

# Riesenkonvektion unter Sonnenflecken

VON EBERHARD WIEHR UND BURKART BOVELET

Hoch aufgelöste Bilder ermöglichen in Verbindung mit modernen Verfahren der Mustererkennung einen räumlichen Einblick in dynamische Prozesse im Bereich der Sonnenoberfläche.

Sonnenflecken sind etwa 2000 Grad kühler als ihre »ungestörte« Umgebung. Die Ursache für ihre relative Kühle sind Magnetfelder, die den konvektiven Anteil des Energietransports aus dem Sonneninneren behindern. Modellrechnungen zeigen, dass dieser »Stau« knapp außerhalb des Flecks rollenartige Gasströmungen in einigen tausend Kilometern Tiefe verursachen sollte. Als Folge gäbe es direkt neben dem Fleck Einwärtsrollen, an die sich unmittelbar außerhalb Auswärtsrollen anschließen (Abb. 1). Die Modellrechnungen werden durch helioseismologische Messungen bestätigt, bei denen die auf der Sonne ständig vorhandenen Schallwellen analysiert werden. Vergleicht man die Wellenausbreitung in der ungestörten Sonne mit jener in der Umgebung der Flecken, so findet man charakteristische Differenzen, die auf eine rollenartige Bewegung in tiefen Schichten schließen lassen.

Falls diese tief liegenden Strömungsmuster auch Auswirkungen in den photosphärischen Schichten zeigen, so sollten diese als horizontale Bewegungen solarer Strukturen zu erkennen sein. Deren Nachweis war das Ziel eines Forschungsprojekts der Universitäts-Sternwarte Göttingen, in dessen Rahmen wir neue Daten untersuchten, die mit zwei Sonnentele-

skopen auf La Palma (Kanarische Inseln) gewonnen wurden. Die Beobachtungen wurden am 1. April 2001 mit dem »Dutch Open Telescope« (DOT; Öffnung: 45 cm) gemacht, und durch Messungen vom Juli 2003 mit dem »Swedish Solar Tower« (SST; Öffnung: 1 m).

Die ersten Beobachtungen galten dem unter der Bezeichnung AR-9407 katalogisierten Fleck. Das war zu diesem Zeitpunkt ein recht alter, isoliert vorkommender Fleck des Typs H, der sich nahe des Sonnenäquators befand und einen Durchmesser von ungefähr 22 000 Kilometern aufwies. Als »Sonden« für den Nachweis der photosphärischen Bewegungen verwendeten wir kleinskalige magnetische Gebiete, deren Kraftlinien wahrscheinlich tief genug nach unten reichen. Leider lassen sich die Magnetfelder von solchen Oberflächenstrukturen nicht mit der notwendigen Raum- und Zeit-Auflösung direkt untersuchen, da sie sehr kleinräumig sind.

Man kann sich jedoch eines Tricks bedienen und ihre Helligkeits-Signatur vermessen: Im Lichte des CH-Moleküls bei einer Wellenlänge von 430 nm, dem so genannten »G-Band« erscheinen die kleinräumigen magnetischen Gebiete hell, und können dadurch in »gewöhnlichen« Sonnenbildern als »CH-Aufhellungen« unter-

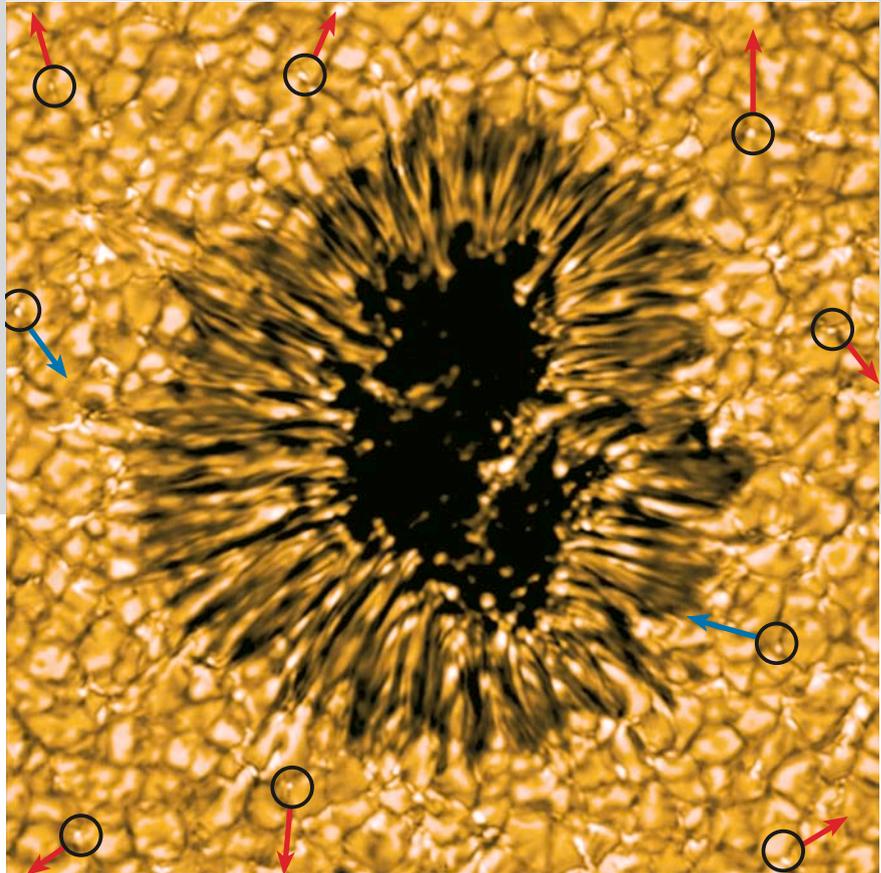
sucht werden. In den Bildern kann mit modernen Verfahren der Bildbearbeitung die Grenzauflösung des Teleskops erreicht werden (Abb. 2); somit lässt sich bei hoher räumlicher Trennschärfe eine enge Zeitfolge realisieren.

