

# Elemente der modernen Sonnenforschung

von Ulrich v. Kusserow

*Das erfolgreiche Zusammenspiel von Theorie und Praxis, der Einsatz moderner Sonnentelkope, hochentwickelter Bildbearbeitungs-Techniken, erprobter Modellansätze und aufwendiger Simulationsrechnungen ermöglichen heute ein tieferes Verständnis faszinierender Phänomene des solaren magnetischen Aktivitätszyklus.*

## Notwendigkeit der Sonnenforschung

Die Sonne ist der Stern im Zentrum unseres Planetensystems, der die Entwicklung des Lebens auf der Erde entscheidend und unausweichlich bestimmt. Er schafft die Lebensbedingungen auf unserem Planeten, versorgt uns mit der erforderlichen Energie, ist Motor des irdischen Klimas [1]. Der von ihm im Sonnenwind und verstärkt in solaren Eruptionen ausgesandte magnetisierte Teilchenstrom sowie kurzwellige elektromagnetische Strahlung bestimmen das sich im interplanetaren Raum und in der Erdmagnetosphäre ereignende so genannte Weltraumwetter [2]. Wir Menschen sind fasziniert von Sonnenfinsternis und den während erdmagnetischer Stürme verstärkt auftretenden Polarlicht-Erscheinungen. Solche Phänomene erinnern uns an die existentielle Bedeutung solarer Prozesse. Die Sonne schützt uns durch den Aufbau einer weit in den Weltraum reichenden Heliosphäre vor lebensbedrohlicher hochenergetischer kosmischer Strahlung. Das durch sie im erdnahen Weltraum verursachte „stürmische Wetter“ bedroht im Zeitalter der Weltraumfahrt und der Entwicklung modernster Kommunikationstechniken andererseits aber nicht nur die Funktionstüchtigkeit von Satelliten, sondern auch das Leben von Astronauten. Nicht nur im Zusammenhang mit ehrgeizigen Zielen der bemannten Raumfahrt stellen sich viele Menschen, in der Fachdisziplin Astrobiologie zunehmend auch im-

mer mehr Wissenschaftler, ernsthaft die Frage nach den Konditionen für die Entwicklung von Leben im Universum [3].

Die uns so relativ nahe Sonne ist der einzige Stern, auf dem Oberflächen-Details räumlich hoch aufgelöst werden können. Der von ihr ausgestrahlte Strahlungsfluss ist stark genug, um die für viele Untersuchungen erforderliche hohe zeitliche und spektrale Auflösung zu erreichen. In modernen, auch im Weltall stationierten Sonnen-Observatorien werden heute durch den Einsatz beispielhaft hochentwickelter Technologien eine große Fülle von gefilterten Bildern, fotometrischen und spektroskopischen Daten gewonnen, deren Auswertung und Interpretation mit Hilfe leistungsfähiger Computer- und Modellierungs-Programme mehr denn je verlässliche Aussagen über die im Innern und in der Atmosphäre der Sonne ablaufenden, relevanten physikalischen Prozesse ermöglicht [4], [5]. Die Ergebnisse dieser speziellen Untersuchungen sind heute anerkannte Grundlage für die theoretische Deutung der überall im Universum, in anderen Sternen, in Galaxien und Galaxienhaufen auch des frühen Universums zu beobachtenden vielfältigen Phänomene.

Dem Studium der für die Sonnenphysik besonders relevanten Wechselwirkungsprozesse zwischen kosmischen Magnetfeldern und strömender Plasmamaterie kommt in diesem Zusammenhang eine besondere Bedeutung zu. Grundlegende Ergebnisse aus dem Plasma-Labor Sonne ermöglichen die Analyse vieler, in sonnenähnlichen

und magnetischen Sternen, in Scheiben-Jet-Systemen in jungen Sternen und um kompakte Himmelsobjekte wie Neutronensterne, Quasare und Schwarze Löcher zu beobachtender Phänomene. Sie sind zudem Grundlage erfolgversprechender Fortschritte im Bereich der energiepolitisch wichtigen Kernfusionsforschung. Die für die Untersuchung der Sonnen-Oszillationen entwickelten helioseismologischen Methoden zum Studium des Sonneninneren werden heute auch bei der Beobachtung anderer aktiver Sterne eingesetzt [6]. Ergebnisse der solaren Neutrinoforschung haben eine Veränderung des Standardmodells der Teilchenphysik erzwungen. Ineinander umwandelbare, unterschiedliche Neutrino-Arten haben nach neuesten Erkenntnissen eine geringe, aber unterschiedliche Masse, spielen aber offensichtlich eine für die im Zusammenhang mit der Entwicklung des gesamten Universums relevante Massenbilanz nur unwesentliche Rolle [7].

