

Helioseismologie und das Innere der Sonne

Forschungsinfo 06/2005

Die Sonne - ihre Kenngrößen

Die Sonne ist ein Fixstern wie viele andere in unserer Milchstraße. Ihr Alter beträgt etwa 4,6 Milliarden Jahre. Der nächste Nachbarstern ist Alpha-Centauri im Abstand von 4,37 Lichtjahren (Ein Lichtjahr ist die Entfernung, die das Licht mit einer Geschwindigkeit von 300 000 km/s in einem Jahr zurücklegt). Ihre Entfernung von der Erde beträgt im Mittel 149,6 Millionen km, eine Distanz, die Astronomische Einheit genannt wird und für die das Licht nur etwa 8 Minuten benötigt.

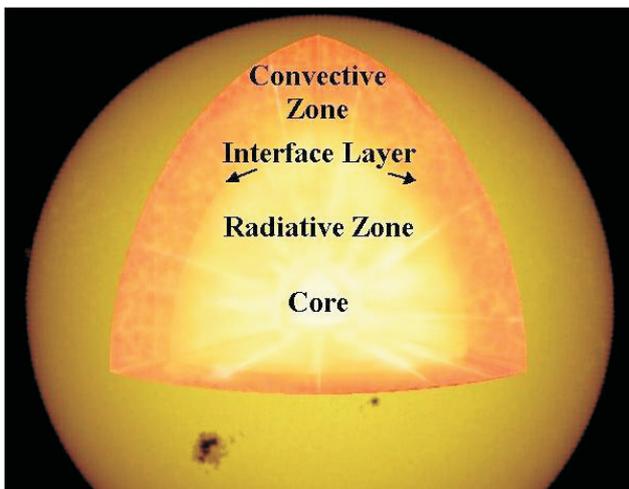


Abb.1: Schematischer Aufbau der Sonne: Im Inneren der heißen Kern (Core), in dem die Sonnenenergie erbrütet wird. Von dort wird die Energie durch Strahlung (Radiative Zone) und Konvektion (Convective Zone) an die Oberfläche transportiert.

Der Radius der Sonne ist 696 000 km, das entspricht 109 Erdradien. Die Sonne hat eine Masse von 2×10^{30} kg und ist damit 333 000 mal schwerer als die Erde. Ihre mittlere Dichte ist mit 1410 kg/m^3 nur ein wenig größer als die von Wasser. Die Oberflächentemperatur beträgt 5 800 K. Die Rotationsdauer der Sonne ist von der Erde aus gesehen etwa 27 Tage.

Der Energieausstoß der Sonne in Form von sichtbarem Licht entspricht einer Leistung von $3,85 \times 10^{23}$ kW. Diese Strahlung hat auf der Erdbahn noch eine Intensität von $1,37 \text{ kW/m}^2$.

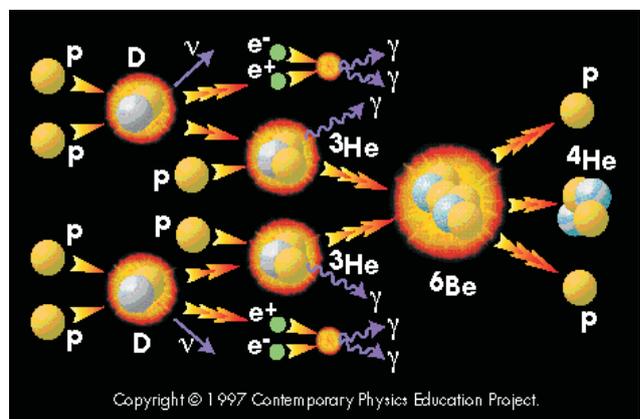
Mit den besten Teleskopen können wir heute auf der Sonnenoberfläche Strukturen von etwa 100 km Größe auflösen. Das Innere der Sonne ist der direkten Beobachtung zwar nicht zugänglich, aber mit den Mitteln der Helioseismologie können wir uns trotzdem ein recht genaues Bild über ihren inneren Zustand machen. Er ist in Abbildung 1 skizziert.

