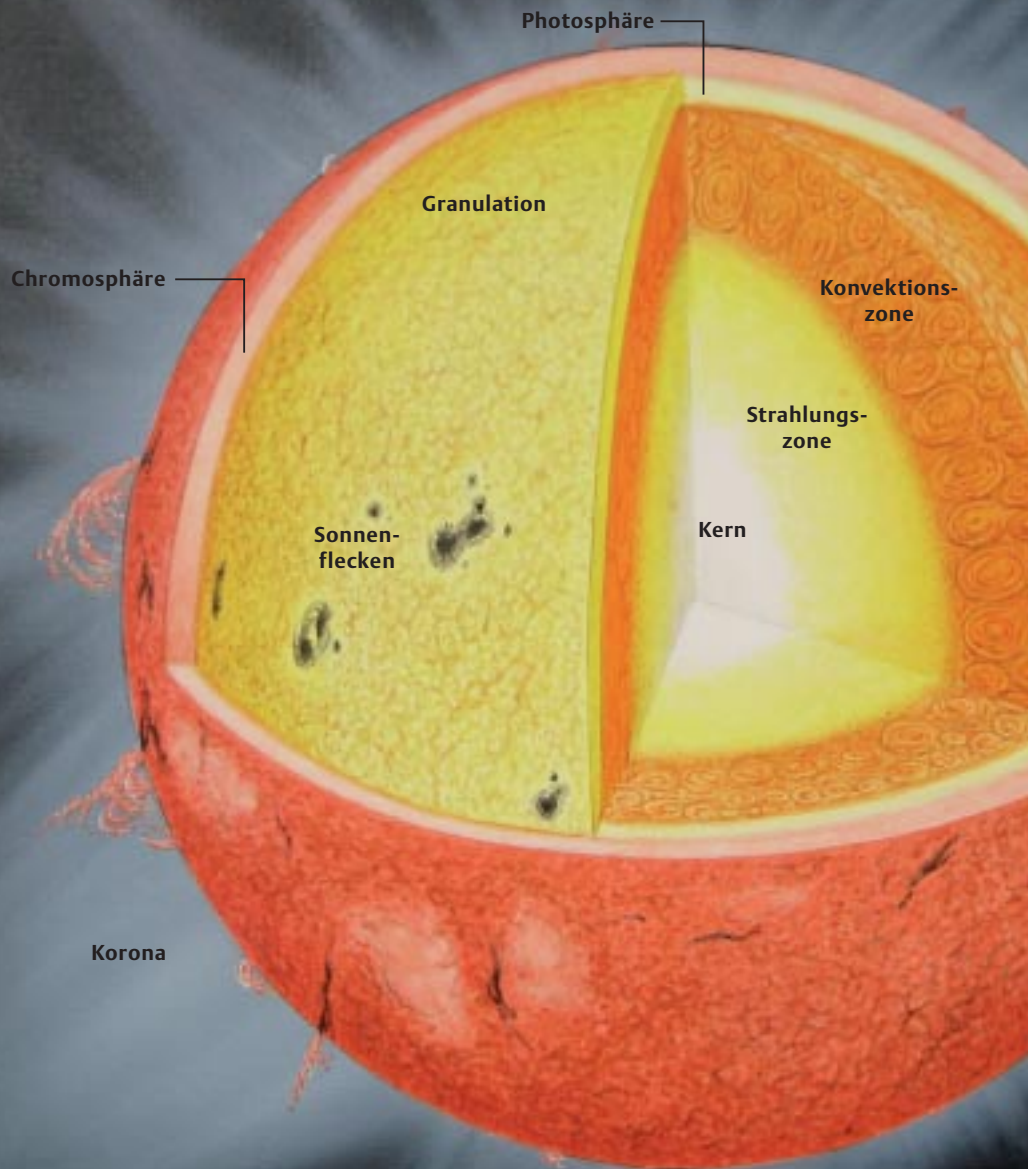
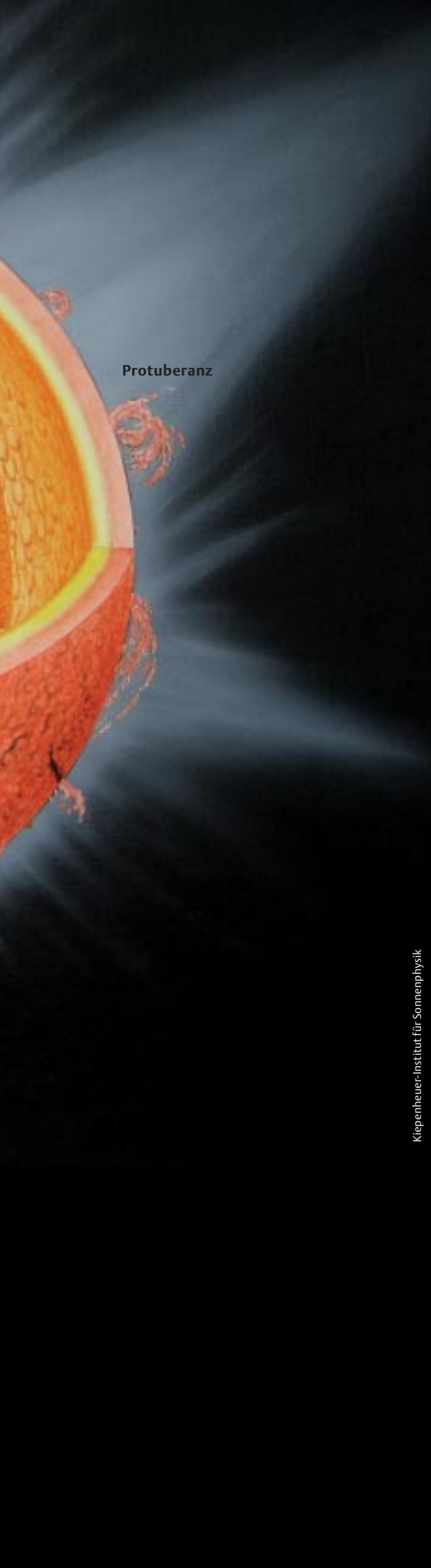


Abb. 1: Im Kern der Sonne wird bei rund 15 Millionen Kelvin Energie durch Kernfusion erzeugt und zunächst durch Strahlung, dann durch Konvektion nach außen transportiert. In der Photosphäre, der sichtbaren Oberfläche der Sonne, beobachten wir Sonnenflecken und das wabenartige Muster der Granulation. Nur mit speziellen Filtern sind die Chromosphäre und die Protuberanzen zu sehen (vergleiche die Aufnahme auf S. 14). Bei totalen Sonnenfinsternissen ist die heiße Korona, der äußere Teil der Sonnenatmosphäre, sichtbar.



