Messungen von Rhodes vom Januar 1975 ergab sich eine Dicke der Konvektionszone von 207000 Kilometern, im Einklang mit dem Resultat Goughs. Weitere Ergebnisse der Helioseismologie führten in den folgenden Jahren noch mehrfach zu entscheidenden Revisionen unseres Bildes vom Inneren der Sonne. □



Johann Reiter ist Gastforscher am Zentrum für Mathematik der Technischen Universität München. Er ist Forschungsbeauftragter des SOI-MDI Projekts von SOHO.



Der Sonnen-Projektor

Mit seinem handlichen Format von nur 200 x 250 x 250 mm und seinem bequemen Einblick, rechtwinklig zum Lichteinfall, verspricht der Sonnen-Projektor gefahrloses Beobachtungsvergnügen. Die Optik besteht aus einem zweilinsigen Glas-Achromaten mit 30 mm Durchmesser und 250 mm Brennweite, der in 5 Stufen bis auf 12 mm abgeblendet werden kann, einer Wechseloptik mit 2 Konkavspiegeln mit 10 bzw. 14 mm Brennweite und einem Planspiegel aus Acrylglas. *Vorgestanzter Kartonbausatz für ein Sonnen-Projektionsgerät zur gefahrlosen Sonnenbeobachtung.* Bestell-Nr. 1709. € 19,90



Solarscope

Ein preiswertes Teleskop zur Sonnenbeobachtung im Projektionsverfahren. Beobachten Sie Sonnenflecken, Venustransit und Finsternisse. Eine hochwertige Optik (Öffnungsblende 40 mm) in Kombination mit stabiler Kartonbauweise ermöglicht puren Beobachtungsgenuss. *Format: 370 x 260 x 410 mm. Bestell-Nr. 1676. € 49,-*

Solarscope Ausbildungsversion

Daran können bis zu 7 Beobachter gleichzeitig arbeiten. Es enthält zusätzlich eine Messschablone und ein Bleilot. *Format: 380 x 450 x 600 mm. Best-Nr- 1677. € 84,-*



EVERlight XXL

Die Taschenlampe **EVERlight** benötigt keine Batterien oder Akku und ist extrem benutzerfreundlich. Sie schütteln einfach die Taschenlampe eine halbe Minute waagrecht und haben ca. 8 Minuten einen kräftigen Lichtstrahl dank LED-Birne! *Wasserdicht, stoßfest und rostfrei; 280 mm lang, 330 g schwer. Bestell-Nr. 1672. € 34,90*



Magnetschwebeglobus

Durch einen Magnetsensor wird der Schwebeglobus in einem Schwebezustand gehalten. *Farbe: silbermetallisch, Ø 100 mm, mit Netzstecker. Bestell-Nr. 1668. € 39,-*



Science-Shop.de

vor allem Wissen

Bequem bestellen:

→ direkt bei
www.science-shop.de

→ telefonisch
06221/9126-841



→ per E-Mail:
shop@wissenschaft-online.de

→ per Fax:
06221/9126-869

* Bei Bestellungen in Deutschland & Österreich unter € 20,- sowie bei Bestellungen im sonst. Ausland berechnen wir € 3,50. Alle Preise inkl. Umsatzsteuer. Preise unter Vorbehalt.