

Die **Sonne** ist auch im **Minimum** aktiv

Mit einem neuartigen von Sonnenforschern entworfenen Verfahren zur automatisierten Mustererkennung lassen sich kleinräumige magnetische Gebiete auf der Sonne identifizieren. Hochgerechnet auf die gesamte Sonnenoberfläche fanden sich im jüngsten, besonders tiefen Minimum der Aktivität mindestens 600 000 solcher Strukturen. Das Verfahren stellen die Autoren auch Amateurastronomen zur Verfügung.

Von Eberhard Wiehr und Burkart Bovelet

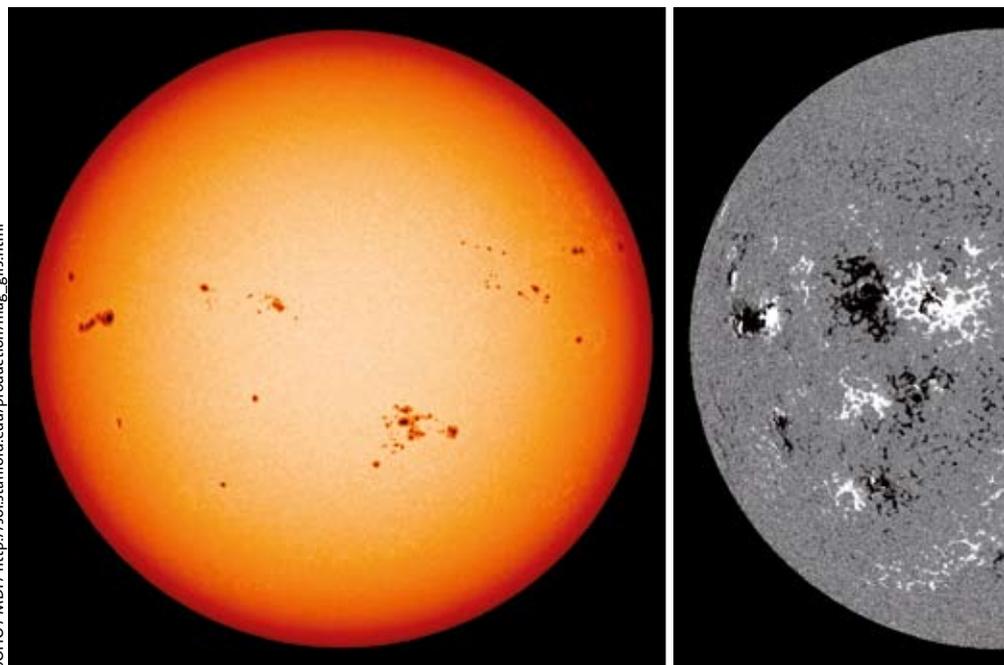
Ohne magnetische Aktivität sähe die Sonne recht eintönig aus: Sie wäre nur vom granularen Muster des brodelnden Sonnenplasmas überzogen – und diese Granulen wären auch nur bei hoher Auflösung zu beobachten. Erst die magnetischen Kraftfelder strukturieren die sichtbare Sonnenoberfläche auf großen und kleinen räumlichen Skalen. Beispiel hierfür geben die großräumigen Sonnenflecken mit typischen Ausdehnungen, die mindestens dem Durchmesser der Erde entsprechen (Bild rechts oben).

In diesen Flecken wird der konvektive Energietransport aus dem Sonneninneren von 0,2 bis zu 0,4 Tesla starken Magnetfeldern weitgehend unterbunden. Deshalb sind die Flecken um rund 2000 Grad kühler als ihre Umgebung und erscheinen folglich dunkler als diese. In den Fackelgebieten ihrer Umgebung finden sich stets kleine Strukturen mit Durchmessern von weniger als hundert Kilometern. Im Gegensatz zu den Flecken leuchten diese Gebiete heller als ihre unmagnetische Umgebung, da hier bis zu 0,15 Tesla starke Magnetfelder den Blick in tiefere, etwa 1000 Grad Celsius heißere Schichten ermöglichen. Im Bereich der Flecken stammt