# *Anatomie* unserer Sonne

Von Rolf Schlichenmaier und Hardi Peter



Protuberanz

Alles Licht, das wir von der Sonne empfangen, stammt aus einer nur wenige hundert Kilometer dicken äußeren Schicht, der Photosphäre. Doch das reicht, um anhand physikalischer Gesetzmäßigkeiten auf den inneren Aufbau des gigantischen Glutballs schließen zu können. Bestätigt wird das Sonnenmodell durch geisterhafte Teilchen, die Neutrinos, die im Zentrum des Sterns entstehen und ihn nahezu ungehindert verlassen.

**D**ie Sonne spendet uns Licht und Wärme, sie ist die Quelle des irdischen Lebens. Kein Wunder also, dass unser Zentralgestirn über die Jahrtausende hinweg in allen Kulturen eine wichtige Rolle gespielt hat. Und auch in der Neuzeit haben sich Philosophen und Naturwissenschaftler eingehend mit der Sonne beschäftigt. Insbesondere die Physiker tun es noch heute.

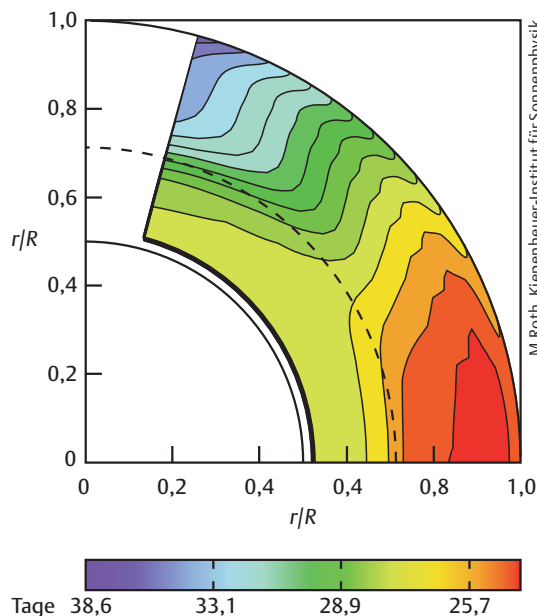
Lange haben die Gelehrten zum Beispiel darüber gerätselt, woher die Sonne die Energie bezieht, die sie unablässig abstrahlt. Nimmt man an, dass die durch Kontraktion freiwerdende Gravitationsenergie die Quelle darstellt, so könnte die Sonne nur etwas mehr als 30 Millionen Jahre alt sein. Dieser Schluss führte im 19. Jahrhundert zu einem heftigen Streit der Astronomen mit den Anhängern der darwinschen Evolutionslehre. Denn diese Zeitspanne wäre deutlich zu kurz für die Entwicklung von Leben auf der Erde.

Erst in den 1920er Jahren erkannten die Forscher, dass nur die Kernfusion von Wasserstoff zu Helium im inneren Kern der Sonne in der Lage ist, Energie über viele Milliarden Jahre hinweg zur Verfügung zu stellen. Nach heutigen Erkenntnissen ist die Sonne 4,6 Milliarden Jahre alt – und ihre Energiereserven in Form von Wasserstoff reichen noch für weitere sieben Milliarden Jahre. Dann, am Ende ihres Daseins, bläht sich die Sonne zu einem Roten Riesen auf, der die Erde fast verschluckt, und endet schließlich als Weißer Zwerg (siehe »Die Zukunft der Erde«, SuW 7/2002, S. 14, und »Die Sonne – der Stern, von dem wir leben«, SuW 8/2007, S. 70).

## Solare Neutrinos

Doch ein direkter Nachweis für die Kernfusion ist schwierig, denn es ist nicht möglich, direkt in das Innere der Sonne zu blicken. Die Sonne ist wie dichter Nebel, der all die Photonen, die bei der Kernfusion produziert werden, unzählige Male absorbiert und wieder abstrahlt. Bei der Fusion von insgesamt vier Wasserstoffkernen zu einem Heliumkern entstehen aber auch Neutrinos – Elementarteilchen, die kaum mit Materie in Wechselwirkung treten und somit in großer Zahl vom Kern aus die Sonne verlassen können. Die Neutrinos können den Forschern also Kunde aus dem Inneren der Sonne bringen. Allerdings erfordert ihre schwache Wechselwirkung mit Materie erhebliche Kunstgriffe, um sie mit Detektoren einzufangen

Abb. 2: Die Sonne rotiert nicht starr, sondern differenziell. Wie der Querschnitt durch das Sonneninnere vom Pol bis zum Äquator verdeutlicht, vollführt die Äquatorregion einen Umlauf rund acht Tage schneller als die polnahen Regionen (farbige Kodierung). Die Linien zeigen Regionen mit gleicher Winkelgeschwindigkeit. Die Sonnenoberfläche befindet sich bei  $r/R = 1$ , die Grenze zwischen Strahlungs- und Konvektionszone bei  $r/R = 0,7$  (gestrichelte Linie). Dort treten in der Nähe des Äquators und der Pole Scherströmungen auf, erkennbar an der Änderung der Winkelgeschwindigkeit.



ionisiert, das heißt, die negativ geladenen Elektronen haben sich von den positiv geladenen Atomkernen gelöst. Schwere, protonenreiche Elemente stellen deshalb viele freie Elektronen zur Verfügung. Beide Teilchengruppen – die freien Elektronen wie auch die ionisierten Atomrümpfe – stehen den Photonen bei ihrer Ausbreitung gewissermaßen im Weg, mit der Folge, dass der Energietransport nach außen behindert wird.

Eine größere Häufigkeit von schweren Elementen würde daher bedeuten, dass im Sonneninneren weniger effektiv Wärme transportiert wird. Die Temperatur an der Oberfläche kennen wir, weil wir sie messen können. Die Effektivität des Wärmetransports regelt die Temperaturzunahme im Sterninneren. Wenn viele schwere Elemente vorhanden sind, nimmt die Temperatur weniger stark zu, und es kommt zu einer geringeren Zentraltemperatur als wenn sich weniger schwere Elemente im solaren Gas befinden. Die Zentraltemperatur ist also umso kleiner, je mehr schwere Elemente es gibt.

