

Neue Blicke in das Innere der Sonne

VON MARKUS ROTH

Genauere Daten und neue Rechenmethoden ermöglichen es, die Sonne aufgrund von Schwingungen ihrer Oberfläche bis in den Kern hinein zu untersuchen.

Die in der Helioseismologie verwendeten Methoden gleichen in mancher Weise den Untersuchungen der Erde in der Geoseismologie. Man beobachtet niederfrequente Schallwellen, die das Sonneninnere durchlaufen und sich nur sehr schwach an der Oberfläche widerspiegeln. Diese Schallwellen führen dazu, dass sich mehrere tausend Kilometer große Bereiche der Sonnenoberfläche in etwa im Fünf-Minuten-Rhythmus heben und sen-

ken. Ihre Analyse erlaubt es, die Schallgeschwindigkeit überall im Sonneninneren zu messen. Auf dieser Grundlage lässt sich wiederum auf die Temperatur, Strömungen und die chemische Zusammensetzung an jedem Punkt in der Sonne schließen.

Erkenntnisreiche Schwingungen

Ganz allgemein verraten Schwingungen und Vibrationen eines Körpers viel über seine Struktur. Ein Beispiel sind Musikin-

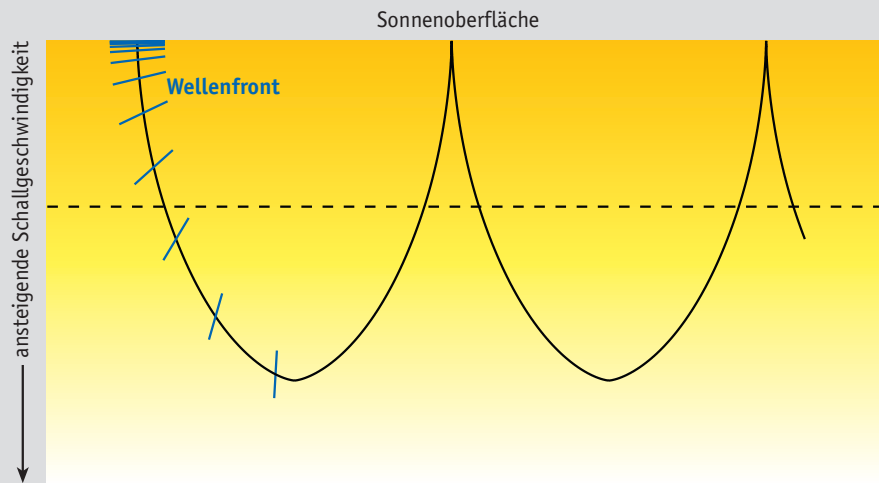
strumente, die man alle an ihrem unterschiedlichen Klang erkennen kann. Dieser Unterschied im Klang kommt durch den unterschiedlichen Bau der Instrumente zu Stande.

Die Summe der abgegebenen Schallwellen ist für jedes Instrument charakteristisch. Die Schallwellen, die sich auf der Sonnenoberfläche zeigen, verraten auf ähnliche Weise etwas über den inneren Aufbau der Sonne (siehe Kasten rechts).

In der Helioseismologie versucht man, aus diesen Schallwellen auf den Zustand des Sonneninneren zu schließen. Es gibt verschiedene Typen von solaren Oszillationen. Sie werden entsprechend ihren Hauptbeiträgen zur rücktreibenden Kraft

▶ Abb. 1: Pfad von Schallwellen innerhalb der Sonne, deren Oberfläche hier vereinfacht flach dargestellt ist.

◀ Abb. 2: Stehende Welle auf der Sonne. In den blauen und roten Bereichen hebt und senkt sich die Sonnenoberfläche periodisch um mehrere Kilometer. In den gelben Bereichen kommt die Schwingung zur Ruhe. Die dargestellte Welle hat den harmonischen Grad $l = 15$, die azimutale Ordnung $m = 10$ und die radiale Ordnung $n = 14$.



klassifiziert: Akustische Wellen, bei denen der Druckgradient die Rückstellkraft darstellt, heißen *p*-Modi. Schwerewellen, bei denen der Auftrieb die Rückstellkraft ist, heißen *g*-Modi. Schwerewellen auf der Sonnenoberfläche entsprechen den Wellen an der Oberfläche tiefen Wassers und werden *f*-Modi genannt. In der seismologischen Untersuchung der Sonne verwendet man heutzutage *p*- und *f*-Modi. Die *g*-Modi haben ihre größte Amplitude im Kern der Sonne und werden zur Oberfläche hin so stark gedämpft, dass man sie bisher noch nicht nachweisen konnte.

Stehende Wellen

Die *p*- und *f*-Modi weisen ein diskretes Spektrum auf, d. h. es treten nur bestimmte, abzählbare Kombinationen von Wellenlänge und Frequenz auf. Das ist deshalb der Fall, weil die Wellen durch große Bereiche des Sonneninneren laufen und es dadurch zur konstruktiven Überlagerung mit anderen Wellen kommen kann. An der Sonnenoberfläche werden Schallwellen auf Grund der nach außen dramatisch abnehmenden Gasdichte nach innen reflektiert. Folgt man einer Schallwelle auf ihrem Weg von der Oberfläche aus, bewegt sie sich zunächst nahezu geradeaus in Richtung Sonnenzentrum. Zum Sonnenzentrum hin steigt die Temperatur kontinuierlich an. Mit dem Temperaturanstieg ist ein Anstieg der Schallgeschwindigkeit verbunden. Bei einer Welle, die von der Oberfläche schräg nach innen reflektiert wird, bewegt sich der dem Zentrum zugewandte Teil der Wellenfront schneller als der oberflächennahe Teil (Abb. 1). Die Bewegungsrichtung der Welle dreht sich somit immer stärker vom Sonnenzentrum weg.

Der Verlauf einer Schallwelle durch das Sonneninnere hängt deshalb vom Verlauf der Schallgeschwindigkeit im Sonneninneren ab. Der Punkt der nächsten Annäherung an das Sonnenzentrum heißt Umkehrpunkt des Modus. Nach

dem Durchschreiten des Umkehrpunktes bewegt sich die Welle nach außen, bis sie wieder die Oberfläche erreicht. An der Oberfläche wird sie abermals wie an einem Spiegel reflektiert und bewegt sich wieder zurück nach innen. Die nach innen laufenden Wellen überlagern sich mit den nach außen laufenden Wellen. Für ganz bestimmte Frequenzen führt diese Überlagerung von Wellen dazu, dass sich stehende Wellen mit charakteristischen Mustern ausbilden. In der Sonne sind es stehende Wellen im dreidimensionalen Sinn.

Das Oszillationsmuster an der Oberfläche ist gekennzeichnet durch Knotenlinien, auf denen die Bewegung zur Ruhe kommt (Abb. 2). Die Gesamtzahl der Knotenlinien auf der Oberfläche wird harmonischer Grad l genannt. Die Schwingungsmodi können Knotenlinien aufweisen, die durch den Pol gehen. Die azimutale Ordnung m gibt die Anzahl dieser Knotenlinien an. Sie ist immer kleiner oder gleich dem harmonischen Grad l . Im Innern der Sonne kann entlang des Radius die Amplitude der stehenden Welle ebenfalls eine Anzahl von Knotenlinien in gewissen Abständen vom Zentrum

aufweisen. Diese Anzahl wird radiale Ordnung n genannt. Kennt man die drei Zahlen n , l und m , so weiß man eindeutig, welchen Modus man betrachtet.

Eine einzelne stehende Welle (auch Schwingungsmodus genannt) hat an der Oberfläche eine Amplitude von mehreren Zentimetern pro Sekunde. Das gleichzeitige Auftreten von etwa zehn Millionen stehenden Wellen in der Sonne führt zu dem an der Oberfläche sichtbaren Phänomen der Fünf-Minuten-Oszillationen mit Geschwindigkeitsamplituden bis zu einigen Kilometern pro Sekunde.