Um eine hohe statistische Signifikanz zu erreichen, muss eine große Anzahl solcher Strukturen untersucht werden. Das kann nur mit einem Rechner sowie Programmen zur automatischen Mustererkennung erreicht werden (siehe Kasten Seite 24). Bei der Untersuchung horizontaler Strömungen ist zu berücksichtigen, dass diese an der Sonnenoberfläche von den Bewegungen der Sonnengranulation überlagert werden. Letztere sind stochastischer Natur und lassen sich mathematisch von den systematischen Auswärtsbewegungen durch die tief liegenden, großen Zellen unterscheiden.

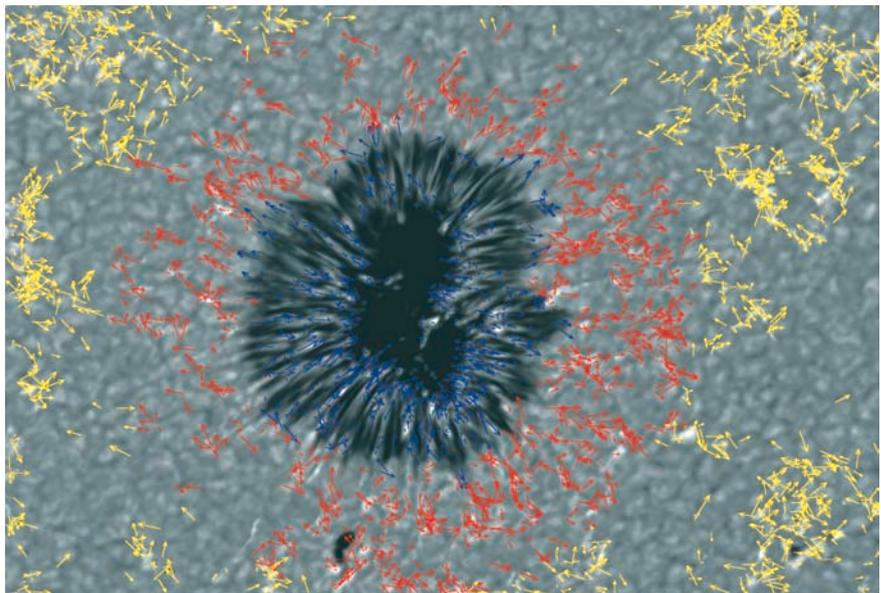
## Gräben um die Flecken

Eliminiert man den Einfluss der Granulen auf die Messdaten, so findet man für die radiale Auswärtsbewegung der CH-Aufhellungen in der Nähe des Flecks eine Geschwindigkeit von etwa 300 m/s, die in größerer Entfernung abnimmt und in einer Distanz von etwa 10 000 Kilometern vom Fleck bis auf Null sinkt. Dieser ringförmige Bereich um den Fleck wird in der Fachwelt »sunspot moat« (Englisch: »Sonnenflecken-Graben«) genannt; er entspricht dem Einflussbereich der radialen Drift durch die tief liegenden Rollen. Außerhalb dieses »sunspot moat« findet man

▶ Abb. 1: Schema großräumiger Konvektionsströmungen unterhalb der sichtbaren Sonnenschichten. Die Strömungen entstehen durch das Zusammenspiel der magnetischen Kraftlinien eines Sonnenflecks mit dem Energietransport aus tiefen Schichten.