Moderne Sonnenforschung liefert beeindruckende, ästhetische Bilder von unserem Heimatstern, ermöglicht tiefe Einblicke in die Lebensgrundlagen der Menschheit, fordert von uns wachsendes Umweltbewusstsein. Ergebnisse dieser Forschung sind nicht nur Grundlage für das Verständnis astronomischer Prozesse allein. Als Nebeneffekt haben sie durch die Entwicklung und Erprobung hochentwickelter technischer Instrumente und Ergebnisse der Grundlagenforschung auch gesellschafts- und wirtschaftspolitische Relevanz.

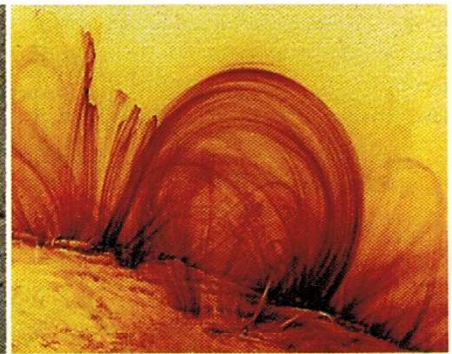
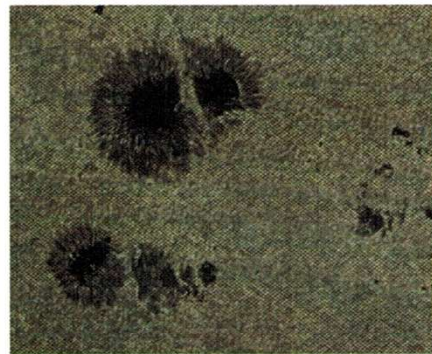
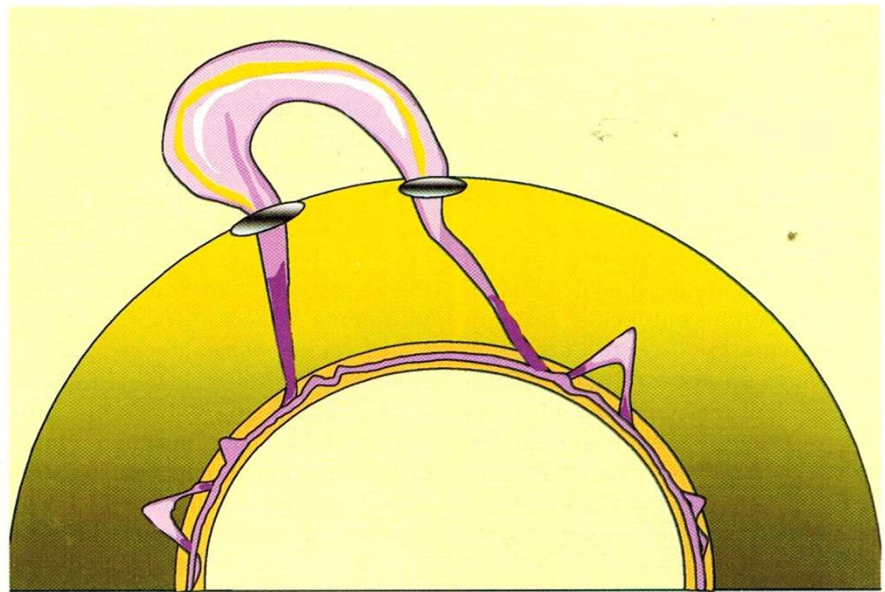
## Elemente der Sonnenforschung

Experimente und Theorien zur Erkenntnisgewinnung sind die zwei „Standbeine“ der klassischen Physik.