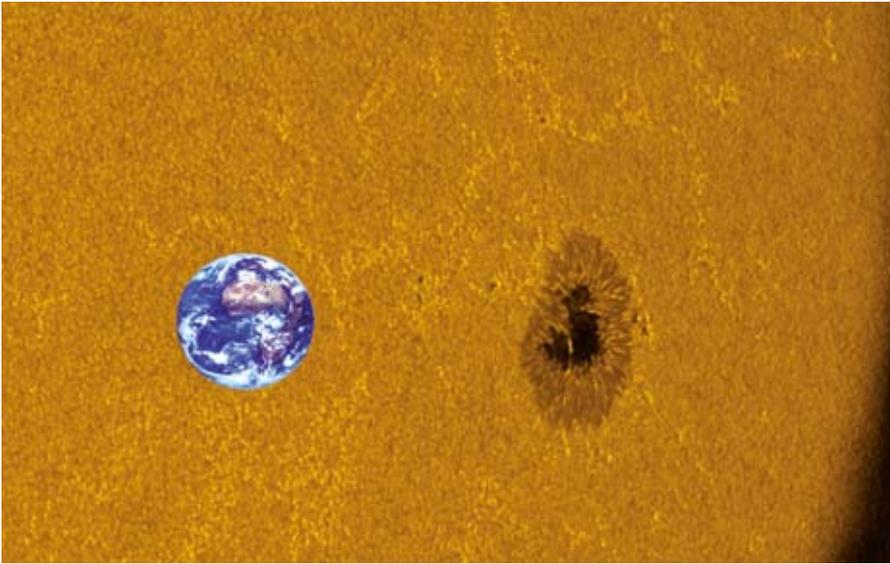
die Strahlung zwar ebenfalls aus größeren Tiefen als die Strahlung ihrer Umgebung, die Flecken erscheinen aber dennoch dunkler, weil in ihnen der von unten kommende Energiefluss reduziert ist.

Die im Bild rechts oben sichtbaren magnetischen Fackelstrukturen treten bevorzugt an den Rändern von Supergranulen auf, die jeweils eine typische Größe

von rund 30 000 Kilometern besitzen. In den Supergranulen gibt es horizontale Gasströmungen mit Geschwindigkeiten von etwa 0,5 Kilometern pro Sekunde. Die Bewegungsenergie einer solchen Strömung ist größer als die magnetische Energie der kleinräumigen hellen Fackelstrukturen, so dass diese an den Rändern zusammengedrängt werden.



SOHO / MDI / http://soi.stanford.edu/production/mag_gifs.html



Dieser Sonnenfleck nahe dem Scheibenrand ist etwa so groß wie die Erde. Er ist von hellen Gebieten, den so genannten Fackeln, umgeben. Dabei handelt es sich um kleinräumige Magnetstrukturen, die sich an den Rändern von Supergranulen ansammeln.

Während Flecken und Fackeln im Weißlicht gut sichtbar sind, lassen sich weitere Phänomene der Sonnenaktivität wie Protuberanzen, Strahlungsausbrüche (Flares) und seltenere Materieausbrüche nur im Licht starker chromosphärischer Spektrallinien beobachten, vorzugsweise in der roten Wasserstofflinie H-Alpha. All diese magnetischen Phänomene treten stets in Aktivitätsgebieten auf, deren Häufigkeit und solare Breite mit dem elfjährigen Fleckenzklus variieren, während ihre magnetischen Polaritäten einem 22-jährigen Zyklus unterliegen.

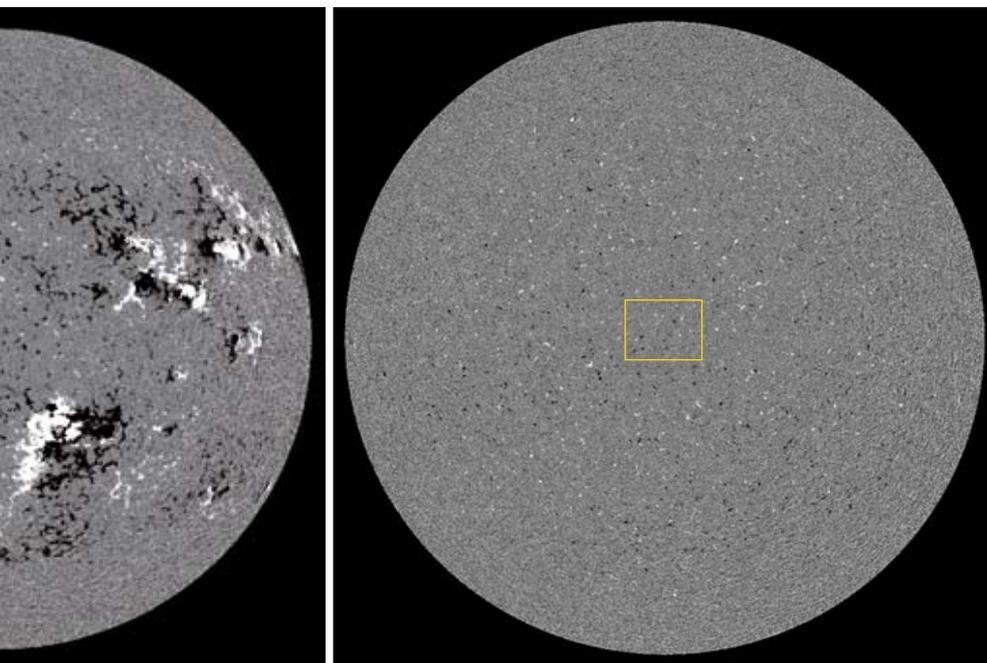
Im Aktivitätsminimum sind magnetische Kraftlinien in mehr als 100 000 Kilometer Tiefe wie auf einer Kabeltrommel aufgewickelt. Sie verharren dort, bis Auftriebskräfte sie allmählich an die Oberfläche tragen, wo sie dann als riesige Magnet-