Die Sonne - unser Fusionsreaktor

Der Kern der Sonne ist die Quelle der Sonnenenergie und das Kraftwerk für das ganze Sonnensystem, also auch für das Leben auf der Erde. Bei Temperaturen von 15 Millionen Grad und einem Druck, der das vorwiegend aus Wasserstoff bestehende Gas auf die 13-fache Dichte von Blei komprimiert, herrschen Bedingungen gerade richtig dafür, dass Kernreaktionen ablaufen können. Bei diesen Temperaturen sind die meisten Atome in ihre Bestandteile Protonen, Neutronen und Elektronen zerlegt und treffen aufgrund der hohen Dichte und Energie häufig und mit großer Geschwindigkeit aufeinander.

Die Proton-Proton Reaktionskette ist die dominante Reaktion im Sonneninneren. Sie führt über die Zwischenprodukte Deuterium (D) und Berillium (Be) und unter Abstrahlung von Gammaquanten und Neutrinos (ν) zum Aufbau des Edelgases Helium (^4He), das sich als "Schlacke" der Kernreaktion im Zentrum der Sonne anreichert.

Die Abbildung 2 zeigt das Schema dieser Kernreaktionen. Die Neutrinos wechselwirken nach ihrer Erzeugung nicht mehr mit den anderen Teilchen und verlassen praktisch mit Lichtgeschwindigkeit ungehindert das Sonneninnere. Die nur vorübergehend auftretenden Positronen (e^+) zerstrahlen zusammen mit Elektronen (e^-) in harte Gammaquanten (γ). Diese werden jedoch auf ihre Reise vom Zentrum der Sonne nach außen gestreut, absorbiert und wieder emittiert, und verlieren so ihre Energie. Als niederenergetisches Licht (Photonen) können sie die Sonne nach langem Strahlungstransport durch den stabil geschichteten Kern und die sehr bewegte Konvektionszone schließlich an der Photosphäre verlassen.



Copyright © 1997 Contemporary Physics Education Project.

Abb.2: Schema der Proton-Proton Reaktionskette, als dessen Endprodukt Helium ^4He entsteht.

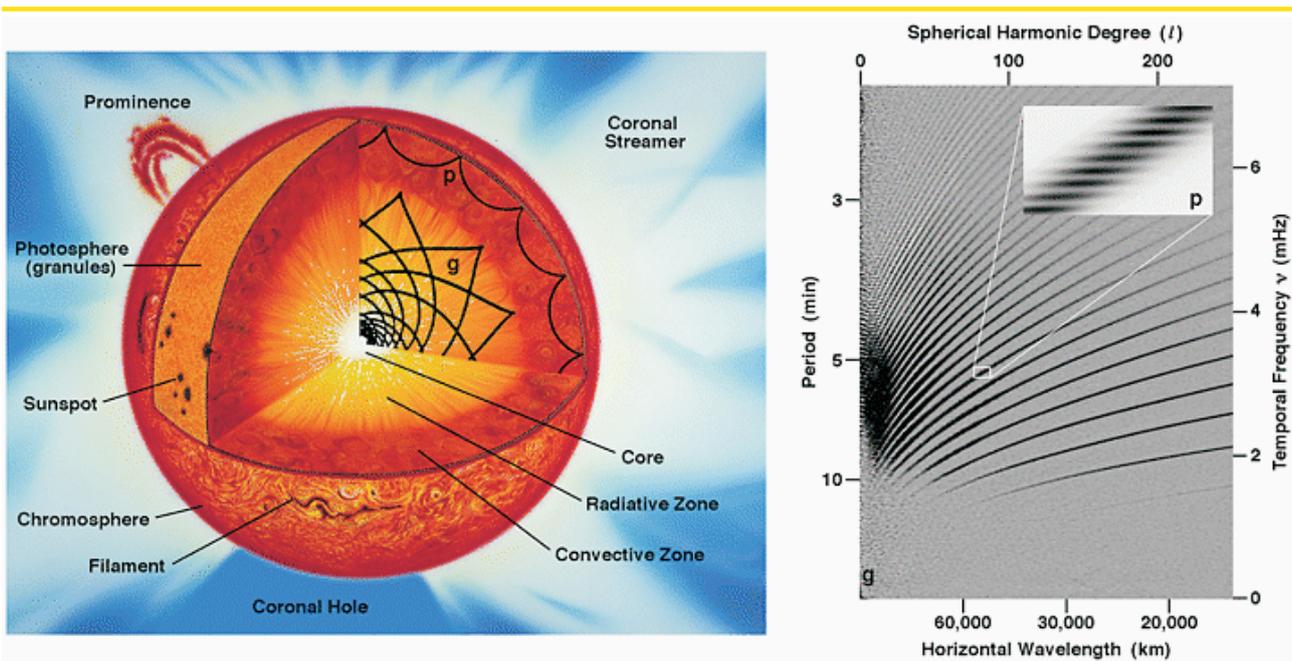


Abb.3: Ausbreitung von Schallwellen im Inneren der Sonne (linkes Bild) und das beobachtete Muster der Eigenfrequenzen für verschiedene Wellenlängen (rechtes Bild). Mit p sind die Bahnen von an der Oberfläche reflektierten Schallwellen bezeichnet, mit g die Ausbreitung von Schwerewellen, die im Sonneninneren vermutet werden.