Da wir messen können, wie viel Energie pro Zeiteinheit die Sonne abstrahlt, können wir auch ausrechnen, wie viele Wasserstoffatome pro Zeiteinheit zu Helium fusionieren müssen und wie viele Neutrinos entstehen. Jedoch ist es nicht ganz einfach zu berechnen, welche Energien die Neutrinos haben. Denn da Wasserstoff aus einem Proton besteht, Helium aber aus zwei Protonen und zwei Neutronen, kann die Fusion von Wasserstoff zu Helium nicht direkt ablaufen. Über ein Netzwerk von Reaktionsketten werden Zwischenprodukte erzeugt, wobei Neutrinos unterschiedlicher Energie entstehen. Je nach Temperatur ändert sich die Bedeutung der einzelnen Reaktionsketten, und damit die Energien der erzeugten Neutrinos. Eine Absenkung der Zentraltemperatur würde deshalb deren Energieverteilung beeinflussen. Und da das Chlor-Experiment in der Homestake-Mine nur die solaren Neutrinos hoher Energie registrieren konnte, wäre das Defizit an beobachteten Neutrinos mit einer niedrigeren Zentraltemperatur der Sonne zu erklären.

Doch andere nachfolgende Experimente, die auch niederenergetische Neutrinos erfassen konnten, zeigten eine Energieverteilung der Neutrinos, die nicht mit niedrigen Temperaturen im Kern der Sonne vereinbar sind. Zudem haben in den 1990er Jahren helioseismologische Arbeiten (siehe unten) die Richtigkeit des Sonnenmodells bestätigt. Für die niedrige Zahl der gemessenen Neutrinos muss es also einen anderen Grund geben.

Heute erklären die Physiker die niedrige Neutrinozahl damit, dass die Teilchen nicht – wie ursprünglich angenommen – masselos sind, sondern eine kleine Ruhemasse besitzen. Dadurch können die Neutrinos durch einen Quanteneffekt zwischen verschiedenen Zuständen oszillieren – aber nur einer dieser Zustände lässt sich durch die Detektoren nachweisen. Nach heutigem Stand ist das Energieäquivalent der Neutrino-Ruhemasse kleiner als zwei Elektronvolt. Es ist somit erheblich »leichter« als ein Elektron, das immerhin 511 000 Elektronvolt »schwer« ist.

und nachzuweisen: Selbst durch eine massive Bleiwand von einem Lichtjahr Dicke ließe sich nur die Hälfte von ihnen aufhalten!

Der Nachweis von solaren Neutrinos gelang deshalb erst lange nachdem der Physiker Wolfgang Pauli 1930 die Existenz dieser flüchtigen Teilchen postuliert hatte. Im Goldbergwerk Homestake im US-Bundesstaat South Dakota konnte Raymond Davis 1968 zum ersten Mal den Fluss der solaren Neutrinos messen. Bei seinem Experiment füllte der Chemiker 615 Tonnen Tetrachlorethen,  $C_2Cl_4$ , in einen 400 Kubikmeter großen Tank, der 1500 Meter unter der Erde rund einhundert Tage lang dem Strom der solaren Neutrinos ausgesetzt war. Während dieser Zeit fingen die Kerne der Chloratome Neutrinos ein und wandelten sich dadurch in ein radioaktives Isotop des Edelgases Argon um. Das Argon zerfällt mit einer Halbwertszeit von 35 Tagen wieder zu Chlor, sodass der Argon-Gehalt im Tank nach diesen hundert Tagen fast konstant ist. In einem aufwendigen Prozess konnte das Argon herausgefiltert werden. Lediglich 70 Argon-Atome fand Davis in seinem Tank – und das, obwohl jeder Quadratzentimeter seiner Oberfläche in jeder Sekunde von schätzungsweise 70 Milliarden solaren Neutrinos durchdrungen wurde!

Der Nachweis der solaren Neutrinos bestätigte zwar die Vorstellung von der Kernfusion im Inneren der Sonne – ließ aber gleichzeitig Zweifel an der Richtigkeit des Sonnenmodells und an der berechneten Zentraltemperatur der Sonne von rund 15 Millionen Kelvin aufkommen. Denn sowohl bei diesem ersten Chlor-Experiment als auch bei späteren Neutrinomessungen fanden die Forscher stets viel weniger Neutrinos, als sie aufgrund der solaren Helligkeit erwartet hatten (siehe »Jagd auf die Sonnen-Neutrinos«, SuW Spezial 4, 1999).

Die Sonnenmodelle hängen empfindlich von kleinen Änderungen in der Häufigkeit derjenigen Elemente ab, die viele Protonen und demzufolge auch viele Elektronen enthalten. Wegen der hohen Temperaturen im Sonneninneren sind die Atome

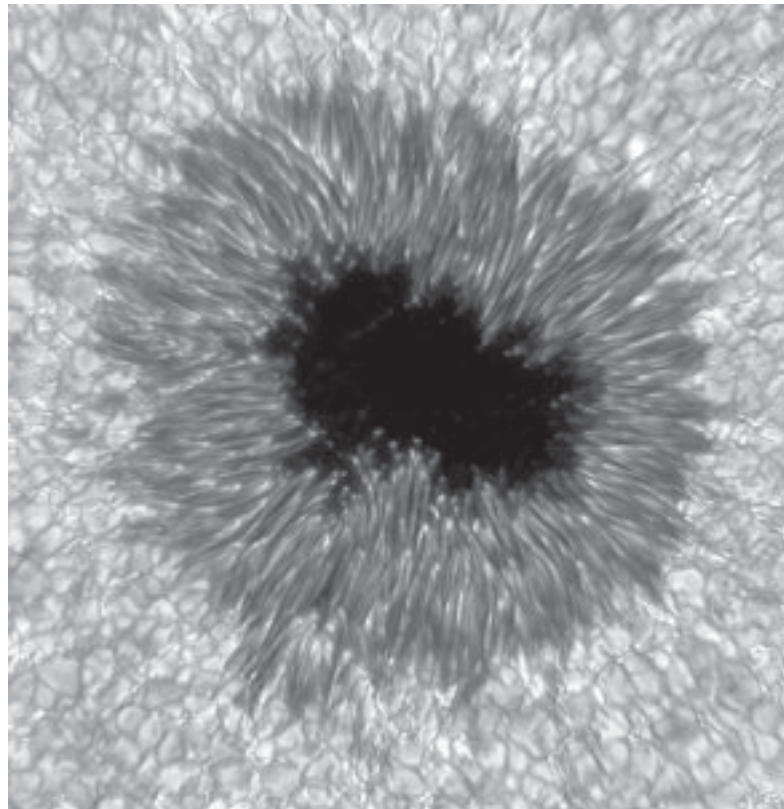


## Innerer Aufbau

Die Sonne besteht aus heißem Gas, das sich unter der eigenen Schwerkraft zu einer Kugel geformt hat. Auch wenn wir nicht direkt ins Innere dieses Gasballs schauen können, lässt sich doch mit Hilfe der physikalischen Gesetze ein Sonnenmodell konstruieren. Um die Sonne über Milliarden Jahre hinweg stabil zu halten, muss die Eigenschwerkraft der Sonne durch nach außen wirkende Druckkräfte ausbalanciert werden. Der Druck nimmt dabei also nach innen hin zu. In diesem hydrostatischen Gleichgewicht wird der hohe Zentraldruck durch hohe Dichten und Temperaturen erreicht.