feldschleifen weit in die Sonnenkorona hinausragen. An den Stellen, wo sie die Photosphäre durchstoßen, erzeugen sie Aktivitätsgebiete. Die magnetischen Eigenschaften dieser Gebiete überwachen die Astronomen mit dem Michelson Doppler Imager (MDI), der sich an Bord des Sonnenforschungssatelliten Soho befindet.

Auf den mit MDI gewonnenen Karten der gesamten Sonnenscheibe verraten sich magnetische Nord- oder Südpolaritäten als helle beziehungsweise dunkle Gebiete. Besonders zahlreich waren diese Mitte Juli 2000, als die Sonnenaktivität ein ausgeprägtes Maximum durchlief. Das linke und das mittlere der unten gezeigten Bilder lässt eindrucksvoll den Zusammenhang mit den im optischen Spektralbereich sichtbaren Sonnenflecken erkennen.

Das rechte der unten gezeigten Bilder erfasst hingegen die Situation im November 2007, als sich die Sonnenaktivität in einem ausgeprägt tiefen Minimum befand. Obwohl es wochenlang keine Flecken gab, war die Sonne keineswegs frei von Magnetfeldern: Die MDI-Karte zeigt ein »Pfeffer-und-Salz-Muster«, das zahlreichen magnetischen Nord- und Südpolen von nur wenigen hundert Kilometern Durchmesser entspricht.

Ihre Untersuchung ist mit einigen Schwierigkeiten verbunden: Manche der kleinräumigen Nord- und Südpolaritäten sind derart eng benachbart, dass sie sich wegen des begrenzten Auflösungsvermögens in den MDI-Karten gegenseitig auslöschten. Doch selbst bei hinreichend hoher Auflösung erfordert die Ermittlung ihres Magnetfelds nicht nur eine anspruchsvolle



Ganz links ist die Sonne im optischen Licht mit zahlreichen Fleckengruppen zu sehen. Das Bild wurde während des Aktivitätsmaximums im Juli 2000 aufgenommen. Das mittlere Bild zeigt die zur gleichen Zeit mit dem Instrument MDI des Sonnenforschungssatelliten Soho gewonnene Magnetkartierung. Hierbei entsprechen dunkle und helle Gebiete entgegengesetzten magnetischen Polaritäten. Zum Vergleich stellt die Magnetkarte rechts die Sonnenscheibe während einer Phase geringer Aktivität im November 2007 dar. In dem markierten rechteckigen Gebiet wiesen die Autoren mit einer von ihnen entwickelten Software zur automatischen Mustererkennung zahlreiche kleinräumige Magnetfeldstrukturen nach.

volle Messtechnik zur genauen Bestimmung der Polarisation der Strahlung, sondern auch Annahmen über den Verlauf der Temperatur, des Drucks sowie über Turbulenzen innerhalb jeder der kleinen Strukturen. Zudem erfordert die Polarimetrie Messzeiten, die oftmals die Lebensdauern der kleinräumigen Magnetstrukturen übersteigen.