Anregung

Die Anregung der Oszillationen erfolgt in der Konvektionszone der Sonne. Dort gibt es turbulente Strömungen, welche die Schallerzeugung ermöglichen. Auf engem Raum steigt gleichzeitig heißes Plasma in den Granulen aus den tieferen Bereichen der Konvektionszone auf, kühleres Material sinkt in den granularen Zwischenräumen ab. Dadurch kommt es zu starken und turbulenten Verwirbelungen der Strömungen, die ein akustisches Rauschen mit sich bringen. Der Vorgang ähnelt den Geräuschen, die ein Wasser-

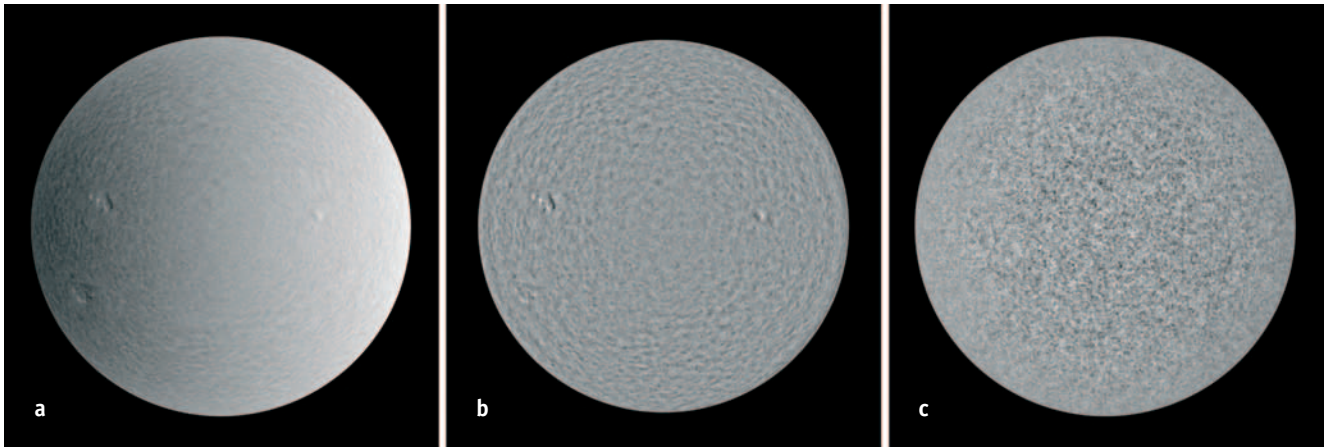
Klangproben der Sonne

Die Fünf-Minuten-Oszillation und die meisten anderen Schwingungen der Sonnenoberfläche können als Resultat stehender Schallwellen im Sonneninneren gedeutet werden. Jede einzelne dieser Sinusschwingungen ergibt einen Ton, ihre Summe einen Klang. Mit einer typischen Frequenz von etwa drei Millihertz sind diese Töne so tief, dass sie weit unterhalb der menschlichen Hörgrenze liegen. Dennoch ist es möglich, Klangproben der Sonne zu

erhalten. Dazu muss man die auf der Sonne gemessenen Geschwindigkeitssignale der Oszillationsdaten in Intensitäten umrechnen und vom statistischen Rauschen reinigen. Komprimiert man sie, um ihre Frequenz zu erhöhen, so lassen sie sich in den menschlichen Hörbereich bringen. In den unten aufgeführten Seiten im Internet finden sich Hörbeispiele, die auf diese Weise aus Daten des Instruments MDI des Satelliten SoHo gewonnen wurden. G. H.

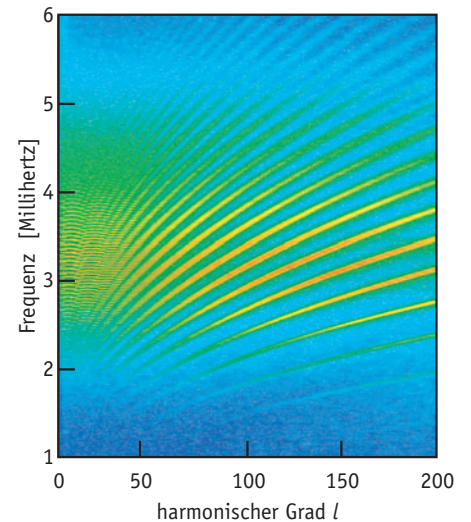
<http://soi.stanford.edu/results/sounds.html>

<http://solar-center.stanford.edu/singing/singing.html>



▲ Abb. 3: (a) Dopplergramm einer einzelnen GONG-Aufnahme. Die dunklen Farben zeigen Bewegungen zum Beobachter an, die hellen Bereiche bewegen sich vom Beobachter weg. Der dominante Beitrag stammt von der Rotation der Sonne. (b) Mittleres GONG-Dopplergramm aus 45 Bildern. (c) Dopplergramm einer einzelnen GONG-Aufnahme abzüglich des Mittels aus 45 Aufnahmen. Die hellen und dunklen Gebiete sind eine Momentaufnahme aufsteigender und absinkender Regionen. (Bild: GONG, Tucson)

▶ Abb. 4: Diagnostik-Diagramm, berechnet aus einer 36 Tage langen Zeitreihe von GONG-Aufnahmen vom Mai und Juni 1996. Aufgetragen ist die Frequenz der Schwingungen gegen den harmonischen Grad l . Die Farbskala gibt die spektrale Leistungsdichte an, ein Maß für die in der spezifischen Schwingungsform enthaltene Energie: Rot steht für eine große, Blau für eine geringe Energie. Die größte Energie ist in Schwingungen mit etwa 3 Millihertz enthalten, also der Fünf-Minuten-Oszillation. (Bild: GONG, Tucson)



kessel von sich gibt. Vermutlich spielen auch »akustische Ereignisse« eine wichtige Rolle. Das ist die stoßweise, zufällig auftretende Schallerzeugung in einem intergranularen Raum. Diese Anregung ist vergleichbar mit Sand, der beständig, aber dennoch mit variierender Intensität, auf eine Wasseroberfläche rieselt und Wellen erzeugt. Im genannten Beispiel der Musikinstrumente ist die Anregung der solaren Oszillationen durch die Konvektion mit einer Gitarre vergleichbar, die man durch unregelmäßiges Zupfen an den Saiten spielt.

Die Schallwellen, die nahe der Sonnenoberfläche erzeugt werden, wandern in das Sonneninnere und führen zu den stehenden Wellen, die wir als Oszillationen der Sonnenoberfläche sehen. Durch konstruktive Interferenz, d.h. Überlagerung von Schwingungen, verbleiben nur diejenigen Wellen, die im Sonnenkörper resonant sind.

Datengewinnung

Die Oszillationen können auf zwei verschiedene Weisen gemessen werden. Einerseits kann man ein Dopplergramm aufnehmen. Dabei wird die beobachtete Frequenzverschiebung der Spektrallinien genutzt, um an jedem Punkt der Sonnenoberfläche die radialen Ge-

schwindigkeitskomponenten zu bestimmen und darzustellen (Abb. 3).

Andererseits kann man die Oszillationen aus Schwankungen der Intensität einer Spektrallinie oder in der Gesamtintensität der Sonne ableiten. Das ist deshalb möglich, weil sich Schallwellen als Druckschwankungen auffassen lassen, denen Schwankungen der Temperatur entsprechen. Dadurch werden die atomaren Prozesse, die zur Entstehung einer Spektrallinie führen, gestört, so dass die Intensität einer Spektrallinie im Gleichtakt mit den Schwingungen variiert. Zudem lässt sich dieses Phänomen in der Gesamtintensität der Sonne, dem »Weißlicht«, beobachten. In gewissem Sinn ist die Sonne also ein pulsierender veränderlicher Stern.

Unabhängig von der Beobachtungstechnik, enthält das Signal gleichzeitig Beiträge einer großen Anzahl von Oszillationen, die auf der Sonne angeregt sind. Ihre Analyse besteht aus mehreren Schritten.

Bei der Untersuchung mit Dopplergrammen wird im ersten Schritt die durch die Sonnenrotation und das großskalige Geschwindigkeitsfeld der Supergranulation verursachte Dopplerverschiebung von den Einzelaufnahmen abgezogen. Die Anteile der Rotation und der Super-

granulation erhält man aus der Addition sehr vieler Aufnahmen. Da die Oszillationen mit einer Periode von fünf Minuten schwanken, heben sich diese Bewegungen im Mittel gegenseitig auf, wenn man nur genügend viele Aufnahmen überlagert. Als Result dieser Korrektur treten die solaren Oszillationen im Dopplergramm deutlich hervor (Abb. 3c).