Für die hohe Dichte sorgt die Schwerkraft, die den Kernbereich zusammenpresst. Die hohen Temperaturen werden durch die Kernfusion erzeugt. Damit sich eine stabile Temperatur einstellt, muss die erzeugte Wärme nach außen transportiert werden. Im Inneren der Sonne geschieht dies durch Strahlung, also durch Ausbreitung von Photonen. Dieser Prozess lässt sich anhand der Gesetzmäßigkeiten der Atomphysik detailliert beschreiben. Dabei stellt sich heraus, dass der Wärmetransport durch Strahlung im Inneren der Sonne gut funktioniert, aber in ihren äußeren Schichten nicht effektiv genug ist, um den Temperaturabfall zur kühlen Oberfläche hin zu bewerkstelligen. Deshalb muss das Gas selbst mithelfen und Wärme nach außen transportieren: Heißes Gas steigt auf und kühles Gas sinkt ab.

Dieser Vorgang, durch den auch herkömmliche Heizkörper unsere Wohnungen erwärmen, heißt Konvektion. An der Oberfläche der Sonne können wir dieses Phänomen in Form der so genannten Granulation sehen: Das heiße, nach oben strömende Gas ist heller und formt die Granulen. Es kühlt an der Oberfläche ab und taucht zwischen den Granulen in den kühleren, dunkler erscheinenden Bereichen wieder ab (Abb. 3).



F. Wöger, Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik, C. Berst, M. Koma, National Solar Observatory/AURA/NSF

## Bestätigung durch die Helioseismologie

Die Sonne schwingt ähnlich wie eine angeschlagene Glocke, und die Konvektion sorgt dafür, dass durch das Aufeinanderprallen von heißem und kühlem Gas immer wieder neue Schallwellen erzeugt werden. Anders als bei einer Glocke laufen die Schallwellen bei der Sonne durch das Innere des Gasballs. Aus den messbaren Schwingungen an der Oberfläche können die Forscher den Ver-

Abb. 3: Sonnenflecken sind Phänomene der Photosphäre und gliedern sich in eine dunkle Kernzone, die Umbra, und eine hellere Randzone, die Penumbra, mit radialer Filamentierung. Außerhalb des Fleckes ist das wabenförmige Muster der Granulation zu sehen.

National Solar Observatory, USA

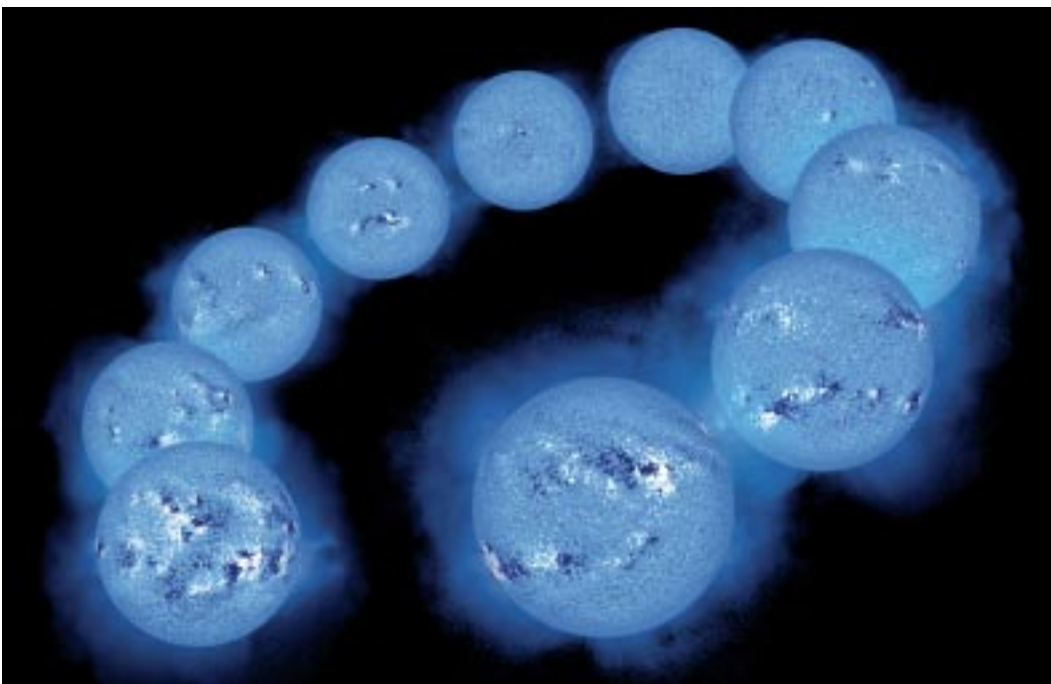


Abb. 4: Die Sonne durchläuft einen elf-jährigen Aktivitätszyklus: Die Bilder sind magnetische Momentaufnahmen und entstanden in Abständen von je einem Jahr. In den Zeiten nahe des Maximums ist die Sonne von zahlreichen magnetischen Regionen gesprenkelt (weiß: positive Polarität, schwarz: negative Polarität). Nahe dem Minimum erscheint sie fast makellos.



**Abb. 5:** In den Regenbogenfarben des Sonnenlichts – dem Spektrum – sind dünne und dicke schwarze Linien sichtbar. Diese Fraunhoferschen Absorptionslinien entstehen in der Photosphäre der Sonne, einer nur 500 Kilometer dünnen Schicht an der solaren Oberfläche.

SuW-Archiv

lauf der Schallgeschwindigkeit im Sonneninneren ermitteln. Da die Schallgeschwindigkeit ein Maß für die Temperatur ist, lassen sich auf diese Weise der radiale Temperaturverlauf und somit auch die Kerntemperatur sehr genau bestimmen. Mit dieser indirekten Methode – in Analogie zur Seismologie auf der Erde Helioseismologie genannt – konnten die Wissenschaftler das Modell des Sonnenaufbaus mit großer Genauigkeit bestätigen (siehe »Neue Blicke in das Innere der Sonne«, SuW 8/2004).

ist also etwa so schnell wie ein Hundertmeterläufer. Aber bei dieser Geschwindigkeit benötigt das Gas 3,5 Jahre, um vom Äquator zum Pol der Sonne zu fließen. Auch wenn die Ursache dieser sehr langsamen meridionalen Strömung noch unbekannt ist, so konnten die Forscher doch durch numerische Simulationen zeigen, dass mit ihr ein Drehimpulstransport einhergeht, der zu dem beobachteten Verlauf der Rotationsgeschwindigkeit führt.