Neben dem Licht können wir auf der Erde auch den Neutrinofluss aus dem Sonneninneren direkt, wenn auch mit einigem Aufwand, beobachten. Erst vor wenigen Jahren gelang es, unser Verständnis dieser "scheuen" Teilchen mit den Messungen solarer Neutrinos und den Bedingungen ihrer Entstehung im Inneren der Sonne in Einklang zu bringen.

Die Sonne - eine schwingende Glocke

Die Sonne ist ein durch die Gravitationskraft geschichteter, magnetisierter und elektrisch leitfähiger (Plasmaball) Gasball, in dem sich Schallwellen, also Druckschwankungen, ausbreiten können. Die Sonne wirkt als Resonanzkörper für diesen Schall, der von der Konvektion im Sonneninneren angeregt wird und ein vielfältiges Muster von stehenden Wellen bilden kann.

Abbildung 3 illustriert, wie die Schallwellen durch das Sonneninnere laufen. Nur ganz spezielle Wellenlängen und deren Vielfache passen in den Sonnenkörper hinein (linkes Bild) und können zu einem resonanten Schwingen des Gasballs führen.

Die typischen Perioden dieser Schwingungen betragen etwa fünf Minuten. Die Oszillationen können mit Hilfe der Dopplerverschiebung von Spektrallinien auf der Sonnenoberfläche beobachtet werden. Bisher konnten mehr als 10 Millionen akustische Eigenschwingungen identifiziert und ihre Frequenzen und Wellenlängen mit großer Genauigkeit vermessen werden (rechtes Bild). Mit Hilfe dieser Beobachtungen lässt sich das Innere der Sonne sondieren, in ähnlicher Weise wie der feste Erdkörper mit Schallwellen im tiefen Gestein sondiert wird.

Die solaren Eigenschwingungen verraten also Vieles über den Aufbau der Sonne, wie zum Beispiel den Verlauf der Schallgeschwindigkeit oder von Strömungen in ihrem Inneren. Die Helioseismologie hat so

den Sonnenforschern ein neues Fenster zum Innenleben der Sonne eröffnet.

Anomalien in der Schallausbreitung

Die Schichtung der Schallgeschwindigkeit im Inneren der Sonne zeigte nach den Messungen des Sonnenobservatoriums SOHO theoretisch nicht erwartete Unregelmäßigkeiten. SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) ist ein im Weltraum zwischen Sonne und Erde am so genannten Librationspunkt in etwa 1 Millionen km Entfernung von der Erde stationiertes Raumfahrzeug der ESA und NASA, von dem aus die Sonne seit 10 Jahren ununterbrochen (kein Tag-Nacht Rhythmus) mit verschiedenen Instrumenten beobachtet wird.

Das Instrument MDI (Michelson Doppler Imager) auf SOHO misst zum Beispiel die vertikale Bewegung des Gases an Millionen von Punkten in der sichtbaren Photosphäre mit Hilfe des Dopplereffekts (Frequenzverschiebung durch Bewegung der Lichtquelle), während das Instrument VIRGO (Variability of Solar IRradiance and Gravity Oscillations) die solaren Oszillationen durch die rhythmischen Helligkeitsschwankungen der Sonne an ihrer Oberfläche ausmacht. Mit Hilfe von Langzeitbeobachtungen dieser beiden Instrumente konnten die SOHO-Wissenschaftler die Schallgeschwindigkeit im Inneren der Sonne präzise genug messen, um die derzeitigen theoretischen Modelle über ihren inneren Aufbau auf den Prüfstand zu stellen.

Die Messergebnisse konnten diese Theorie weitgehend bestätigen. Es zeigten sich aber auch kleine, signifikante Abweichungen der gemessenen Schallgeschwindigkeit von der theoretischen Vorhersage, die in Abbildung 4 dargestellt sind.