Anschließend werden die einzelnen Oszillationen, die alle gleichzeitig angeregt sind, von einander getrennt. Dies geschieht sowohl bei den Dopplergrammen als auch bei den Intensitätsbildern durch räumliche Filter, welche idealerweise nur Oszillationen zu einem festen Wert l und einem zugehörigen Wert m durchlassen. Dadurch werden die einzelnen Serien an Aufnahmen von Geschwindigkeitskomponenten in eine Vielzahl von Serien aufgespalten. Jede dieser einzelnen Zeitserien enthält nun nur noch Oszillationen zu einem einzigen harmonischen Grad l und einer einzigen azimutalen Ordnung m .

Der dritte Schritt ist eine Fourieranalyse. Dadurch werden die einzelnen Modi, die sich noch in der radialen Knotenzahl unterscheiden, voneinander getrennt. Das Ergebnis kann in einem Diagnostik-Diagramm (Abb. 4) oder für ein bestimmtes Paar von l - und m -Werten

in einem Spektrum der spektralen Leistungsdichte dargestellt werden. In beiden Darstellungsformen trägt man die spektrale Leistungsdichte auf. Die spektrale Leistungsdichte ist ein Maß für die Energie pro Zeiteinheit in einem gewissen Frequenzbereich der Oszillationen. Man kann sie sowohl für die einzelnen Zeitserien bestimmen, die in den vorangegangenen Schritten aus Dopplergrammen oder Intensitätsbildern gewonnen wurden, als auch für Aufnahmen der ganzen Sonne. Im Diagnostik-Diagramm wird die spektrale Leistungsdichte in Abhängigkeit von der Frequenz und dem harmonischen Grad l dargestellt.

Kleine Werte von l entsprechen ausgedehnten Strukturen, große Werte hingegen kleinen Strukturen. In einem Spektrum wird die spektrale Leistungsdichte hingegen nur in Abhängigkeit von der Frequenz aufgetragen. In beiden Fällen geben die Daten der Sonne Hinweise auf diskrete, abzählbare Oszillationen. Die schmalbandigen »Äste« im diagnostischen Diagramm sind Oszillationen mit gleicher radialer Ordnung n . Der unterste Ast stellt die f -Modi dar. Offensichtlich ist die spektrale Leistungsdichte nicht gleichverteilt, sondern konzentriert sich entlang gewisser Äste.

Die Frequenzauflösung ist durch die Länge des aufgenommenen Datensatzes beschränkt. Will man die Frequenzen einzelner solarer Oszillationen auflösen, so benötigt man einen ununterbrochenen Datensatz von der Mindestlänge eines Tages. Für die Abb. 4 wurde eine Aufnahme von 36 Tagen Länge verwendet. Dies stellt eine große Herausforderung dar, denn

durch den Wechsel von Tag und Nacht werden irdische Aufnahmen der Sonne auf natürliche Weise unterbrochen. Einen Ausweg bieten Aufnahmen während des antarktischen Sommers vom Südpol aus. Dort hat man über mehrere Monate die Möglichkeit, die Sonne ununterbrochen aufzunehmen.

GONG

Noch längere ununterbrochene Aufnahmen erhält man durch ein Netzwerk von Sonnenobservatorien, die rund um die Erde verteilt sind. Die »Global Oscillation Network Group« (GONG) unterhält seit 1995 ein solches Netzwerk aus Observatorien, die sich auf verschiedenen geographischen Längen der Erde befinden (Abb. 5). Dadurch kann man witterungsbedingt im Mittel 87 Prozent eines Tages die Sonne ununterbrochen beobachten. Finanziert wird dieses Netzwerk von der U.S. National Science Foundation, aber viele internationale Kollaborationen sind ebenfalls daran beteiligt.

Jedes der sechs Teleskope besteht aus zwei Spiegeln, welche die Sonne auf ihrer scheinbaren Bahn verfolgen und das Licht horizontal in einen Frachtcontainer leiten, der als Observatoriumsgebäude dient. Die Öffnung des Teleskops beträgt nur 2.8 cm. Mit Hilfe einer Einheit aus CCD-Kamera, Michelson-Interferometer und Computer werden im Minutentakt Geschwindigkeitsdiagramme aufgenommen.

Bei klarem Wetter beobachtet jedes Teleskop von GONG die Sonne täglich von ihrem Aufgang bis zum Untergang. Eine Woche lang kann das Gerät vollkommen

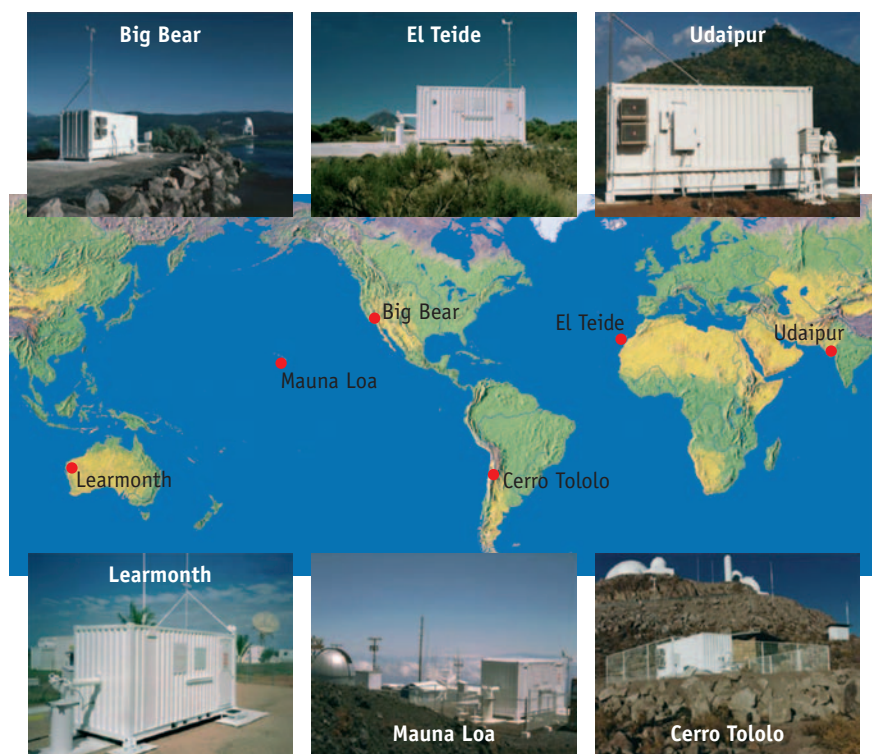
automatisch betrieben werden. Der einzige notwendige Eingriff eines Benutzers vor Ort besteht dann im Auswechseln der Datenbänder oder in Wartungsarbeiten.

SOHO

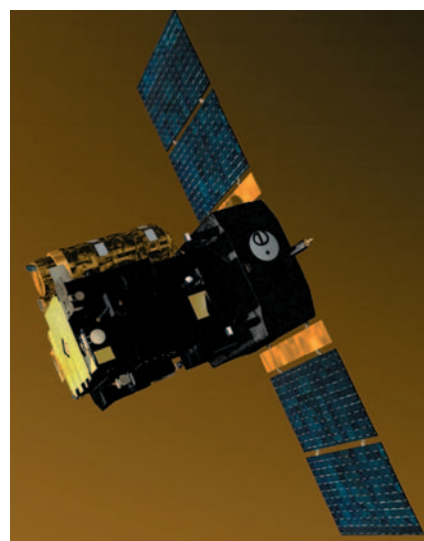
Seit 1996 werden auch mit dem Michelson-Doppler-Interferometer (MDI) an Bord des Satelliten SOHO weitgehend ununterbrochen Aufnahmen der Sonne gewonnen (Abb. 6). Beobachtungen mittels eines Weltraumobservatoriums von einer geeigneten Umlaufbahn aus vermeiden das Problem ständiger Unterbrechungen der Beobachtung durch den Tagesrhythmus. SOHO, ein gemeinsames Projekt von ESA und NASA (siehe SuW 5/2000, S. 338), ist seit 1996 mit geringen Unterbrechungen in Betrieb und wird voraussichtlich bis 2007 arbeiten.