## Ungleichmäßige Rotation

Mit Hilfe der Helioseismologie lassen sich auch Details der Rotation im Inneren der Sonne vermessen. Seit langem ist bekannt, dass sich die Sonne dreht und dass, anders als bei der Erde, die Äquatorzone schneller rotiert als die hohen Breiten und die Pole. Schneller bedeutet dabei eine höhere Winkelgeschwindigkeit: Ein Punkt am Äquator braucht für eine Umdrehung 25 Tage, während ein polnaher Punkt 33 Tage benötigt. Schon die Beobachtung der Sonnenoberfläche zeigt also, dass die Sonne nicht starr, sondern differenziell rotiert.

Eine direkte – und, wie wir später sehen werden, für die Erzeugung der solaren Magnetfelder wesentliche – Konsequenz der differentiellen Rotation ist das Vorhandensein von Scherströmungen, also von Strömungen, die unterschiedlich schnell fließen. Wenn schon die Oberfläche der Sonne nicht gleichmäßig rotiert, stellt sich die Frage, wie es in ihrem Inneren damit bestellt ist. Die Helioseismologie kann hierauf eine Antwort geben, weil sich eine Schallwelle in Strömungsrichtung schneller ausbreitet als in Gegenrichtung dazu. Dadurch ergeben sich Laufzeitunterschiede, aus denen die Forscher den tiefenabhängigen – sprich: radialen – und den breitenabhängigen Verlauf der Winkelgeschwindigkeit der Rotation im Sonneninneren bestimmen können.

Das Ergebnis ist in Abbildung 2 zu sehen. Es hat für großes Erstaunen unter den Sonnenphysikern gesorgt, denn Modellrechnungen hatten einen anderen Verlauf der Linien konstanter Winkelgeschwindigkeit vorhergesagt. Auf Grundlage der Hydrodynamik und des Drehimpulserhaltungsgesetzes hatte man erwartet, dass die Linien parallel zur Rotationsachse verlaufen. Vollständig gelöst ist das Problem bis heute nicht, aber man weiß, dass die Existenz einer »meridionalen Strömung« der Schlüssel zum Verständnis sein muss: Diese ist in Richtung des Meridians gerichtet, läuft also vom Äquator zu den Polen und andersherum. In den oberflächennahen Schichten konnte die Strömung beobachtet werden. Sie besitzt dort eine Geschwindigkeit von nur zehn Metern pro Sekunde,

## Aktive Sonne

Unsere Sonne ist aber mehr als nur ein brodelnder, sich drehender Gasball. Auf ihr spielen sich vielfältige Prozesse ab, die sogar die Erde beeinflussen können. Ein Beispiel dafür sind heftige Ausbrüche, die Teilchenschauer ins All schleudern und beim Auftreffen auf die Erde wabernde Polarlichter hervorrufen.

Solche Aktivitäten, zu denen auch die dunkel erscheinenden Sonnenflecken gehören, folgen einem rund elfjährigen Zyklus: Einem Aktivitätsmaximum folgt ein Minimum der Sonnenfleckenaktivität, bevor die Aktivität wieder ein Maximum erreicht. Im Internationalen Heliophysikalischen Jahr 2007 befinden wir uns gerade in einem Aktivitätsminimum. Das letzte Maximum war im Jahr 2000. An spektakulären Aktivitätsphänomenen gibt es außer den Sonnenflecken noch die Eruptionen (englisch: flares) sowie koronale Massenauswürfe.

All diese Phänomene haben eines gemeinsam: Magnetfelder. Magnetfelder auf der Sonne sind wie das Salz in der Suppe, ohne sie wäre die Sonne fad. Aber woher kommen die Magnetfelder? Wie werden sie erzeugt?

## Erzeugung der solaren Magnetfelder

Bevor wir näher auf die dynamischen Phänomene der Sonne eingehen, werden wir kurz skizzieren, wie die Sonne Magnetfelder produziert. Von entscheidender Bedeutung ist, dass das solare Gas nicht einfach nur ein Gas ist wie die Luft auf der Erde, sondern dass es sehr heiß ist. Das hat zur Folge, dass es nicht aus neutralen Teilchen, sondern aus negativ geladenen Elektronen und aus positiv geladenen, ionisierten Atomen besteht.

Genau wie bei Metallen auf der Erde, in denen freie Elektronen in der festen metallischen Struktur für die elektrische Leitfähigkeit sorgen, weist das Gas in der Sonne so viele freie Elektronen auf, dass es eine extrem hohe, fast widerstandsfreie elektrische Leitfähigkeit besitzt. Ein derart leitfähiges Gas wird in der Physik als Plasma bezeichnet.

Elektrische Ströme können daher in der Sonne fast widerstandslos fließen. Schon Ende des 19. Jahrhunderts hat James Clerk Maxwell die Gleichungen der Elektrodynamik formuliert, die unter anderem aussagen, dass sich die Existenz von elektrischem Strom und Magnetfeld gegenseitig bedingen: Wo ein Strom fließt, da ist auch ein Magnetfeld.

So erzeugt zum Beispiel ein im Kreis fließender Strom ein magnetisches Feld. Da der elektrische Strom im Plasma reibungsfrei, also widerstandslos fließt, bewegt sich ein solcher Stromkreis und das damit verbundene Magnetfeld mit dem Plasma mit. Betrachten wir beispielsweise eine Magnetfeldlinie, die zwei räumlich getrennte Kreisströme miteinander verbindet. Sind die Kreisströme in einer Scherströmung eingebettet, so entfernen sie sich voneinander und ziehen die Magnetfeldlinie in die Länge.

Wie wir oben gesehen haben, erzeugt die differenzielle Rotation derartige Scherströmungen in der Sonne. In Äquaturnähe tritt am unteren Rand der Konvektionszone ein starkes Gefälle der Winkelgeschwindigkeit auf (Abb. 2). Stellen wir uns dort eine radial nach außen gerichtete Magnetfeldlinie vor, die durch einen weiter innen liegenden und einen weiter außen liegenden Kreisstrom erzeugt wird: Diese Magnetfeldlinie wird in die Länge gezogen und um die Sonne gewickelt. Nach einer Umrundung der Sonne erhalten wir zwei nebeneinander liegende Feldlinien. Setzt sich dieser Prozess fort, so erhöht sich im Laufe der Zeit die Feldliniendichte. Die Scherströmung verstärkt also die bereits vorhandenen Magnetfelder. Die dabei gewonnene magnetische Energie stammt aus der Bewegungsenergie der Scherströmung. Die Scherströmung wickelt also die Magnetfeldlinien um die Rotationsachse der Sonne auf, sodass sich am unteren Rand der Konvektionszone ein konzentriertes Magnetfeld bildet. Dieses besteht aus einem Bündel von Magnetfeldlinien, einer so genannten Magnetfeldröhre.