Die "verdächtige" rote Schicht in einer Tiefe von etwa 0,3 Sonnenradien stimmt genau mit der Grenze zwischen der äußeren Konvektionszone (Transport von Wärme durch turbulente Plasmabewegung) und dem inneren radiativen Kern (Transport von Wärme durch Strahlung und Leitung) überein.

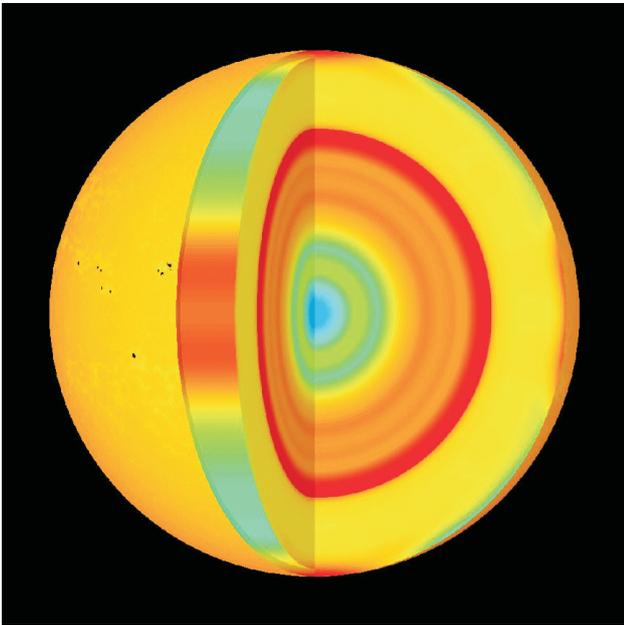


Abb.4: Verteilung der Abweichung der Schallgeschwindigkeit im Inneren der Sonne von dem theoretischen Standard-Model, dargestellt in Farbkodierung: rot bedeutet schneller, blau langsamer als im Model angenommen.

In der blauen Schicht in Abbildung 4 im Bereich des inneren Kerns ist die Temperatur der Sonne etwa 0,1 Prozent niedriger als die traditionell erwarteten 15 Millionen Grad. Obwohl diese Abweichung nur sehr klein erscheint, könnte es bedeuten, dass die thermodynamischen Reaktionen im Kern, welche die Energie der Sonne produzieren, etwas weniger heftig ablaufen als man bisher dachte. Ein leicht kühlerer Kern führt letztendlich zu etwas geringerer Abstrahlung der Sonne, und daher spielen Theoretiker mit dem Gedanken, dass das Kraftwerk Sonne langzeitigen Schwankungen in seiner Leistung unterliegen könnte.

Die Rotation im Inneren der Sonne

Am solaren Äquator beträgt die Umfangsgeschwindigkeit der Sonne 2 km/s. Die daraus resultierende Dopplerverschiebung von Spektrallinien, die von der Oberfläche der Sonne abgestrahlt werden, kann direkt gemessen werden. Durch die Rotation der Sonne werden auch die Schallwellen in ihrer Bewegung relativ zum Sonnenbeobachter verschoben. Sie führt zu einer Asymmetrie der beobachteten Schallgeschwindigkeit für die Wellen, je nachdem ob sie sich in West-Ost-Richtung oder umgekehrt ausbreiten. Diese Asymmetrie ermöglicht es schließlich, die Rotationsbewegung und auch Strömungen im Inneren der Sonne zu bestimmen.

Die Auswertung der Messdaten verlangt die Lösung eines mathematisch aufwendigen Inversionsproblems. Die aus monatelangen Beobachtungen von MDI auf SOHO abgeleiteten Tiefenprofile der Rotationsrate der Sonne sind in Abbildung 5 dargestellt.

Offensichtlich dreht sich das Plasma der Konvektionszone je nach heliographischer Breite unterschiedlich schnell. Die Polregionen rotieren deutlich langsamer und brauchen etwa 33 Tage für eine Umdrehung, während der Äquatorgürtel nur 25 Tage für einen Umlauf benötigt. Unterhalb der Konvektionszone scheint der stabil geschichtete Kern der Sonne starr zu rotieren mit einer Periode von 27 Tagen, was der Rotationsrate der Konvektionszone bei etwa 30° heliographischer Breite entspricht. Beide Regionen sind durch eine dünne Scherungsschicht getrennt.