Die Aufnahmen von SOHO decken im Mittel etwa 96 Prozent eines Tages ab. SOHO trägt drei Instrumente, die zur helioseismischen Datengewinnung gedacht sind. Die Instrumente GOLF (Global Oscillations at Low Frequency) und VIRGO (Variability of solar Irradiance and Gravity Oscillations) zielen insbesondere darauf ab, die g -Modi nachzuweisen. Das Instrument SOI/MDI (Solar Oscillations Investigation/Michelson Doppler Imager) liefert im Minutentakt Geschwindigkeitsdiagramme der Sonnenoberfläche, welche mehr als 800000 gleichzeitigen und unabhängigen Geschwindigkeitsmessungen entsprechen.

Neben GONG und SOHO gibt es weitere Beobachtungsprojekte. Dazu gehört das Instrument LOWL auf dem Mauna Loa, (Hawaii), das Birmingham Solar Oscilla-



◀ Abb. 5: Weltkarte mit den sechs Stationen des GONG-Netzwerks. (Bild: (Bild: TerraForma/SuW))



▲ Abb. 6: Der Satellit SOHO. (Bild: NASA/ESA)

tion Network (BISON), das französische Projekt IRIS (Installation d'un Réseau International de Sismologie solaire) sowie TON (Taiwan Oscillation Network).

Inversion

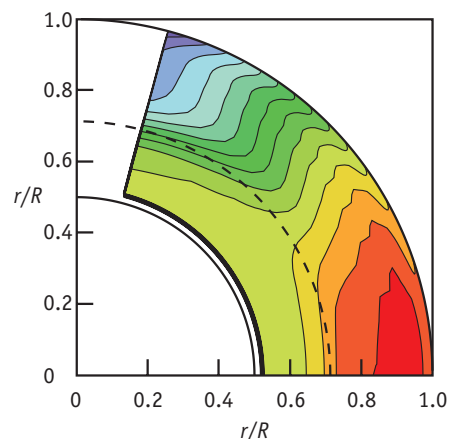
Seismologische Rückschlüsse über das Sonneninnere erhält man mittels Inversion. Unterscheiden sich zwei Modi in n oder l , so bedeutet das, dass ihre Wege durch die Sonne leicht von einander abweichen. Da diese Modi verschiedene Frequenzen haben, bedeutet dies weiterhin, dass die Schallgeschwindigkeit entlang dieser beiden Wege ebenfalls unterschiedlich sein muss. Etwas genauer dargestellt, sind die beobachteten Frequenzen ein integriertes Maß der Schallgeschwindigkeit entlang des Weges der Welle. Diese Kenntnis kann man nun im Umkehrschluss zur seismischen Untersuchung der Sonne verwenden. Man kennt die Abhängigkeit der Frequenz von der Schallgeschwindigkeit, jedoch lässt sich die Schallgeschwindigkeit nicht direkt messen, sondern nur die Frequenz. Will man die Schallgeschwindigkeit bestimmen, so muss man dies durch die Invertierung einer so genannten Integralgleichung tun. Dies ist ein schwieriges mathematisches Problem. Helioseismologen verwenden sehr viel Mühe darauf, effektive mathematische Techniken und Computersoftware zu entwickeln, um die gemessenen Oszillationsfrequenzen zu invertieren. Aus dem Frequenzunterschied kann man dann die Schallgeschwindigkeit in dem Bereich der Sonne bestimmen, den nur eine der beiden Wellen durchlaufen hat.

Ein detailliertes Bild der physikalischen Bedingungen im Sonneninneren erhält man nur dann, wenn man die Frequenzen sehr vieler Modi bestimmt. Anschließend ist sorgfältig zu analysieren, welcher Modus welchen Bereich im Sonneninneren durchlaufen hat. So kann man in jedem Teil der Sonne die Schallgeschwindigkeit bestimmen. Auf diese Weise erhält man ein sehr detailliertes Bild der physikalischen Bedingungen im Sonneninneren. Es stellt sich heraus, dass Oszillationen mit $m = l$ zum Äquator hin konzentriert sind, während Oszillationen mit niedrigem m die höheren Breiten erreichen. Durch die Studie von Oszillationen mit verschiedenem m kann man Bedingungen in der Sonne untersuchen, die von der Breite abhängen. Dies ist insbesondere für die Messung der Rotationsrate im Sonneninnern wichtig.

Die helioseismische Sonne

Die mit der Helioseismologie bestimmten Schallgeschwindigkeiten im Inneren der Sonne stimmen mit den Erwartungen theoretischer Modelle innerhalb von

▶ Abb. 7: Abgeleitete Rotationsrate der Sonne als Funktion der Tiefe und der Breite, berechnet aus Daten des GONG-Netzwerks von März 1996 bis Januar 1998. Diese Falschfarbendarstellung stellt die differentielle Rotation der Sonne in einem Querschnitt durch die äußere Hälfte der Sonne dar (blau langsam, rot schnell). Die gestrichelte Linie markiert die untere Grenze der Konvektionszone. Der Sonnen-nordpol befindet sich oben.



höchstens 0.5 Prozent überein. Dieses bemerkenswerte Ergebnis spricht dafür, dass die Astronomen das Sonneninnere im Wesentlichen gut verstanden haben.

Ausgehend von der Schallgeschwindigkeit lässt sich die Zentraltemperatur der Sonne zu 15.7 Millionen Kelvin bestimmen. Dieses Ergebnis war eines der ersten, die nach Beginn der Beobachtungskampagne mit SOHO 1997 verfügbar waren. Damit wurden die theoretischen Sonnenmodelle bestätigt und es wurde gezeigt, dass das solare Neutrinoproblem (siehe Seite 23) einen nichtastronomischen Ursprung haben muss.

Ebenfalls von der Schallgeschwindigkeit ausgehend konnte die Tiefe der Konvektionszone mit großer Genauigkeit bestimmt werden. Sarbani Basu von der Yale University und H. M. Antia vom Tata Institute for Fundamental Research in Bombay (Indien) bestimmten das Verhältnis von Tiefe der Konvektionszone und Sonnenradius zu 0.287 ± 0.001 des Sonnenradius. Demzufolge ist die Materie der Sonne in ihren äußeren 28.7 Prozent in ständiger Bewegung und transportiert Energie aus dem Sonneninneren an die Oberfläche.

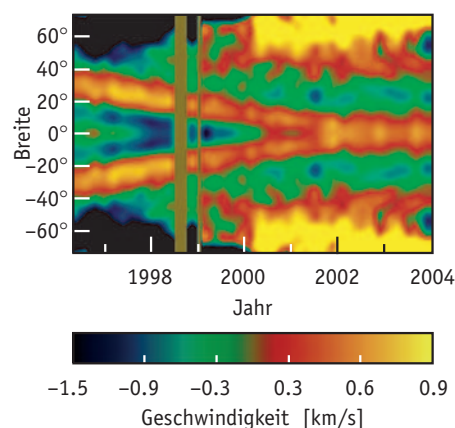
Den Sonnenradius kann man aus den Frequenzen der f -Modi bestimmen. Die Auswertung ergibt einen Wert von $695\,700 \text{ km} \pm 100 \text{ km}$. Das ist eine sehr viel höhere Genauigkeit als es andere Methoden ermöglichen.

Innere Rotation

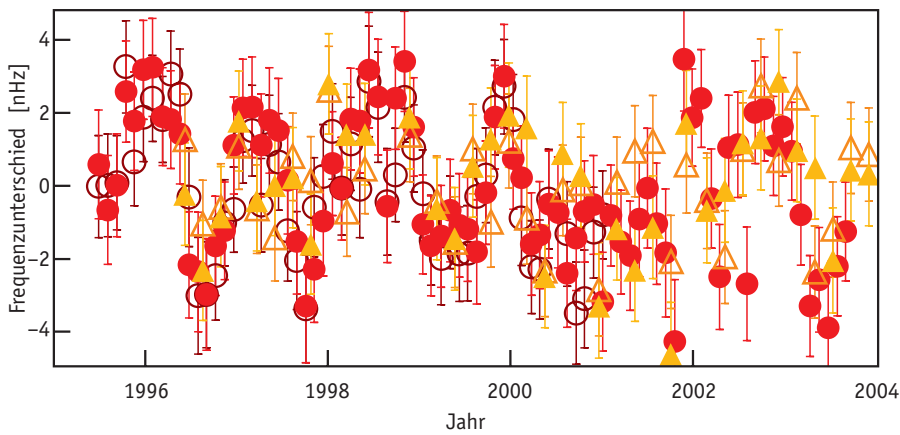
Die Sonnenoberfläche rotiert nicht gleichförmig. Der Äquator benötigt für einen vollen Umlauf etwa 25 Tage, während es für die Bereiche an den Polen etwa 30 Tage sind. Die Ursache dieser beobachteten differentiellen Rotation der Sonne ist nicht im Detail bekannt. Man kann jedoch herausfinden, ob sie sich bis ins Zentrum der Sonne fortsetzt. Wie Franz-Ludwig Deubner, damals an der Universität Würzburg, bereits 1979 zeigte, ist das mit der Inversion der Frequenzen der p -Modi möglich. Abb. 7 zeigt die Rotation in einem Querschnitt durch die Son-