## Ursache der Sonnenflecken

Der niederländische Physiker Hendrik Antoon Lorentz hat Ende des 19. Jahrhunderts die zwischen elektrischen Strömen und Magnetfeldern wirkende Kraft erforscht und beschrieben. Diese »Lorentz-Kraft« führt im Sonnenplasma zu zwei Effekten: (a) Die Magnetfeldlinien haben wie gespannte Gummibänder das Bestreben, sich gerade zu ziehen. (b) Es wirkt immer eine Kraft in Richtung des abnehmenden Magnetfelds. Den ersten Effekt nennen die Sonnenphysiker »Krümmungskraft«, weil die Kraft mit zunehmender Krümmung der Feldlinie anwächst. Der zweite Effekt lässt sich als Abstoßung zwischen den magnetischen Feldlinien verstehen. Dadurch baut sich ein magnetischer Druck auf, der eine Kraft quer zur Magnetfeldröhre ausübt. Damit eine Magnetfeldröhre stabil bleibt, muss sie im Druckgleichgewicht mit ihrer nichtmagnetischen Umgebung sein. Das bedeutet, dass der Gasdruck innerhalb des Magnetfelds so stark erniedrigt sein muss, dass die Summe aus

Gasdruck und magnetischem Druck innerhalb der Röhre gleich dem Gasdruck der Umgebung ist.

Das führt zu gravierenden Konsequenzen: Ein kleinerer Gasdruck bedeutet bei gleich bleibender Temperatur auch eine geringere Dichte. Die Massendichte innerhalb der Magnetfeldkonzentration ist also kleiner als in der nichtmagnetischen Umgebung. Seit dem Griechen Archimedes von Syrakus, der im 3. Jahrhundert vor Christus gelebt hat, wissen wir, dass Körper mit geringerer Dichte eine Auftriebskraft erfahren. Zum Beispiel schwimmt Holz auf Wasser, weil Holz eine geringere Dichte als Wasser hat. Nach dem gleichen Prinzip erfahren die Magnetfeldröhren eine Auftriebskraft.

Dieser Auftriebskraft wirkt zwar die Krümmungskraft entgegen, welche versucht, die Röhre gerade zu ziehen. Wenn aber die Magnetfeldstärke an einer Stelle einen kritischen Wert übersteigt, dann gewinnt die Auftriebskraft: Ein Teil der Magnetfeldröhre löst sich vom unteren Rand der Konvektionszone, steigt durch die Konvektionszone auf und durchbricht schließlich die Oberfläche der Sonne.

Die beiden Durchstoßpunkte der Magnetfeldröhre sind dann auf der Oberfläche als Sonnenflecken sichtbar. Sie bilden eine bipolare magnetische Region – bipolar, weil das Magnetfeld der beiden Flecken entgegengesetzte Polaritäten besitzt. Sonnenflecken sind dunkler, weil das starke Magnetfeld an diesen Stellen die Konvektion, also den Wärmetransport unterdrückt. Denn das aufsteigende Plasma müsste das Magnetfeld mitnehmen – gegen diese Bewegung stemmt sich aber die magnetische Krümmungskraft. Da in den Sonnenflecken also weniger heißes Plasma aufsteigt als in der Umgebung, sind die Flecken kühler.

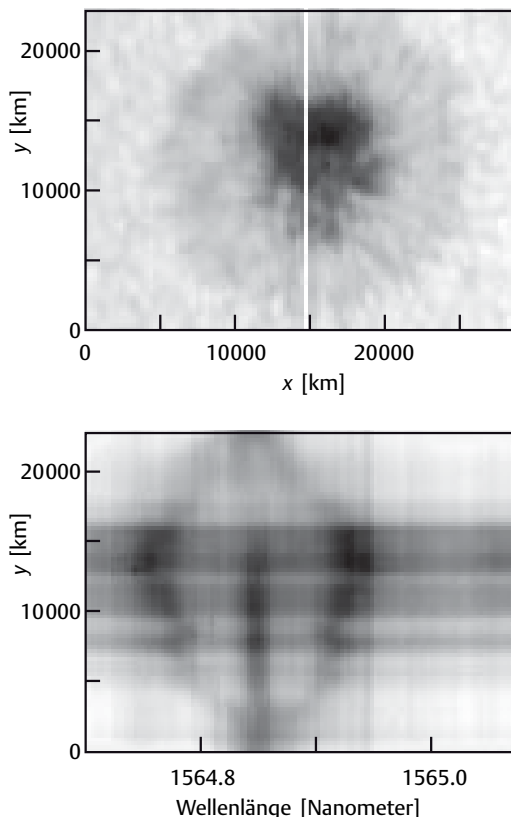


Abb. 6: Starke Magnetfelder, wie sie auch in Sonnenflecken auftreten, verursachen eine Aufspaltung von Spektrallinien (Zeeman-Effekt). An der Stelle des weißen vertikalen Strichs im oberen Bild, der die Penumbra und die Umbra eines Sonnenflecks durchschneidet, wurde ein Linienspektrum aufgenommen. Ohne Magnetfeld wäre nur eine Linie zu sehen, doch spaltet sich die Linie hier in drei Einzellinien auf, und zwar um so stärker, je stärker das Magnetfeld zum Zentrum der Umbra hin wird. Dort beträgt die Magnetfeldstärke typischerweise 0,3 Tesla.