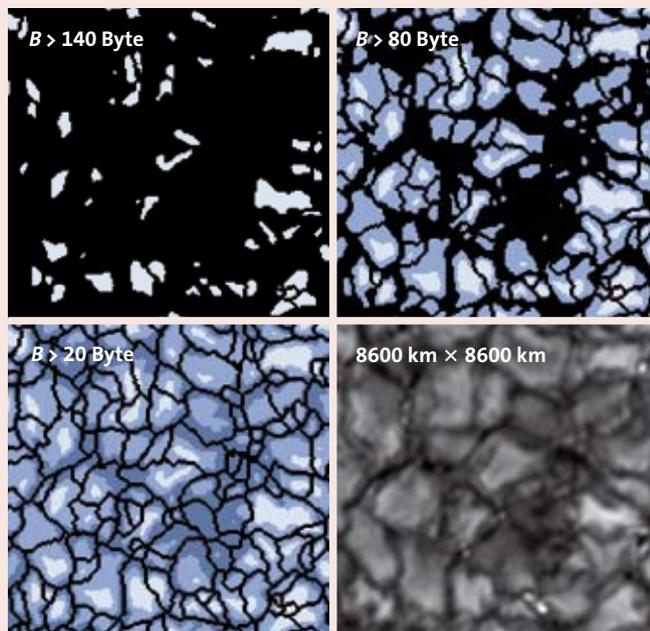
Diese Schwierigkeiten lassen sich weitgehend vermeiden, indem man hochauflösende Bilder im Licht des Kohlenwasserstoffmoleküls CH bei 430 Nanometer, dem so genannten G-Band, und im Licht des ionisierten Kalziums nahe 395 Nanometer untersucht. In diesen Spektralbereichen leuchten die Magnetgebiete deutlich heller als ihre Umgebung. Sie lassen sich

durch schmalbandige Farbfilter aufnehmen, die hinreichend kleine Belichtungszeiten ermöglichen. Derart kurz belichtete Aufnahmen lassen sich mit Hilfe moderner Bildrekonstruktionsverfahren nachträglich vom Einfluss des Luftflimmerns der Erdatmosphäre befreien, womit schließlich Bilder von sehr hoher räumlicher Auflösung zur Verfügung stehen.

Mustererkennung mit dem Algorithmus MLT_4

Helligkeitsstrukturen in Sonnenbildern lassen sich mit einer Software automatisch erkennen. Das »Multiple Level Tracking« (MLT) verwendet eine Folge abnehmender Schwellenwerte für die Graustufen des Bildes. Die Pixel werden anhand ihrer Helligkeit schrittweise vom Höchstwert bis nahe Null erfasst. Mit jeder niedrigeren Helligkeitsschwelle kommen Pixel hinzu, die entweder die bereits erkannten Muster vergrößern oder neue Muster hinzufügen (siehe auch SuW 4/2004, S. 22–24). Diese Vorgehensweise stößt jedoch auf zwei Schwierigkeiten:

- Getrennt auftretende Helligkeitsspitzen innerhalb einer ausgedehnten Struktur erkennt das Programm unabhängig voneinander, deshalb zerlegt es die Struktur in zu viele Teile.
- Endet die Folge abnehmender Schwellenwerte bei jener Helligkeitsstufe, welche die erkannten Muster in passender Größe wiedergibt, dann werden lichtschwächere Strukturen nicht erkannt.



Die Bilder unten geben dazu ein Beispiel. Das originale Graustufenbild erfasst einen 8600 × 8600 Kilometer großen Ausschnitt der Sonnenoberfläche, die blau eingefärbten Bilder zeigen die Ergebnisse für unterschiedliche Helligkeitsstufen.

Für das Originalbild betrachten wir nun die mehrstufige Mustererkennung (MLT) mit zwanzig Schwellenwerten im Abstand von zehn Byte. Die drei blau eingefärbten Bilder zeigen die stufenweise erkannten (Teil-)Muster für Mindesthelligkeiten B von 140, 80 und 20 Byte. Pixel, die zu den bereits erkannten Mustern neu hinzukommen, sind farblich unterschieden.

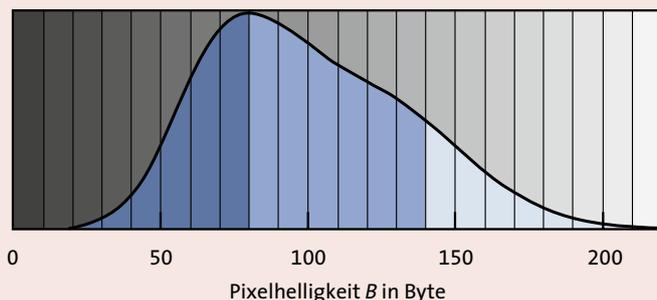
Das Diagramm unten gibt die Häufigkeitsverteilung der Graustufen wieder. Die Gesamtfläche unter der Kurve entspricht der Gesamtmenge aller Pixel. Die vertikalen Linien entsprechen den zwanzig Schwellenwerten im Abstand von zehn Byte. Die kritische Helligkeitsstufe, unterhalb derer lichtschwächere Strukturen nicht mehr erkannt werden, liegt bei 80 Byte.