ne, welche aus Daten der GONG-Gruppe bestimmt wurde. Das Diagramm zeigt, dass die Sonne auch unter der Oberfläche mit einer Geschwindigkeit rotiert, die derjenigen an der Oberfläche ähnelt, wo sie aus der Beobachtung von Sonnenflecken bestimmt wurde. Die gesamte Konvektionszone rotiert mit ähnlicher Geschwindigkeit wie die an der Oberfläche. Der Übergang zu konstanter Rotationsrate am Boden der Konvektionszone erfolgt innerhalb eines Zehntels des Sonnenradius. Jedoch sind die Details dieses Übergangs und die Ursache für die Variation der Rotationsrate noch umstritten.

Zieht man Daten aus verschiedenen Beobachtungsjahren heran und vergleicht diese miteinander, so zeigt sich Erstaunliches. Die differentielle Rotation der Sonne verändert sich im Bereich der Oberfläche im Laufe der Zeit (Abb. 8). Von Zeit zu Zeit wird entlang eines Breitengrads die Rotation leicht beschleunigt und wieder abgebremst. Diese Zonen von Beschleunigung und Abbremsung wandern mit dem 11-jährigen Sonnen-



▶ Abb. 8: Bänder zonaler Strömungen am unteren Rand der Konvektionszone. Die Abbildung basiert auf SOHO-Daten aus den Jahren 1996 bis Anfang 2004. Der zeitweilige Ausfall von SOHO führte zu den Lücken 1998 und Anfang 1999. (Bild: Rachel Howe, Tucson)



▲ Abb. 9: Differenz zwischen der beobachteten und der mittleren Rotationsfrequenz am Äquator bei 72 Prozent des Sonnenradius. (Bild: R. Howe, Tucson)

zyklus von höheren Breiten zum Äquator. Dadurch entsteht der Eindruck einer zonalen Strömung zum Äquator. Diese Bänder von etwas schnellerer und langsamerer Rotation stehen scheinbar in engem Zusammenhang mit der während des Zyklus zum Äquator gerichteten Tendenz der Erscheinungsorte von Sonnenflecken. Dieses Phänomen ist aber nur nahe der Oberfläche vorhanden, unterhalb von 0,85 Sonnenradien verschwinden die wandernden Bänder.

Noch bemerkenswerter ist, dass die Rotationsrate am Boden der Konvektionszone schwankt, und zwar in einem 1,3-jährigen Zyklus (Abb. 9). In diesem Bereich der Sonne schleift, vereinfacht gesagt, eine differentiell rotierende Kugelschale über den Sonnenkern. Die resultierenden Induktionseffekte könnten der Ursprung des solaren Magnetfelds sein.

Strömungen im Sonneninneren

An der Oberfläche der Sonne ist ein Strömungsmuster in Form der Granulation erkennbar. Die Granulation besteht aus vielen einzelnen Konvektionszellen, die einen Durchmesser von etwa 1500 Kilometern und eine mittlere Lebensdauer von fünf Minuten haben. In Dopplergrammen kann man darüber hinaus noch größere Strömungszellen erkennen, die so genannte Supergranulation. Diese Zellen haben eine Ausdehnung von bis zu 30000 Kilometern und können mehrere Tage existieren. Gibt es noch größere Strömungszellen? Bislang wurden mögliche »Giant Cells« noch nicht nachgewiesen. Diese müssten sich über die gesamte Dicke der Konvektionszone erstrecken.

Mittels theoretischer Überlegungen, die Michael Stix und ich am Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik in Freiburg durchführten, gelang es Rachel Howe, Rudi Komm und mir im Jahr 2002, die

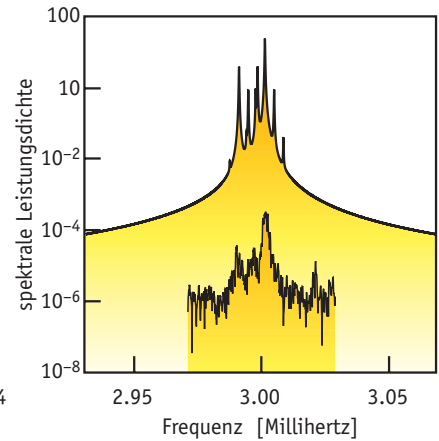
Nachweisgrenze für die bisher angewandten Techniken zu bestimmen. Wir fanden, dass jegliche großskalige Strömung mit einer langen Lebensdauer bis herab zu einer Geschwindigkeit von 10 m/s innerhalb der Konvektionszone schon jetzt nachgewiesen werden kann. Hierfür bestimmten wir das aus der Existenz großskalige Strömungen im Sonneninneren zu erwartende helioseismologische Signal. Da man solche Signale jedoch nicht beobachtet, müssen die »Giant Cells«, falls sie doch vorhanden sind, sehr langsam strömen.

Strömungen im Sonneninneren sind im Allgemeinen zeitlich veränderlich. So schwanken sie in ihrer Geschwindigkeit und in ihrem Strömungsverlauf. Somit ist das Signal, welches man seismologisch von diesen Strömen erhält, ebenfalls veränderlich. Wie Michael Stix und ich zeigen konnten, führen Veränderungen des großskaligen Strömungsfelds in der Sonne zu einer Struktur der scharfen Maxima in der spektralen Leistungsdichte. Darin müssten sich Nebenmaxima zeigen. Diese Struktur zeigt sich als Fingerabdruck der Strömungen auch in den tatsächlichen solaren Daten (Abb. 10). Die Aufgabe besteht nun darin, daraus neue seismische Inversionsmethoden zu entwickeln, um damit die Konvektionszone zu vermessen.

Lokale Helioseismologie

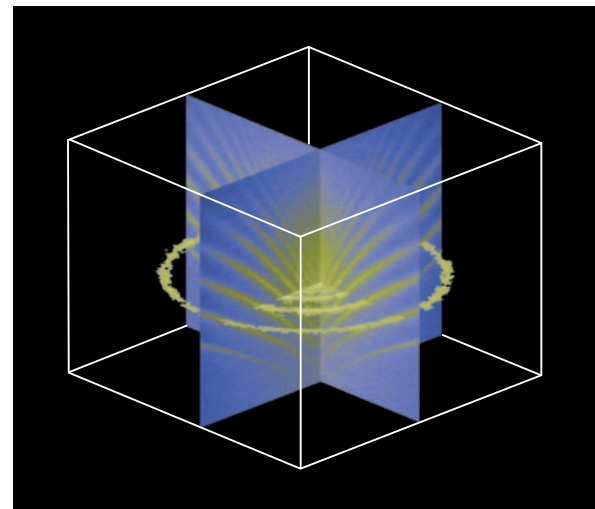
Ein recht neues Gebiet ist die lokale Helioseismologie. Sie ist besonders eng mit der Geoseismologie verwandt. Durch die Beobachtung von großen Gebieten auf der Sonne werden dabei mittels laufender Wellen lokal Aussagen über die Strömung oder das Magnetfeld im Sonneninneren gewonnen.