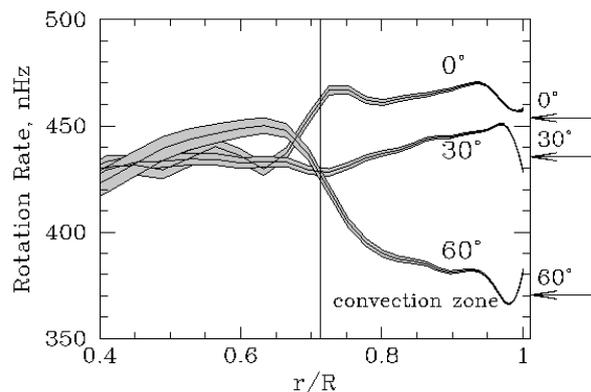


Abb.5: Verlauf der Rotationsrate im Inneren der Sonne in Form von Tiefenprofilen bei verschiedenen heliographischen Breiten und als Funktion des relativen Sonnenradius. Die Rotationsperiode von 27 Tagen entspricht einer Rotationsrate von 430 nHz.

Die Theoretiker glauben, dass diese Geschwindigkeitsscherung in einer Tiefe von etwa 0,3 Sonnenradien die elektrischen Ströme erzeugt, die für das großräumige Magnetfeld der Sonne verantwortlich sind. Mit Hilfe der Methoden der Helioseismologie wurde also der mögliche Sitz des Dynamos der Sonne entdeckt!

Konvektion und lokale Helioseismologie

Während der Kern der Sonne, in dem die Kernfusion abläuft, etwa 60% der Sonnenmasse in sich vereinigt, besitzt die Strahlungszone 38% und die "luftige" Konvektionszone nur 2% der Sonnenmasse. In ihr wallt das heiße Gas auf wie in einem Wassertopf auf der heißen Herdplatte und bildet dabei gigantische Zellen von aufsteigendem und abfallendem Gas, das die Hitze aus dem Kern an die Sonnenoberfläche transportiert. Das resultierende großräumige Strömungsmuster in der Konvektionszone lässt sich aus den SOHO Messungen rekonstruieren und ist in Abbildung 6 für die oberen Schichten (oberhalb von 0,7 Sonnenradien) der Sonne illustriert. Die Farbkodierung gibt die Geschwindigkeit der differentiellen Rotation wieder.

An den Polarkappen (blau) ist die Strömung deutlich verlangsamt. Die großen Zellen der meridionalen Zirkulation sind gut zu erkennen. Sie spielen eine wichtige Rolle beim Transport des magnetischen Flusses auf der Sonne von niedrigen zu hohen Breiten und beeinflussen so den gesamten magnetischen Zyklus. Die Konvektion setzt sich zu immer kleineren Skalen fort, und es bilden sich insbesondere nahe der Sonnenoberfläche wie bei einer turbulenten Kaskade immer kleinere Zellen der Konvektion, angefangen von der Supergranulation (20 000-30 000 km) bis hinunter zur Granulation (1 000-2 000 km). Es kommt zur Bildung einer Myriade von sehr kleinen magnetischen Strukturen (100 km), die an den Rändern dieser Zellen konzentriert sind.

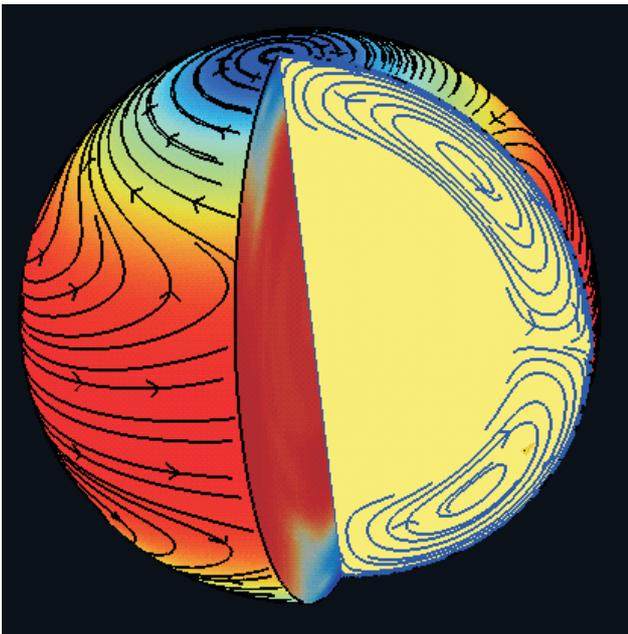


Abb.6: Großräumige Strömung in der Konvektionszone der Sonne. Der Farbcode gibt die Geschwindigkeit der differentiellen Rotation wieder, Die Stromlinien im Inneren der Sonne zeigen das meridionale Strömungsfeld.