Der neue Algorithmus MLT_4 löst die genannten Schwierigkeiten in vier Phasen, von denen die erste mit dem herkömmlichen Verfahren von MLT beginnt. Die rechts dargestellten Bilder a bis h bezeichnen das Vorgehen schrittweise.

(1) Zerlegung: Die Helligkeitsstrukturen im Originalbild (a) werden anhand ihrer Graustufenwerte von 0 bis 255 Byte in 15 bis 25 Helligkeitsstufen schrittweise als Muster erkannt. Bei einer Helligkeit nahe Null wird dann ein flächendeckendes Zellmuster erreicht, in dem jede Zelle eine örtliche Helligkeitsspitze enthält (Bild b).

(2) Normalisierung: Die Pixelhelligkeiten innerhalb jeder Zelle werden auf den jeweiligen Höchstwert normiert. So lassen sich die nachfolgenden Bearbeitungsschritte nun unabhängig von den ursprünglichen Helligkeitswerten ausführen. Auf diese Weise werden lichtschwache ebenso wie helle Strukturen behandelt und gleichermaßen sichtbar (Bild c).

(3) Verschmelzung: Zellen, die anfangs zu stark zerlegt wurden, sind nun wieder zusammenzufügen. Dazu verkleinert das Programm die hellkeitsnormierten Zellen (Bild c) auf Referenzmuster (Bild d), indem es alle Pixel mit Helligkeiten unterhalb eines vorgegebenen Schwellenwerts ausblendet. Eng benachbarte Muster, deren äußere Pixelkonturen (hellgraue Linien, d) eine geforderte Mindestanzahl von Pixeln gemeinsam haben, behandelt das Programm als zusammengehörig, indem es ihren zugehörigen Zellen eine gemeinsame Kennziffer zuweist und die Zellen auf diese Weise verschmilzt. Anhand zusätzlicher Kriterien lassen sich