■ **Ring-Diagramm-Analyse:** Douglas Gough von der Cambridge University und Juri Toomre von der University of Colorado wiesen bereits 1983 darauf hin, dass die Frequenzen der solaren Oszillationen durch lokale Strömungen in der Sonne beeinflusst würden. Dieser Hinweis wur-

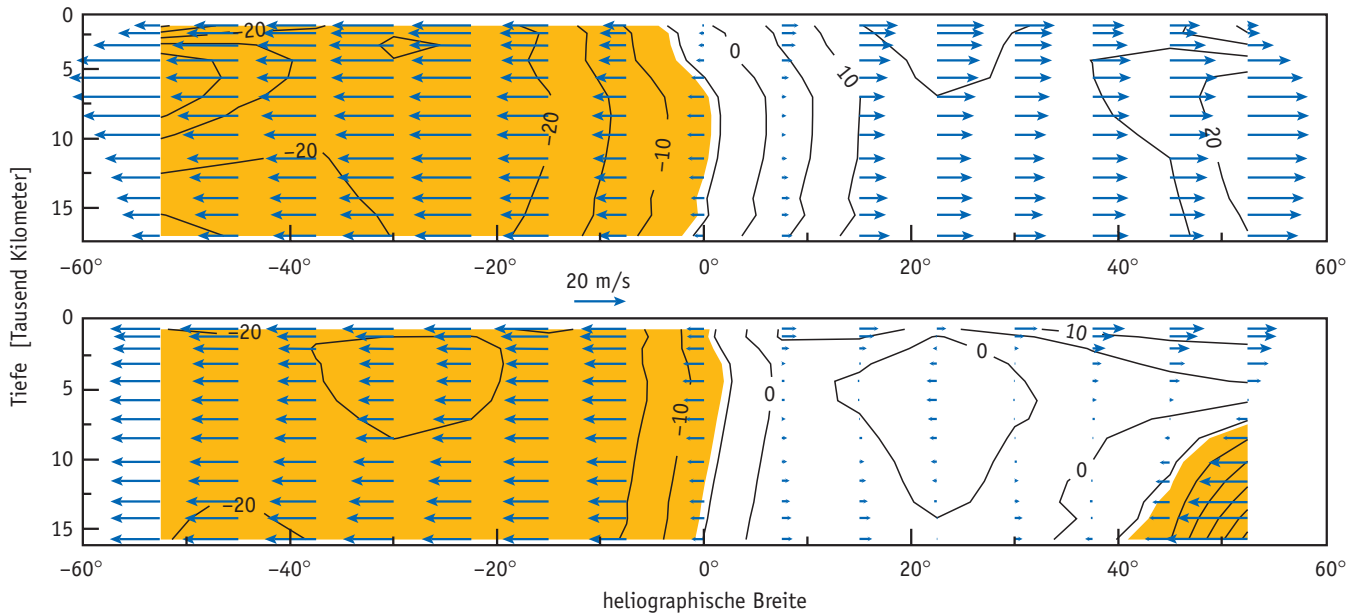


▲ Abb. 10: Struktur der Linien in der spektralen Leistungsdichte. Die obere Linie zeigt eine theoretische Rechnung, die untere Linie Daten von MDI.

▼ Abb. 11: Ringdiagramm, berechnet aus Daten des GONG-Netzwerks. (Bild: Deborah Haber, Boulder)



de von Frank Hill 1988 in das Ring-Diagramm-Analyseverfahren umgesetzt. Er beobachtete einen kleinen Ausschnitt der Sonnenoberfläche über mehrere Tage. Aus diesen Daten ermittelte er die spektrale Leistungsdichte, sowohl als Funktion der Frequenz als auch als Funktion der Komponenten des horizontalen Anteils des Wellenvektors. Als Resultat erhielt er trompetenförmige Oberflächen, die sich ergeben, wenn man in Abb. 4 die Äste um die Frequenzachse rotieren lässt (Abb. 11). Die Analyse nach Strömungen unter der Sonnenoberfläche erfolgt dann derart, dass bei fester Frequenz Schnitte durch diese Oberflächen gelegt werden. Das Ergebnis sind konzentrische Ringe, von denen jeder einem Ast im Diagnostik-Diagramm entspricht. Hill konnte zeigen, dass diese Ringe durch eine verborgene Strömung verschoben und verzerrt werden.



▲ Abb. 12: Meridionale Strömungen in der solaren Konvektionszone in einem Jahr geringer Sonnenaktivität (1997, oben) und einem Jahr intensiver Sonnenaktivität (2002, unten). Horizontal ist die heliographische Breite dargestellt, vertikal die Tiefe unter der Sonnenoberfläche. Südwärts gerichtete Strömungen sind orange unterlegt. (Bild: Deborah Haber, Boulder)

Das Maß der Verschiebung und Verzerrung entspricht dann gerade dem mittleren Einfluss der Strömung, die eine stehende Welle im Sonneninneren erfährt. Auf ähnliche Weise führen lokale Variationen der Schallgeschwindigkeit zu Veränderungen der Ringe. Durch die Betrachtung verschiedener Ringe bei verschiedenen Frequenzen kann man Daten erhalten, aus denen man die Tiefenabhängigkeit von Strömungen oder von Variationen in der Schallgeschwindigkeit mittels Inversionstechniken bestimmen kann. Wiederholt man eine Ring-Diagramm-Analyse für mehrere Bereiche auf der Sonnenoberfläche, so kann man daraus eine Karte mit den unter der Sonnenoberfläche befindlichen Strömungen und Verhältnissen in der Schallgeschwindigkeit erstellen.

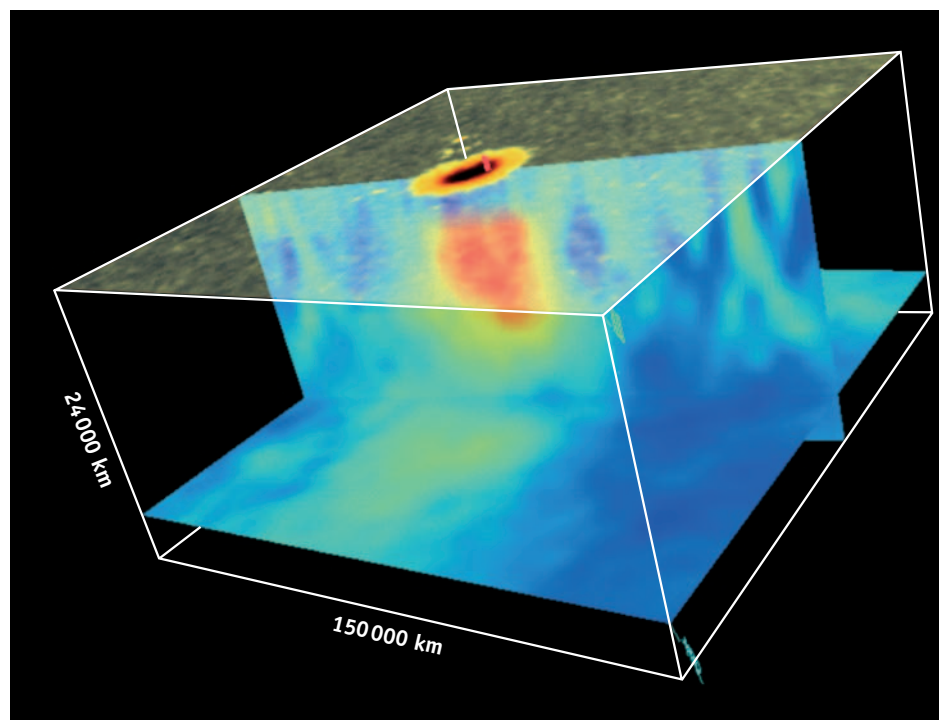
Inzwischen wurden detaillierte Untersuchungen der Konvektionszone mit dieser Technik durchgeführt. Damit konnte man meridionale Strömungen mit einer Tiefenausdehnung von mindestens 15 000 Kilometern eindeutig nachweisen. In Zeiten geringer Sonnenaktivität ist diese Strömung vom Sonnenäquator zu den Polen gerichtet. In Zeiten höherer Aktivität ist der Fall etwas komplizierter. Bei den neuesten Analysen, die von Deborah Haber (University of Colorado) und Kol-

legen durchgeführt wurden, zeigte sich, dass sich in einer Tiefe von 5000 Kilometern bis zur Nachweisgrenze von 15000 Kilometern in einem Bereich ab 20° nördlicher Breite bis zum Nordpol eine Gegenströmung ausgebildet hatte, die zum Äquator orientiert war (Abb. 12).