R. Schlichenmaier, Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik



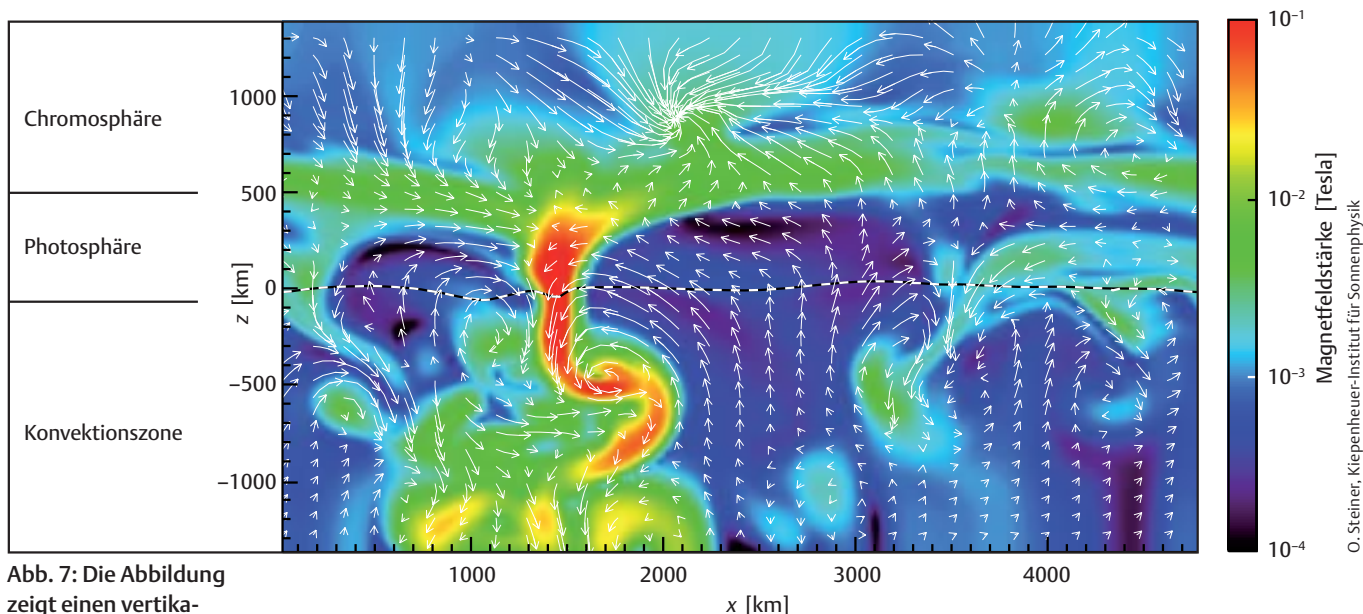


Abb. 7: Die Abbildung zeigt einen vertikalen Schnitt von der Chromosphäre bis in die Konvektionszone durch ein dreidimensionales Simulationsmodell. Die weißen Pfeile sind Geschwindigkeitsvektoren in dieser Schnittebene (ihre maximale Länge entspricht 16 Kilometern pro Sekunde). Die schwarz-weiß gestrichelte Linie markiert die Oberfläche der Sonne. Die unterschiedlichen Farben repräsentieren die Magnetfeldstärke in Tesla.

### Nachweis der Magnetfelder

Wie können die Forscher sicher sein, dass es in den Sonnenflecken starke Magnetfelder gibt? Vor Ort nachsehen können sie nicht – alles, was sie vermessen können, ist das von der Sonne ausgestrahlte Licht. Dieses Licht können sie in seine Regenbogenfarben aufspalten. In diesem Spektrum zeigen sich viele feine, dunkle Linien, nach ihrem Entdecker Fraunhofer-Linien genannt.

Diese Linien entstehen in der Photosphäre der Sonne, einer nur rund 500 Kilometer dicken Atmosphärenschicht, die sich direkt über der Konvektionszone befindet. Aus ihr stammen nahezu alle Photonen, welche die Sonne abstrahlt. Der Boden der Photosphäre ist die eigentliche Oberfläche der Sonne, sie ist im Mittel knapp 6000 Kelvin heiß und strahlt Licht mit einer kontinuierlichen Energieverteilung ab, das heißt, sie leuchtet in allen Farben.

Die Photosphäre ist zwar weitgehend durchsichtig, aber auch dort absorbieren die Gasatome Photonen. Die Elektronen in den Atomen können sich nur auf bestimmten Bahnen bewegen. Oder quantenmechanisch korrekter ausgedrückt: Sie können nur bestimmte Energiezustände einnehmen. Durch die Absorption eines Photons wechseln die Elektronen auf ein höheres Energieniveau. Es können aber nur solche Photonen absorbiert werden, deren Energie gerade der Differenz zwischen zwei Energieniveaus der Elektronen entsprechen. Genau bei diesen Energien – beziehungsweise den ihr entsprechenden Wellenlängen – tauchen deshalb durch die Absorption die dunklen Linien im Sonnenspektrum auf. Zwar strahlen die angeregten Atome die aufgenommene Energie auch wieder ab, aber diese Abstrahlung erfolgt gleichmäßig in alle Richtungen, deshalb kann sie die in der Richtung Sonnenoberfläche-Beobachter absorbierte Strahlung nicht ausgleichen.

In der genauen Form der Absorptionslinien, dem »Linienprofil«, verbergen sich viele Informa-

tionen über die Sonne. Mit Hilfe der Gesetze der Atomphysik und der Thermodynamik können die Forscher daraus Temperatur, Druck und Dichte sowie deren Abnahme nach außen messen. Die Verschiebung der Wellenlänge der Linie gegenüber Labormessungen gibt außerdem Aufschluss über die Geschwindigkeiten der Plasmaströmungen: Wenn das Plasma sich vom Teleskop entfernt, ist die Absorptionslinie durch den Dopplereffekt zu größeren Wellenlängen hin verschoben (»Rotverschiebung«); wenn es sich auf das Teleskop zu bewegt, ist es zu kleineren Wellenlängen hin verschoben (»Blauverschiebung«).

Aus den Linien lassen sich auch Informationen über das Magnetfeld gewinnen. Denn wie ein anderer Niederländer, Pieter Zeeman, 1896 entdeckte, kann ein Magnetfeld die Energieniveaus von Elektronen in Atomen in drei oder mehr nahe beieinander liegende Niveaus aufspalten. Dadurch kommt es dann auch zu entsprechenden Aufspaltungen der mit diesen Niveaus verbundenen Absorptionslinien. Je stärker das Magnetfeld, desto größer ist die Aufspaltung durch diesen »Zeeman-Effekt« (Abb. 6).

Neben seiner Feldstärke besitzt ein Magnetfeld auch eine Richtung, und auch diese hinterlässt Spuren im Licht. Je nach Richtung des Magnetfelds ist das Licht linear oder zirkular polarisiert. Der US-amerikanische Astronom George Ellery Hale konnte bereits im Jahre 1908 durch Polarisationsmessungen an Zeeman-Linien zeigen, dass

### Literaturhinweise

**Rudolf Kippenhahn:** Der Stern, von dem wir leben, DTV Sachbuch, 1993

**Manfred Schüssler und Hubertus Wöhl:** Der Zyklus der Sonne, SuW Spezial 4, 1999

**Thilo Günter:** Die Sonne – Der Stern, von dem wir leben, SuW 8/2007, S. 70

in Sonnenflecken ein Magnetfeld vorherrscht, das mehr oder weniger senkrecht zur Sonnenoberfläche steht.