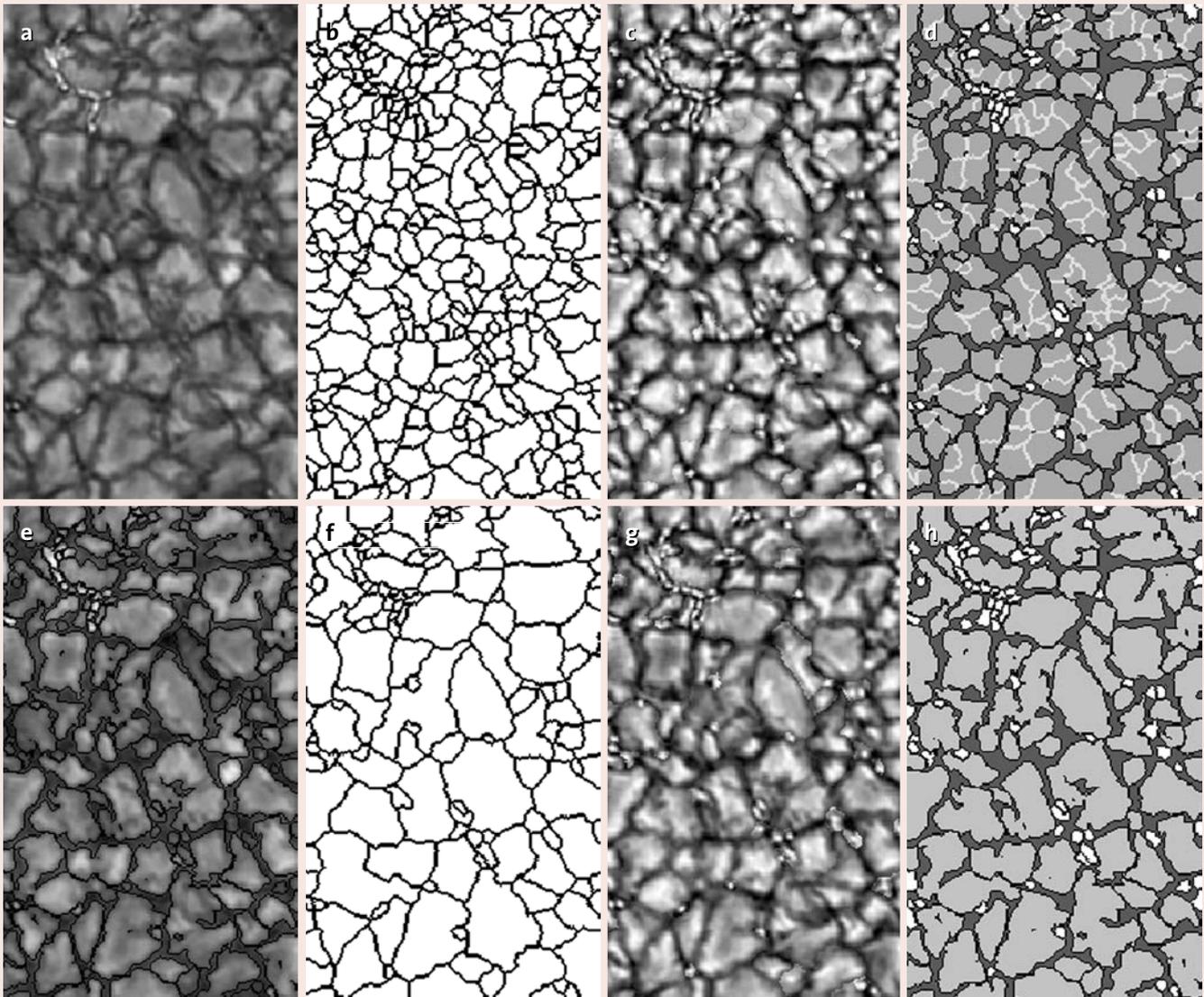


Um auf diesen Bildern eine hinreichend große Zahl kleinräumiger Magnetgebiete untersuchen zu können, ist ein Programm zur automatischen Mustererkennung unverzichtbar. Mit diesem Ziel entwickelten wir unseren erstmals in SuW 4/2004, S. 22 f., beschriebenen Algorithmus konsequent weiter, um jetzt auch lichtschwache Gebiete identifizieren zu

können (siehe Kasten unten). Die Helligkeitsschwellen zur Erkennung von Bildstrukturen müssen dafür bis nahe an das CCD-Rauschen reichen.

Diese Erweiterung führt unvermeidlich zu einer Überzerlegung von Strukturen, die mehrere lokale Helligkeitsmaxima zeigen, beispielsweise größere Granulen. Solche Artefakte lassen sich jedoch in

einem nachfolgenden Programmschritt wieder ausgleichen. Jedes erkannte Muster erhält eine individuelle Kennziffer, die jedes seiner Pixel ausweist. Damit lassen sich einmal segmentierte Strukturen in verschiedenen Aufnahmen wiederfinden und vergleichend untersuchen. Auf diese Weise konnten wir magnetische Gebiete identifizieren. Hierfür nutzten wir Bilder,



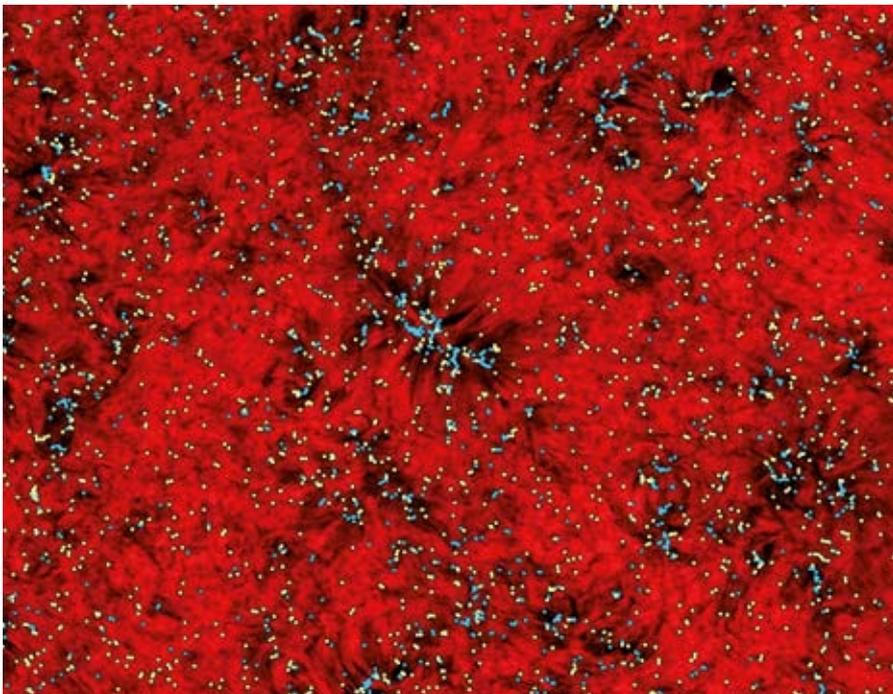
E. Wiehr/B. Bovelet

bestimmte Einzelstrukturen von der Verschmelzung ausschließen und bleiben so als Einzelmuster erhalten. Als Ergebnis entsteht ein überarbeitetes Zellmuster (Bild f), das sämtliche Helligkeitsstrukturen des Originalbilds abdeckt. Alle Zellpixel werden nun nochmals mit ihren ursprünglichen Graustufenwerten belegt und je Zelle auf ihren Höchstwert normiert (Bild g).