Die Tatsache, dass die Astrophysiker generell Phänomene in Himmelsobjekten nur aus der Ferne beobachten, kaum vor Ort Messungen, im Wesentlichen nur selten Überprüfungs-Experimente im Labor machen können, verändert schon Wesentliches im Ablauf des von ihnen gewählten physikalischen Erkenntnisgewinnungsprozesses. Basierend auf klassischen Theorien haben sie schon immer Modelle zur Interpretation der im Universum anzutreffenden, häufig sehr komplexen Situationen entwickelt. Einfache analytische Modelle lassen dabei geschlossene Lösungen zu, viele nichtlineare Prozesse erfordern aber die numerische Bearbeitung mit dem Computer. Präzises Beobachten, Auswerten der Messdaten und grobe Modellierungen reichen nicht mehr aus. Als drittes „Standbein“ der modernen Physik spielt das numerische Experimentieren auch bei der Analyse solarer Prozesse eine zunehmend wichtigere Rolle. Wenn in komplexen Zusammenhängen mehrere Kräfte als mögliche Einflussfaktoren konkurrieren, der tatsächliche Umfang ihres jeweiligen Einflusses unklar ist, ermöglicht erst ein Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Simulationsrechnungen mit den Beobachtungsdaten die Entscheidung über die wirklich relevanten physikalischen Faktoren für die Interpretation der beobachteten Phänomene.

Mit den vom Weltall aus in unterschiedlichen Wellenlängen die Sonne beobachtenden Teleskopen lassen sich, bei Nichtvorhandensein gravierender Fehler in der Teleskop-Optik, Bilder mit nahezu allein beugungsbegrenzter, zum Durchmesser der Primäroptik proportionaler Auflösung gewinnen. Für die unter optimalen Bedingungen, in großer Höhe oberhalb der Wolken-Inversions-Schicht, im Passatwind-Bereich in Meeresnähe arbeitenden bodengestützten Sonnentelkope müssen zusätzlich wesentliche Vorkehrungen zur Reduzierung der durch Luftunruhe und Verformung der Teleskop-Optik bedingten Abbildungsfehler getroffen werden. Der Einfluss der Aufheizung des Erdbodens auf die Bildqualität lässt sich durch den Weiß-Anstrich wichtiger Gebäude- und Geräte-Teile, durch Positionierung der Teleskope auf höhere Türme vermindern. Seeing-bedingte



1 Feinstrukturen einer Sonnenfleckengruppe im sichtbaren Wellenlängenbereich (DOT – Dutch Open Telescope 2002), Bogenstrukturen einer Fleckengruppe im ultravioletten Licht (TRACE – Transit Region and Coronal Explorer 1999) und Modellbild zur Entstehung einer bipolaren Fleckengruppe (U. v. Kusserow 2000)

Verringerungen der Bildgüte, lokale Defokussierungen, Bildelement-Verschiebungen und -Verformungen durch Bewegungen der Luftschlieren werden in modernen Sonnentelkopen durch die so genannte adaptive Optik korrigiert. Die Störung der ankommenden Wellenfront wird in einem so genannten Correlation Tracker in einzelnen Punkten gemessen, durch Ausrichtung der durch geeignete Signale angesteuerten, kippbar segmentierten oder verformbaren aktiven Spiegel im Strahlengang effektiv verringert. Innerhalb des Teleskops entstehende Abbildungsfehler lassen sich durch Einschluss der Teleskop-Optik in einen Vakuum- oder mit dünner Helium-Atmosphäre gefüllten Tank, nach neuesten Erkenntnissen sehr viel besser noch durch Verwendung einer offenen Bauweise ohne Teleskop-Tubus, begrenzen.