Spätere Beobachtungen enthüllten, dass es auch außerhalb der Sonnenflecken starke Magnetfeldkonzentrationen gibt. Und die Messungen des im Jahre 2006 gestarteten japanischen Satelliten Hinode (japanisch: Sonnenaufgang) belegen, dass es auf der Sonne neben vereinzelt starken Magnetfeldern fast überall schwache Magnetfelder gibt. Und diese Magnetfelder, die starken wie die schwachen, geben den Forschern noch immer Rätsel auf.

## Faszinierende Penumbra

Besonders faszinierend sind die Phänomene in der Penumbra. Mit diesem Begriff bezeichnen die Sonnenforscher einen Ring mittlerer Helligkeit, der den dunklen inneren Kern (die Umbra) eines Sonnenflecks umgibt. In der Penumbra sind von innen nach außen verlaufende helle und dunkle Streifen zu erkennen. Schon 1909 entdeckte der britische Astronom John Evershed, dass in der Penumbra eine nahezu horizontale, radial nach außen gerichtete Strömung vorherrscht. Inzwischen weiß man, dass das Magnetfeld in der Umbra zwar vertikal zur Oberfläche verläuft, dass die Neigung des Feldes in der Penumbra aber nach außen hin abnimmt. Am äußeren Rand der Penumbra ist das Feld nur noch um 15 Grad gegenüber der Horizontalen geneigt. In diesem geneigten Magnetfeld der Penumbra existiert die von Evershed gefundene vorwiegend horizontale Strömung.

Wie lässt sich die komplexe Geometrie des Magnetfeldes in den Sonnenflecken verstehen? Einige Forscher vermuten, dass sich kleine Bündel von Magnetfeldlinien innerhalb des großen Magnetfeldschlauchs zu Röhren formen, die sich dynamisch in der Penumbra bewegen. Ihre Bewegung sorgt dafür, dass sich die Röhren horizontal in die Photosphäre legen, und dass sich entlang den Röhren Strömungen ausbilden, die heißes Plasma an die Oberfläche transportieren. Dieser heiße Plasmafluss würde dann die hellen Streifen sowie die Evershed-Strömung erklären. Ob das Modell richtig ist, müssen zukünftige Beobachtungen bei höherer räumlicher Auflösung sowie Modellrechnungen der komplexen physikalischen Vorgänge in den geneigten Magnetfeldern klären.

Die Auflösung der heutigen Teleskope reicht noch nicht aus, um die genaue Topologie des Magnetfelds und des Strömungsfelds in den kleinen Filamentstrukturen der Penumbra zu vermessen. Des Weiteren ist eine Interpretation der spektropolarimetrischen Linienprofile sehr schwierig: Die Felder sind stark inhomogen, sodass sich Linienaufspaltungen und Verschiebungen verschiedener Stärke in einem Linienprofil überlagern. Diese unterschiedlichen Einflüsse lassen sich nicht ohne weiteres trennen, sodass in der Praxis die Interpretation der beobachteten Daten immer auf der Grundlage eines theoretischen Modells erfolgen muss.

## Von der Photosphäre in die Chromosphäre

In der 500 Kilometer dicken Photosphäre sinkt die Temperatur nach außen hin von 6000 auf 4000 Kelvin ab. Außerhalb der Photosphäre steigt die Temperatur wieder an und erreicht in der Chromosphäre im Mittel 7000 Kelvin. Die Forscher versuchen heute, die komplexen physikalischen Vorgänge in diesem Übergang von Konvektionszone über Photosphäre zu Chromosphäre durch räumliche magnetohydrodynamische Simulationen zu modellieren (Abb. 7).

In den Granulen strömt das heiße Plasma nach oben und dringt dabei einige hundert Kilometer in die Photosphäre ein. Durch Strahlungsverluste kühlt das Plasma dabei ab und verdichtet sich, bis es wieder schwerer als die Umgebung ist und absinkt. Die kühlen Abströmgebiete, die intergranularen Kanäle, umgeben die hellen Granulen als dunkle Zonen. Magnetfelder werden von der Strömung ins Intergranulum mitgenommen, sammeln sich dort an und erreichen eine Magnetfeldstärke von mehr als 0,1 Tesla.

Die Chromosphäre ist durch starke Variationen der Temperatur geprägt: Es gibt dort kühle und heiße Regionen. Die Ursache dafür sind Schallwellen, die aus der Photosphäre – teilweise entlang von magnetischen Feldern – in die Chromosphäre laufen. Dort, wo diese Schallwellen ihre Energie an die Umgebung abgeben, heizen sie die Chromosphäre auf, anderswo bleibt die Chromosphäre kühl.

Für ein tieferes Verständnis der vielfältigen Prozesse in Photosphäre und Chromosphäre sind numerische Simulationen unter Berücksichtigung möglichst realistischer Bedingungen nötig, sowie neue Teleskope, die in der Lage sind, kleinen Strukturen auf der Sonne sowohl zeitlich als auch räumlich aufzulösen. Derzeit wird auf Teneriffa ein neues 1,5-Meter-Teleskop fertig gestellt, das noch Strukturen von 40 Kilometern Größe auf der Sonne auflösen soll. In Planung ist außerdem ein Teleskop der Vier-Meter-Klasse, das genügend Licht für spektropolarimetrische Messungen sammeln könnte, um so die Dynamik der Feinstruktur zeitlich auflösen zu können.

## Vom Inneren der Sonne bis in die Heliosphäre

Das Magnetfeld verbindet nicht nur das Innere der Sonne mit ihrer Oberfläche, es erstreckt sich über die Chromosphäre hinaus in die Korona. Mehr noch: Sonnenwind und koronale Massenauswürfe tragen das Magnetfeld hinaus in die Heliosphäre und den interplanetaren Raum. Mittels ihres Magnetfelds wirkt die Sonne wie ein Motor, der das Plasma in der äußeren Atmosphäre der Sonne, im Sonnenwind und dem interplanetaren Raum antreibt – und damit auch die Sonnenphysiker auf Trab hält. Die Sonne und die Heliosphäre bieten den Forschern ein einmaliges Plasmalabor, in dem sie Prozesse studieren können, die ihnen auf der Erde nicht zugänglich sind. ◀



**Rolf Schlichenmaier** studierte Physik in Regensburg, Boulder (USA) und Freiburg. Er promovierte 1997 am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching bei München. Seit Ende 1997 ist er am Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik angestellt und beschäftigt sich mit experimentellen und theoretischen Aspekten der photosphärischen Magnetfelder.



**Hardi Peter** promovierte 1996 am Max-Planck-Institut für Aeronomie in Katlenburg-Lindau. Danach arbeitete er als Postdoc am High Altitude Observatory in Boulder (USA). Seit 1999 erforscht er am Kiepenheuer-Institut in Freiburg die Korona von Sonne und Sternen und ist seit 2002 Privatdozent an der Universität Freiburg.