In aufwendigen Modellrechnungen am MPS werden diese turbulenten Prozesse in Computern nachvollzogen. Abbildung 7 zeigt einen 6 000 x 6 000 km großen Ausschnitt einer simulierten Sonnenoberfläche mit vielen Details, wie sie auch beobachtet werden. Der magnetische Fluss, der hier an die Ränder der heißen Aufströmung gedrängt ist, kann an anderer Stelle zu gewaltigen Flussröhren verschmelzen, die als dunkle "Poren" oder noch größer als Sonnenflecken sichtbar sind.

Mit Hilfe der jüngsten Methode in der Sonnenphysik, der so genannten lokalen Helioseismologie, lassen sich Konvektionszellen und Gebiete mit hohen Flusskonzentrationen auch unter der Sonnenoberfläche studieren. Dabei verwendet man Techniken (ermöglicht durch leistungsfähige Computer), die denen der medizinischen Computertomographie ähnlich sind. Zur Durchleuchtung dieser Gebiete werden jedoch wieder Schallwellen benutzt, die durch

die ständige Konvektionsbewegung angeregt werden. Aus der gemessenen Laufzeit dieser Wellen zwischen verschiedenen Stellen der Oberfläche lassen sich lokale, oberflächennahe Anomalien der Schallgeschwindigkeit rekonstruieren.

E. Marsch, B. Inhester

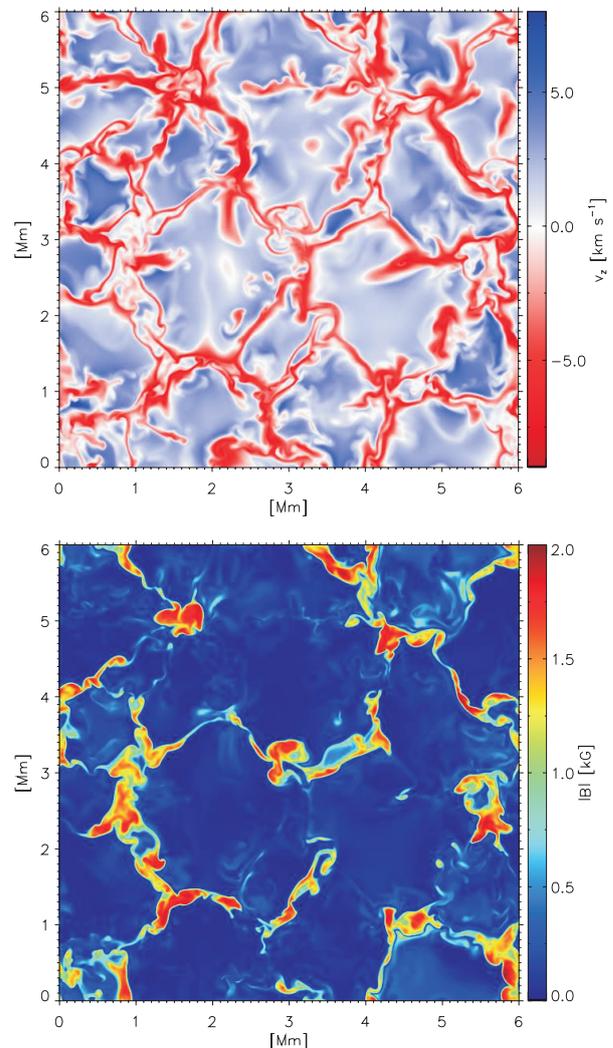


Abb. 7: Momentaufnahme eines Ausschnitts der Sonnenoberfläche in einer Simulation. Die Abbildung zeigt die Vertikalgeschwindigkeit (oben) und den Betrag (unten) der magnetischen Feldstärke.

Internetseiten mit Informationen über die Sonne:

<http://www.linmpi.mpg.de/forschung2/>
<http://www.kis.uni-freiburg.de/kiswww.html>
<http://fusedweb.pppl.gov/CPEP/chart.html>
<http://solar.physics.montana.edu/YPOP/>
<http://science.nasa.gov/ssl/PAD/SOLAR/>
<http://sohowww.nascom.nasa.gov/>
<http://vestige.lmsal.com/TRACE/>