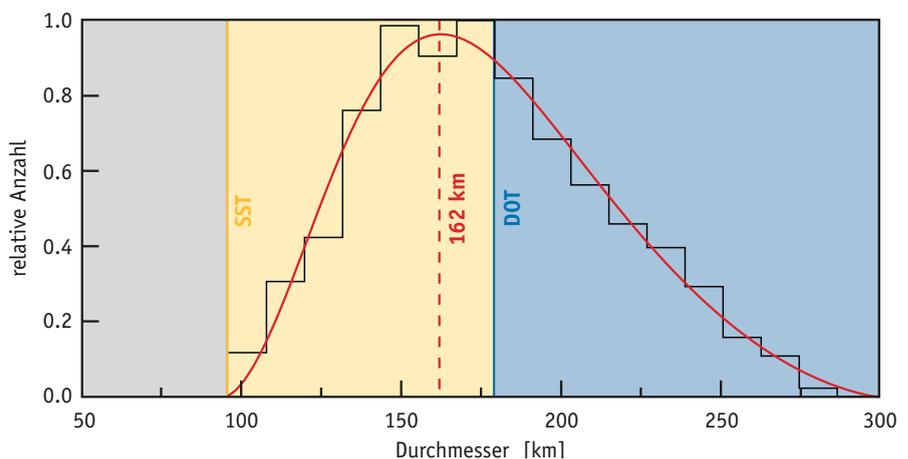


▶ Abb. 2: Der Sonnenfleck AR-9407 und seine Umgebung im Licht der Absorptionslinien des CH-Moleküls (dem so genannten »G-Band«) bei einer Wellenlänge von 430 nm (blaues Licht). Die markierten, hellen Strukturen sind kleinräumige Bündel magnetischer Kraftlinien, welche von den Strömungen in tieferen Sonnenschichten erfasst werden. Die Kantenlänge des Bildes beträgt 44 Bogensekunden. Das entspricht auf der Sonnenoberfläche 32 000 km. Der Durchmesser des Flecks beträgt mit etwa 22 000 Kilometern das 1,5-fache des Erddurchmessers.



▶ Abb. 3: Horizontale Bewegungen heller CH-Strukturen. Gelbe Pfeile markieren die so genannten »G-band bright points« mit ungeordneten Bewegungen weniger km/s durch granulare Störungen. Rote Pfeile zeigen eine überlagerte radiale Auswärtsdrift von 0,3 km/s. Blaue Pfeile zeigen die bekannte Einwärtsbewegung in der Flecken-Penumбра. Der Untergrund zeigt die über die einstündige Bildserie gemittelte Helligkeitsverteilung.

▶ Abb. 4: Häufigkeitsverteilung der Flächengröße kleinräumiger Magnetfeld-Konzentrationen; das Maximum entspricht einem häufigsten Durchmesser von etwa 160 km. Der Wertebereich aus Beobachtungen mit dem DOT ist blau markiert, der mit dem SST hinzugewonnene Bereich gelb. Der graue Bereich liegt jenseits der Grenzauflösung des SST.

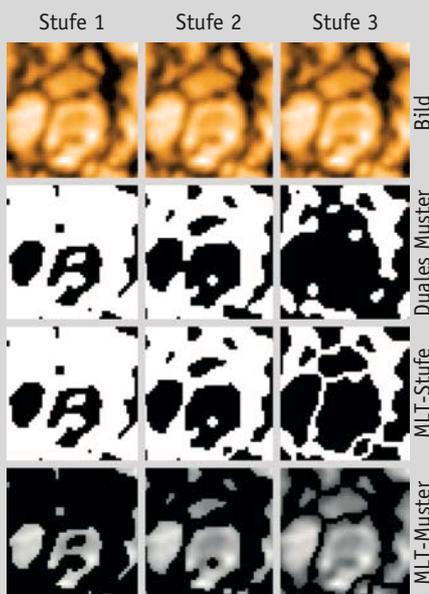


## Automatische Mustererkennung am Beispiel von Granulen

Um in Bildern der Sonnenscheibe helle Strukturen in dunklerer Umgebung zu erkennen, wäre das einfachste Kriterium eine schlichte Unterscheidung der Art »heller bzw. dunkler als der Mittelwert« des Bildes. In diesem Fall würden die hellen und die dunklen Strukturen denselben Flächenanteil des Bildes einnehmen. Nun weiß man jedoch, dass Granulen eine etwa doppelt so große Fläche bedecken wie die intergranularen Zwischenräume; dies kann von einem Algorithmus nur realisiert werden, wenn man das Trennkriterium deutlich unterhalb des Helligkeitsmittelwertes ansetzt. Auf einem derart niedrigen Helligkeitsniveau erschweren schmale, weniger dunkle intergranulare Zwischenräume die Abgrenzung benachbarter Granulen (Abb. 1, 2. Zeile rechts).