(4) Verkleinerung: Aus diesen helligkeitsnormierten Zellen (Bild g) lassen sich abschließend alle Muster in angemessener Größe darstellen (Bild h). Dazu werden jene Zellpixel ausgeblendet, deren normierte Helligkeit einen einheitlich festgelegten Schwellen-

wert unterschreitet. Die Übereinstimmung mit dem Originalbild lässt sich durch Überlagerung (Bild e) prüfen. Da die Pixel jedes Musters mit dessen individueller Kennziffer ausgewiesen sind, lassen sich für ausgewählte Muster verschiedene Parameter, beispielsweise ihre Größe und Helligkeit, untersuchen.

Die ausführlich kommentierte Software MLT_4 stellen wir Interessenten zur Verfügung. Sie können das Programm zusammen mit einem Benutzerhandbuch und den Bilddaten für eine erste Anwendung von unserer Website herunterladen (siehe Weblink am Schluss des Beitrags). Die Programme arbeiten wahlweise unter der Programmiersprache PV-WAVE oder IDL.



Das im H-Alpha-Licht aufgenommene Bild zeigt den 108 000 mal 85 000 Kilometer großen Ausschnitt aus der Mitte der Sonnenscheibe, der im Bild auf Seite 71 unten markiert ist. Die Aufnahme verdeutlicht die räumliche Verteilung der erkannten Magnetstrukturen. In den blauen Kreisen ist die G-Band-Helligkeit um mindestens zehn Prozent größer als die mittlere G-Band-Helligkeit der Photosphäre, in den gelb dargestellten Kreisen ist sie geringer.

die mit dem Dutch Open Telescope auf La Palma simultan im G-Band und im Kalziumlicht aufgenommen wurden.

Übertragen wir die Lage der in diesen Bildern identifizierten Gebiete in ein gleichfalls simultan aufgenommenes H-Alpha-Bild, so finden wir solche Magnetgebiete, die im G-Band mindestens zehn Prozent heller sind als die über die gesamte Sonnenscheibe hinweg gemittelte Helligkeit, an den Enden der dunklen H-Alpha-Fibrillen. Sie markieren die Ränder der Supergranulen. Da sich hier kleinräumige Magnetgebiete ansammeln, fallen diese offensichtlich mit unserer Auswahl jener Strukturen zusammen, die im Ca+H-Band und im G-Band hell hervortreten und die wir bei räumlich hoher Auflösung in großer Zahl segmentieren konnten. Erkannte Strukturen, die im G-Band weniger hell erscheinen, bevölkern auch die Zwischenräume der Fibrillen, sie liegen somit im Zellinnern. Diese Strukturen sind im Bild oben gelb dargestellt.

In dem ausgeprägten Aktivitätsminimum vom November 2007 finden wir in einem 108 000 mal 85 000 Kilometer großen Ausschnitt der Sonnenscheibenmitte, der im Bild auf Seite 71 unten markiert ist, rund 3000 solcher kleinräumigen Magnetgebiete. Rechnet man diese Zahl auf die gesamte Sonnenoberfläche hoch, so wäre diese von 660 000 solcher Magnetfelder bedeckt. Deren aufsummierter magnetischer Fluss von $4,1 \times 10^{23}$ Maxwell übersteigt den Gesamtfluss aller Sonnenflecken im Aktivitätsmaximum, jedoch

nicht den Beitrag aller Aktivitätsgebiete mit ihren ausgedehnten Fackelregionen.

Da manche der kleinräumigen Magnetgebiete in den Spektrallinien des Kohlenwasserstoffs und des einfach ionisierten Kalziums womöglich nicht hell genug erscheinen, könnte ihre wahre Anzahl noch größer sein. Schätzungen einer bis zu fünfmal höheren Anzahl würden auf mehr als drei Millionen solcher Gebiete, selbst im Aktivitätsminimum, hinweisen.

Möglichkeiten für Amateurastronomen

Die weitgehend automatisierte Mustererkennung in hoch aufgelösten Bildern dürfte für ambitionierte Amateursonnenbeobachter eine interessante Bereicherung ihres Arbeitsfelds bieten. Sie erlaubt die systematische Durchmusterung von CCD-Bildern und damit statistisch signifikante Aussagen über die Helligkeitsmuster solarer Strukturen. Die hierfür erforderlichen G-Band-Filter mit einer Breite von drei Nanometern und Kalziumfilter mit einer Breite von einem Nanometer dürften erschwinglich sein, beispielsweise bei der Firma Baader-Planetarium.