Um die Chancen zur Gewinnung hochaufgelöster Bilder zu optimieren,

werden bei der Sonnenbeobachtung möglichst kurze Belichtungszeiten gewählt, entscheiden Seeing-Monitore durch Kontrastmessungen über den besten Zeitpunkt der Aufnahme, und speichern so genannte Frame-Selection-Prozeduren nach Vergleich der in kurzen Abständen nacheinander gewonnenen Bilder nur die besten Daten ab. Als wirkungsvolle Techniken zur effektiven Erhöhung der Bildqualität zumindest für einen kleineren Ausschnitt des Bildfeldes finden heute die als Speckle-Interferometrie sowie Phase-Diversity bezeichneten Methoden Anwendung. Die Auswertung fleckenartiger Interferenzmuster im Fourier-Raum kurzzeitig belichteter Aufnahmen beziehungsweise von Simultan-aufnahmen eines Objektes, beispielsweise einmal exakt fokussiert und einmal minimal defokussiert, liefern hierbei die zur Rekonstruktion der ungestörten Wellenfront notwendigen Daten.



## Die magnetische Sonne

Anfang des 17. Jahrhunderts beobachtete *Galileo Galilei* Sonnenflecken mit dem gerade erfundenen Teleskop. 1844 war es *Heinrich Schwabe*, der mit der im 11-jährigen Rhythmus schwankenden Sonnenfleckenhäufigkeit einen ersten entscheidenden Hinweis auf die Existenz eines globalen solaren Aktivitätszyklus entdeckte. 10 Jahre später bemerkte *Richard Carrington* schließlich sogar die Äquatorwanderung der Fleckenzonen im Laufe eines solchen Zyklus. Bis ins 19. Jahrhundert konnten Astronomen rötlich leuchtende Gaswolken im chromosphärischen Saum oberhalb der Mondscheibe, wimpelförmige Strukturen in der Sonnenkorona nur während einer der seltenen Sonnenfinsternisse beobachten. Erst 1930 entwickelte dann *Bernard Lyot* mit dem Koronographen das Gerät, mit dem man jederzeit auch

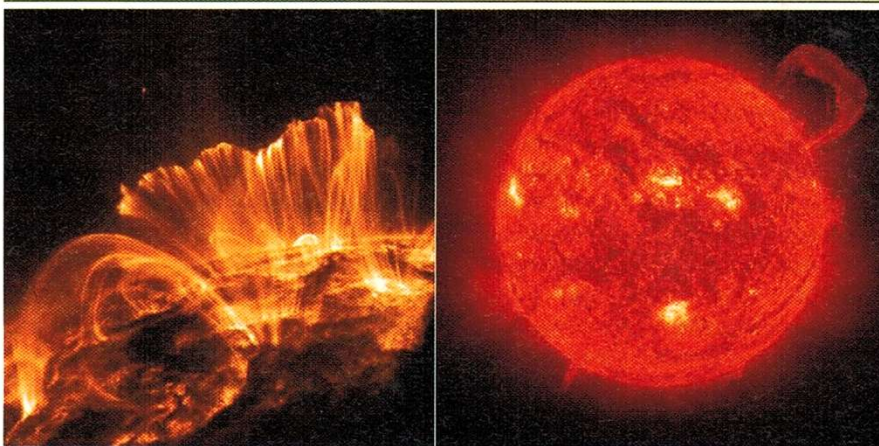
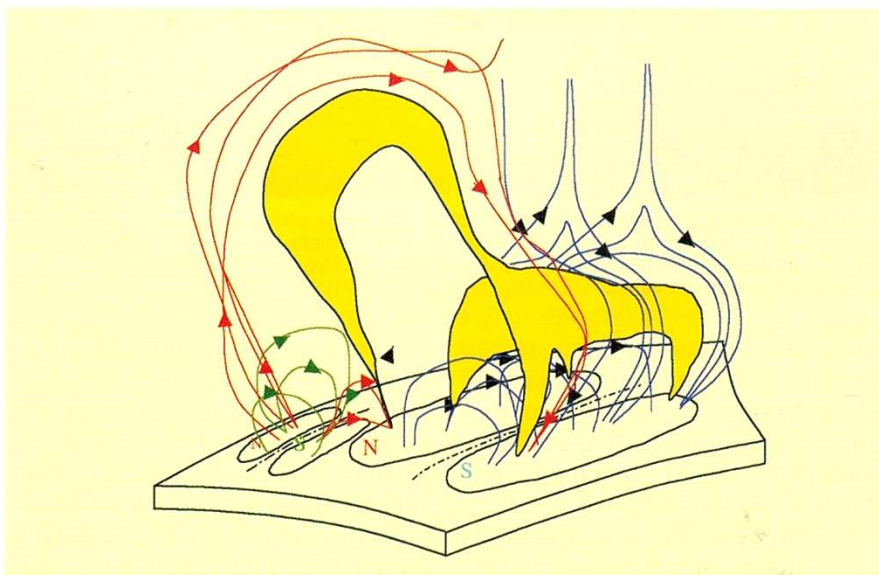
künstliche Sonnenfinsternisse erzeugen kann. Bereits 1844 hatte *Joseph Norman Lockyer* Protuberanzen bei normalem Tageslicht in einem Emissionsspektrum gesehen.