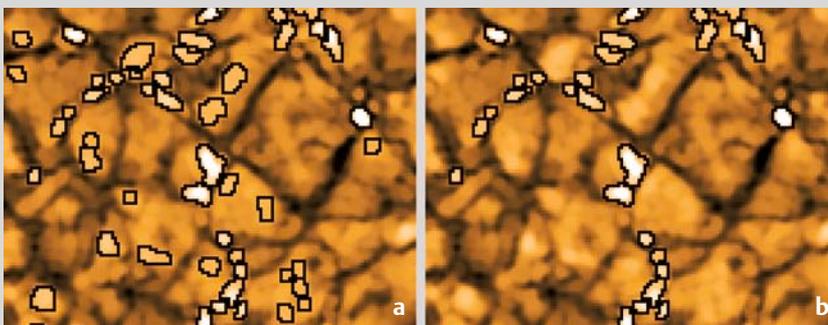
Aus diesem Grund wird das Trennkriterium »hell/dunkel« auf mehrere Helligkeitsstufen erweitert: Bei großer Helligkeit, zum Beispiel 20 Prozent über dem Mittelwert, werden hellste Muster erstmals erkannt. Bei etwas niedrigerer Helligkeit, zum Beispiel zehn Prozent über dem Mittel, werden auch weniger helle Granulen erkannt. Gleichzeitig wird bei der betreffenden Helligkeitsstufe die Ausdehnung bereits erkannter Muster ermittelt. Es folgt eine dritte Stufe und dann niedrigere Stufen bis zu hinreichend dunklen (intergranularen) Helligkeiten, die das erwartete Flächenverhältnis von 2:1 wiedergeben. Diese schrittweise Erkennung neuer Strukturen bei gleichzeitiger Ausdehnung der bereits erkannten Muster (bis auf einen Mindestabstand von einem Pixel) erlaubt es, selbst eng benachbarte Granulen in ihrer Form und Größe wirklichkeitsnah zu erfassen (Abb. 1, Stufe 3, 3. und 4. Zeile).

Dieses »Multi-Level-Tracking« (MLT) genannte Verfahren bleibt einer zu erkennenden Struktur sozusagen »auf der Spur« von ihren hellsten Bereichen bis hinunter zu der Grenzhelligkeit, welche ihrer Form



◀ Abb. 1: Mustererkennung von Granulen durch duale Entscheidung auf unterschiedlichen Helligkeitsstufen – Mittelwerte: +20%, 0, -20% (2. Zeile) – im Vergleich zur schrittweisen Kombination mehrerer Schwellenwerte im MLT-Verfahren (3. Zeile) und zum dadurch erkannten Muster (4. Zeile). Stufe 1 erkennt hellste Muster, Stufe 2 weniger helle, Stufe 3 dehnt das finale Muster aus.

▼ Abb. 2: Erkennung von CH-Aufhellungen durch MLT (a) und Auswahl intergranularer Magnetfeldkonzentrationen durch Ausgrenzung heller Teilgebiete von Granulen mit dem Kontrastkriterium (b); lediglich zwei Teilgebiete (Bildmitte) bleiben strittig.



noch zugerechnet werden soll. Zugrunde liegt dabei die Annahme, dass auf der Sonne intergranulare Zwischenräume etwa gleich dunkel sind, in den Bildern weniger hell erscheinende lediglich durch das endliche Trennvermögen des Teleskops vortäuscht werden. Dies bestätigen Aufnahmen mit Teleskopen größeren Durchmessers und damit höherer Trennschärfe, wie das neue SST auf La Palma.

Die Anwendung der MLT-Mustererkennung auf Bilder im Lichte des CH-Moleküls, des so genannten »G-Bandes«, ergibt zwei

Sorten heller Strukturen, der »G-band bright points«: (a) kleinräumige magnetische Flusskonzentrationen, (b) helle Teilbereiche von Granulen. Beide lassen sich durch das Helligkeits-Gefälle an ihren Rändern voneinander unterscheiden: Die Magnetfelder in intergranularen Zwischenräumen zeigen deutlich höhere Intensitätsgradienten. Ein zusätzliches Kontrastkriterium im MLT-Verfahren nutzt diesen Unterschied, um die kleinräumigen Magnetfeldkonzentrationen in den Bildern getrennt zu erkennen (Abb. 2).

für die CH-Aufhellungen ausschließlich die zufälligen Bewegungen durch die Granulen (Abb. 3).