Unsere umfassende Erkennungssoftware samt Benutzerhandbuch und Bild-daten für eine erste Anwendung ist frei zugänglich (siehe Infokasten »Mustererkennung mit MLT_4« auf Seite 72f.). Sie lässt sich von unserer Website herunterladen und unter den Programmiersprachen IDL und PV-WAVE betreiben (siehe Weblink rechts).



EBERHARD WIEHR studierte Physik in Bonn und Göttingen und promovierte über eine neue Methode zur Messung solarer Magnetfelder. Bis zu seiner Pensionierung im Jahr 2004 war er akademischer Direktor im Institut für Astrophysik der Universität Göttingen.



BURKART BOVELET studierte in Göttingen Physik und ist seit 2001 freier Mitarbeiter am Institut für Astrophysik der Universität Göttingen.

Literaturhinweise

Bovelet, B., Wiehr, E.: The quiet Sun's magnetic flux estimated from Ca-II-H bright inter-granular G-band structures. *Astronomy & Astrophysics* 488, S. 1101–1107, 2008.

Bovelet, B., Wiehr, E.: Multiple-Scale Pattern Recognition applied to Faint Intergranular G-Band Structures. *Solar Physics*, 243 (2), S. 121–129, 2007.

Weblinks zum Thema:

www.astronomie-heute.de/artikel/1005873



DIE NORWEGISCHE KÜSTE zählt zu den wenigen Landschaften, in denen das magische Nordlicht (Aurora borealis) zu sehen ist. Da es kaum störende Lichtquellen gibt, lässt sich dieses himmlische Naturschauspiel hervorragend beobachten. Dabei legt Ihnen diese Reise den Himmel zu Füßen: mit spannenden, wissenschaftlichen Beiträgen versierter Lektoren, die Sie begeistern werden. Kommen Sie mit in Europas Norden, wo in den Wintermonaten ideale Bedingungen herrschen, um von den Farbenspielen des Nordlichts verzaubert zu werden.

LEISTUNGEN

- Linienflug nach Bergen und zurück von Trondheim
- Flughafen- und Sicherheitsgebühren
- Hurtigruten-Seereise Bergen – Kirkenes – Trondheim (10 Nächte) in der gebuchten Kabinenkategorie inkl. Vollpension an Bord
- Stadtrundfahrt in Bergen
- Transfers laut Reiseverlauf
- Begleitung durch einen fachkundigen Lektor
- Deutschsprachige Reiseleitung ab Bergen/bis Trondheim
- Ein DuMont-Reiseführer »Hurtigruten« pro Kabine

ZUSATZLEISTUNGEN

- Gemeinsames Betrachten von Polarlichtern an Deck mit Erklärungen und interessanten Hintergrundinformationen
- Orientierung am Himmel und Erklärungen zu sichtbaren Sternbildern und Planeten anhand drehbarer Sternkarte
- Lektorenvorträge an Bord

ab 1 785,-€ p. P.

DAS ERWARTET SIE

1. Tag: Hinreise/Bergen
2. Tag: Ålesund – Molde – Kristiansund
3. Tag: Trondheim
4. Tag: Lofoten
5. Tag: Vesterålen – Tromsø
6. Tag: Honningsvåg (Nordkap)
7. Tag: Kirkenes
8. Tag: Hammerfest
9. Tag: Vesterålen – Lofoten
10. Tag: Sieben Schwestern
11. Tag: Trondheim/Rückreise



TERMINE

15.02. – 25.02. 2010 | 06.10. – 16.10. 2010
09.03. – 19.03. 2010 | 01.11. – 11.11. 2010



Spektrum
DER WISSENSCHAFT

STERNE UND WELTRAUM

Diese Hurtigruten-Reise wird in Kooperation mit den Magazinen **Spektrum der Wissenschaft** und **Sterne und Weltraum** sowie **astronomie.de** – Deutschlands größter Internet-Community für Freunde der Astronomie – durchgeführt. Lektoren beider Partner werden Ihnen die Welt von »Nordlicht und Sterne« näherbringen.

Dr. Uwe Reichert, der Chefredakteur von **Sterne und Weltraum**, wird die Reise vom 06.10. bis 16.10. 2010 begleiten.

HABEN WIR SIE NEUGIERIG GEMACHT?

Fordern Sie noch heute Ihre ausführlichen Reiseunterlagen an:

TELEFON 06221 9126-743

FAX 06221 9126-751

E-MAIL service@spektrum.com

www.spektrum.de/leserreise