■ **Laufzeit-Laufstrecken-Helioseismologie:** Die häufigste Beobachtung in der Geoseismologie ist die Bestimmung der Ankunftszeit einer beginnenden Störung. Kennt man die Tiefenabhängigkeit der Geschwindigkeit seismischer Wellen innerhalb der Erde, so kann man die Laufzeit von Wellen zwischen dem Ort eines Erdbebens und dem Ort eines Empfängers berechnen. Auf diese Weise lässt sich der Ausgangspunkt jedes Erdbebens zeitlich und räumlich durch die

Aufzeichnung der Ankunftszeit der Wellen an weltweit verteilten Stationen festlegen.

Die Laufzeit-Laufstrecken-Helioseismologie (Engl. *time-distance helioseismology*) beruht auf einer ähnlichen Idee. Aus theoretischen Überlegungen kennt man den Verlauf der Schallgeschwindigkeit in der Sonne sehr genau. Somit weiß man, wie die Wellen theoretisch durch die Sonne laufen müssten. Man spricht von solch einem Laufweg wie in der Optik von einem Strahlengang. In einer Strömung oder in einem Sonnenfleck, die man mit den Sonnenmodellen noch nicht ausreichend beschreiben kann, weicht die Schallgeschwindigkeit von den theoretischen Ergebnissen ab. Dies wirkt sich auf die Laufzeiten und Laufwege der Wellen aus.

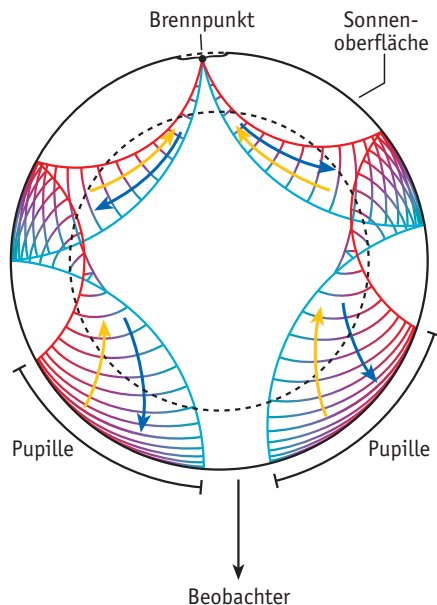


Für einen Vergleich mit theoretisch bestimmten Laufzeiten und Laufstrecken werden zuerst die Zeiten bestimmt, die akustische Wellen auf der Sonne benötigen, um von einem bestimmten Punkt an der Oberfläche zu ihrem unteren Umkehrpunkt und wieder zurück an die Sonnenoberfläche zum Beobachtungspunkt zu laufen. Ebenso wird die Distanz zweier Reflexionen an der Oberfläche bestimmt. Treten Zeitverzögerungen in der Laufzeit in Abhängigkeit von der zurückgelegten Strecke auf, kann man auf Hindernisse auf dem Weg der Wellen schließen. Nachfolgende Analysen ziehen die so gewonnenen Zeitverzögerungen heran, invertieren die Daten und berechnen auf diese Weise Karten der Zustände im Inneren der Sonne, insbesondere von der Schallgeschwindigkeit unter Sonnenflecken oder in Strömungen. Die Auflösung der Laufzeit-Laufstrecken-Helioseismologie reicht aus, um das Sonneninnere bis hinab zu einer Tiefe von 25000 km zu erforschen. Die SOI-MDI-Gruppe hat mittels Laufzeit-Laufstrecken- und Inversionsmethoden Ergebnisse über die Zustände unter einem Sonnenfleck erhalten (Abb. 13).

Abbildung der Sonnenrückseite

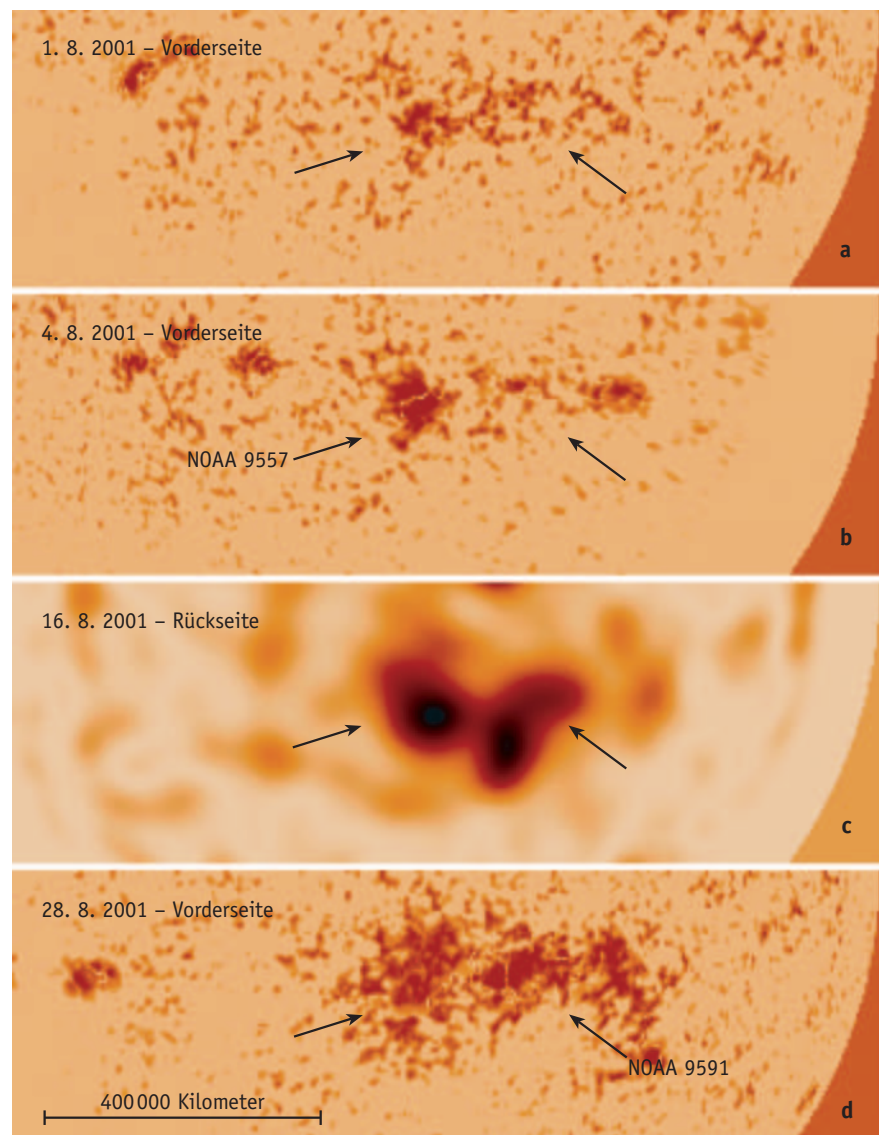
Eine Weiterentwicklung der Laufzeit-Laufstrecken-Helioseismologie wird verwendet, um das akustische Abbild eines Sonnenflecks auf der Rückseite der Sonne zu gewinnen. Doug Braun und Charles Lindsey von NorthWest Research Associates in Boulder gelang 1997 erstmals die praktische Umsetzung dieser Idee. Das Prinzip ist in Abb. 14 dargestellt.

Wellen, die auf der Rückseite der Sonne erzeugt werden, können auf der Vorderseite nach ein oder zwei Reflexionen in zwei Bereichen beobachtet werden. Ein Sonnenfleck auf der Rückseite dämpft die Wellen. Deshalb weisen die Wellen, welche vom Sonnenfleck zu den Beobachtungspunkten auf der Vorderseite laufen, eine geringere Amplitude auf als die Wellen, welche von den Beobachtungspunkten