Die große Anzahl identifizierter Strukturen erlaubt außer der Untersuchung ihrer Horizontalbewegungen auch die ihrer Häufigkeitsverteilung. Da die vom Rechner ausgewählten CH-Aufhellungen »kleinräumige Magnetfeldkonzentrationen« darstellen (siehe Kasten oben), ist es von großem Interesse, deren wahren Durchmesser zu kennen. Aufgrund der mit dem »Dutch Open Telescope« (DOT) beobachteten Daten fanden wir eine stete Zunahme der Anzahl mit abnehmender Größe. Hier-

aus kann man schließen, dass die wirklichen Durchmesser kleiner sein müssen als die räumliche Auflösung, die das DOT in Abb. 2 erreichte (ca. 180 km auf der Sonne).

Mit Hilfe von Daten des kürzlich in Betrieb genommenen 1-m-»Swedish Solar Tower« auf La Palma (SST) findet man eine deutliche Abnahme der Anzahldichte zu kleinen Strukturen mit einem Maximum nahe 160 km als häufigsten Durchmesser der Magnetfeld-Gebiete (Abb. 4). Die Abnahme der Anzahl von CH-Aufhellungen unterhalb 130 km Durchmesser könnte daran liegen, dass hier die Strukturen durchsichtig werden (»optisch dünn«) und

die seitliche Einstrahlung sie nicht mehr zu heizen vermag.

Eine weitere interessante Größe ist der Zusammenhang des Durchmessers mit der Helligkeit. Hier erwartet man eigentlich eine klare Abnahme, die schließlich zu dunklen Poren und dann zu Flecken überleitet. Entsprechende Modellrechnungen schienen bisher durch Beobachtungen bestätigt zu werden. Mit der großen Statistik der CH-Aufhellungen sowie der hohen Grenzauflösung des SST findet man jedoch eine konstante Helligkeit unabhängig vom Durchmesser der »kleinräumigen Magnetfeldkonzentrationen.« □

# Pate gesucht!

Der Verlag **Spektrum der Wissenschaft** bietet – unter der Schirmherrschaft der Gesellschaft für Biochemie und Molekularbiologie sowie des Max-Planck-Instituts für Astronomie – Oberstufenklassen in den naturwissenschaftlich-mathematischen Fächern hochwertige Zusatzmaterialien zur Ergänzung des Lernstoffes an. Diese für die Schule kostenlose Aktion umfasst den Bezug der Zeitschriften **Spektrum der Wissenschaft** sowie **Sterne und Weltraum**. Ein Thema pro Ausgabe wird durch Schulbuchredakteure des PAETEC-Verlags didaktisch aufbereitet und Schülern sowie Lehrern im Internet zur Verfügung gestellt. Finanziert wird die Kampagne jeweils zur Hälfte vom Verlag sowie von Sponsoren aus der Wirtschaft.

**Die Resonanz der Schulen ist überwältigend: Mehr als 5.000 Schüler haben sich bereits für eine Teilnahme angemeldet.**

**Werden auch Sie Pate und ermöglichen ihnen die Teilnahme an WIS!**

Folgende Sponsoren haben schon die Patenschaft für Schulklassen übernommen:  
*Aventis . Bayernoil . Buchhandlung Bindernagel . Vermessungsbüro Reinhard Brenke . Biotronik GmbH . CEMA AG . Evotec . Frankfurter Buchmesse . Förderverein Albert-Schweitzer-Gymnasium . Förderverein Clara-Schumann-Gymnasium . Förderverein Gymnasium Ganderkesee . GWU GmbH . Henkel KGaA . Ineos Phenol GmbH . IVO Industrievereinigung Odenwald . Linklaters Oppenhoff & Rädler . Otto Markert & Sohn GmbH . Märkischer Arbeitgeberverband . Maschinenfabrik Rheinhausen . Mc Kinsey . Merck KGaA . Harald Meyer Brandschutz . microTEC GmbH . Roche Diagnostics . Sparkasse Göttingen . Stiebel Eltron .*

Ausführliche Informationen finden Sie im Internet:

**[www.wissenschaft-schulen.de](http://www.wissenschaft-schulen.de)**

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

Spektrum der Wissenschaft  
Verlagsgesellschaft mbH  
Slevogtstraße 3–5  
69126 Heidelberg  
Tel.: 06221 9126-817  
E-Mail: [wis@spektrum.com](mailto:wis@spektrum.com)