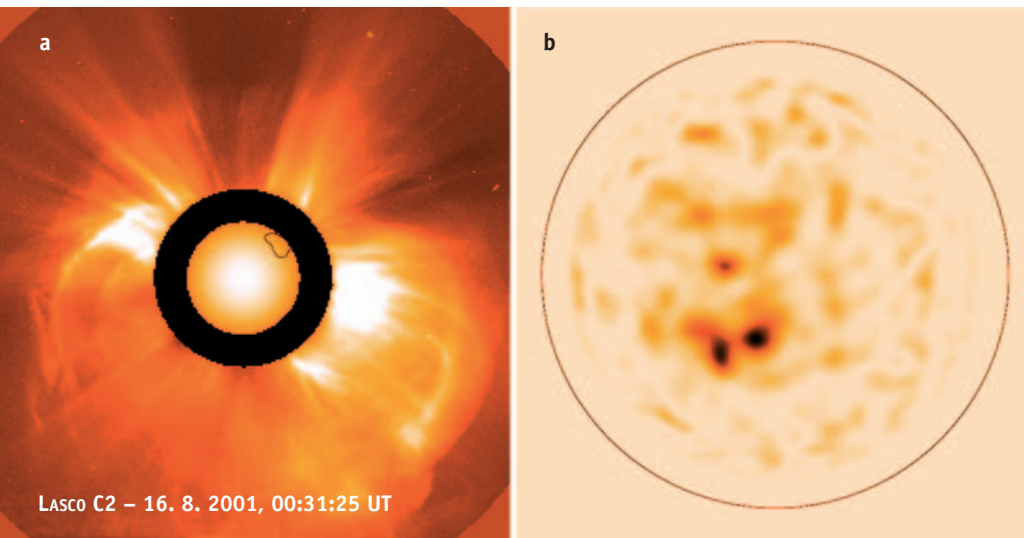


▲ Abb. 14: Abbildung der Sonnenrückseite mit Helioseismologie (siehe Text). (Bild: D. Braun/Ch. Lindsey, NorthWest Research Associates and Solar Physics Research Corporation, Boulder)

▼ Abb. 15: Magnetoakustische Entwicklung der Sonnenoberfläche im August 2001. Abb. (a), (b) und (d) zeigen die Magnetogramme der aktiven Gebiete am 1., 4. und 28. August auf der Vorderseite der Sonne. Abb. (c) ist die helioseismologische Rekonstruktion der Sonnenrückseite am 16. August 2001, zur Zeit des Ausbruchs. Das aktive Gebiet war von der Erde nicht direkt sichtbar. Der Blickwinkel entspricht einem Betrachter hinter der Sonne, der auf das Gebiet hinab blickt. In Abb. (d) erkennt man den stark angewachsenen Komplex der aktiven Gebiete am 28. August 2001 wieder auf der Vorderseite der Sonne. Ein Pfeil zeigt auf das aktive Gebiet 9591, das auf der Rückseite der Sonne kurz vor dem Ausbruch am 16. August entstand. (Bild: D. Braun/Ch. Lindsey, NorthWest Research Associates and Solar Physics Research Corporation)



◀ Abb. 13: Variation der Schallgeschwindigkeit unter einem Sonnenfleck. Die obere Ebene ist ein Bild der Sonnenoberfläche im sichtbaren Licht, das den Sonnenfleck zeigt. Der vertikale Schnitt durch die Konvektionszone reicht bis in eine Tiefe von 24000 km. Die untere Ebene zeigt Variationen der Schallgeschwindigkeit in einer Tiefe von 22000 km. Hohe Schallgeschwindigkeit sind in rot, niedrige blau dargestellt. (Bild: SOHO Image Gallery)



◀ Abb. 16: SOHO/LASCO-Aufnahme eines großen Ausbruchs aus einem aktiven Gebiet auf der Sonnenrückseite am 16. August 2001 um 00:31 UT (a), sowie die helioseismologische Rekonstruktion der Sonnenrückseite (b). In (a) wird die Sonnenoberfläche durch den Kreis im Zentrum des Bildes angedeutet. In (b) ist etwa 0.4 Sonnenradien südöstlich des Zentrums der Sonnenrückseite ein großes aktives Gebiet zu erkennen. Die Bilder von der Rückseite entsprechen der Perspektive eines Beobachters auf der Erde, wenn er direkt durch die Sonne hindurchschauen könnte. (Bild: D. Braun/Ch. Lindsey, NorthWest Research Associates and Solar Physics Research Corporation, Boulder)

bereichen in den Sonnenfleck laufen. Zusätzlich erfahren die Wellen aus aktiven Gebieten eine messbare Phasenverschiebung. Die Phasenverschiebung, die man an der Vorderseite misst, kann in eine Laufzeit umgerechnet werden. Um Ort und Absorptionsstärke eines Magnetfelds auf der Sonnenrückseite zu bestimmen, werden nun sowohl die Phasenverschiebungen der ankommenden Wellen als auch der Unterschied in den Amplituden von ein- und auslaufenden Wellen berechnet. Durch die Analyse der Wellen in zwei Beobachtungsbereichen, den »Pupillen«, ist es wie mit einem Augenpaar möglich, gezielt auf bestimmte Bereiche auf der Rückseite der Sonne zu fokussieren.

In Abb. 15 ist die zeitliche Entwicklung eines aktiven Gebietes über einen Monat dargestellt, das am 16. August 2001 um 00:31 Uhr UT einen heftigen Ausbruch verursachte (siehe Abb. 16). Die Helioseismologen verloren das Gebiet nie aus den Augen. Denn als das Gebiet auf Grund der Sonnenrotation die Rückseite erreichte, konnte ein seismisches Abbild erstellt werden. Der Proto-

nenfluss war außerordentlich hoch. Es handelt sich um einen der größten Ausbrüche des letzten Sonnenzyklus. Der Ausbruch erfolgte während Außenbordarbeiten der Astronauten auf der Raumstation ISS. Die Strahlendosis, der sie ausgesetzt waren, war zwar hoch, aber nicht bedrohlich. Durch die Entdeckung und Überwachung aktiver Gebiete auf der Rückseite der Sonne erhält man eine frühzeitige Warnung, bevor diese durch die Rotation der Sonne eine bis zwei Wochen später auf die für uns sichtbare Seite gelangen, auf der dann möglicherweise eine zur Erde gerichtete Eruption erfolgt. Die Beobachtungen könnten hilfreich sein, um das Schadensrisiko solcher Eruptionen zu verringern.

Ausblick

In naher Zukunft ist es das Ziel, mehr über den Sonnendynamo, d. h. die Entstehung des solaren Magnetfelds und des damit verbundenen 22-jährigen Zyklus zunehmender und abnehmender Aktivität zu verstehen. Gegenwärtig will man das »Leben mit einem Stern« vorhersagbarer

machen, d. h. man erwartet genaue Vorhersagen über Eruptionen und Teilchenschauer, die das Leben auf der Erde oder im erdnahen Orbit beeinflussen könnten.

Die wichtigste instrumentelle Neuerung ist vermutlich das Solar Dynamics Observatory (SDO), welches als Nachfolger von SOHO gilt und voraussichtlich 2008 in Betrieb geht.

Doch auch der Schritt zur Anwendung seismologischer Methoden auf andere Sterne ist nicht weit. Die Asteroseismologie ist das Studium von Oszillationen auf fernen Sternen, für die im Wesentlichen die gleichen Techniken wie in der Helioseismologie verwendet werden. Sie wird im Vergleich zur Helioseismologie nur dadurch schwieriger, dass die Sterne viel weiter entfernt sind als die Sonne. Erste Projekte mit satellitengestützten Observatorien wie MOST (Microvariability & Oscillations of Stars) liefern seit 2003 schon Daten oder sind wie zum Beispiel KEPLER in Planung (ab 2007). So wird es bald möglich sein, neue Kenntnisse über den inneren Aufbau der Sterne zu gewinnen. □

Literaturhinweise und Internetadressen

Jørgen Christensen-Dalsgaard: Lecture Notes on Stellar Oscillations, 5th Edition, Aarhus 2003, <http://www.ifa.au.dk/~jcd>

Michael Stix: The Sun – An Introduction, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 2002, ISBN 3-540-42886-0.

Allgemeine Informationen zur Sonne finden sich in: <http://www.kis.uni-freiburg.de> und <http://solar-center.stanford.edu/>

Populäres und anspruchsvolles Material zur Helio- und Asteroseismologie mit Animationen findet sich unter: http://www.astro.phys.au.dk/helio_outreach

Nützlich sind auch die Web-Seite des **Satelliten Soho** sowie des Netzwerks GONG: <http://sohowww.nascom.nasa.gov/> und <http://gong.nso.edu/>

Zur Abbildung der Sonnenrückseite: <http://www.colorado-research.com/~dbraun/holography.html>

Täglich aktualisierte helioseismologische Karten der Sonnenrückseite: <http://soi.stanford.edu/data/farside>



Markus Roth studierte Physik in Freiburg und hat im Jahr 2002 am dortigen Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik unter der Leitung von Professor Michael

Stix über Helioseismologie promoviert. Er arbeitet eng mit der GONG-Gruppe in Tucson (USA) zusammen.