Der entscheidende Durchbruch in der Sonnenforschung gelang 1908 *George Ellery Hale*. Er wies starke solare Magnetfelder anhand der in Sonnenfleckengebieten gewonnenen Spektrogramme nach. Aufgrund des 1896 von *Pieter Zeeman* entdeckten Effekts spalten magnetisch empfindliche Spektrallinien im Wesentlichen proportional zur magnetischen Flussdichte in mehrere Komponenten unterschiedlich stark auf. Je nach Blickrichtung bezüglich des Magnetfeldes am Entstehungsort ist das Licht dieser Komponenten dabei zusätzlich unterschiedlich linear beziehungsweise zirkular polarisiert. Es war bekannt, dass Sonnenfleckengruppen meist paarweise auftreten, als *Hale* 1914 mit seinen

Messungen nachwies, dass vorangehende und nachfolgende Gebiete einer Fleckengruppe stets unterschiedliche magnetische Polarität aufwiesen, dass die Ausrichtung der magnetischen Dipole auf der Nord- beziehungsweise Südhalbkugel jeweils unterschiedlich ist. Zu einem späteren Zeitpunkt fand er heraus, dass sich die Polaritätsverhältnisse nach jeweils 11 Jahren wieder umkehren, dass der eigentliche solare Aktivitätszyklus bei Berücksichtigung magnetischer Prozesse in Wirklichkeit eine Periodendauer von 22 Jahren besitzt.

Spektakuläre Aufnahmen (Fotos und Videos) der Weltraum-Satelliten TRACE (<http://vestige.lmsal.com/TRACE/>) und SOHO (<http://sohowww.nascom.nasa.gov/>) veranschaulichen heute täglich in eindrucksvoller Weise den offensichtlich dominierenden Einfluss magnetischer Prozesse auf die vielfältigen, sich in der Sonnenatmosphäre teilweise besonders dynamisch entwickelnden Phänomene (Bilder 1, 2). Die im ultravioletten Licht sichtbaren koronalen Bögen über Fleckengebieten und die im Licht der  $H_{\alpha}$ -Linie des Wasserstoffs darstellbaren langlebigen Protuberanzenstrukturen verdanken ihre Existenz relativ stabilen solaren magnetischen Feldern. Die globale Aufheizung der Sonnenkorona auf kinetische Temperaturen der Teilchen von bis zu mehreren Millionen Grad, aufblitzende Flares, solare Eruptionen und koronale Massenauswürfe geben eindrucksvoll Zeugnis von einsetzenden Instabilitäten, von der Freisetzung gewaltiger Energiemengen sowie der Beschleunigung heißer Plasmamaterie. Die Erregung und Ausbreitung magneto-hydrodynamischer Wellen sowie Topologieänderungen der magnetischen Feldstrukturen durch lokale magnetische Rekonnexion sind heute als wesentliche Verursacher dieser dynamischen Entwicklungen erkannt.

Mit Hilfe des Zeeman-Effektes, anhand der Stärke der Aufspaltung magnetisch empfindlicher Spektrallinien in mehrere, je nach Blickrichtung relativ zum Magnetfeld unterschiedlich polarisierte Komponenten können heute solare magnetische Flussdichten von mehr als 0,1 Tesla direkt ermittelt werden (Bild 3). Magnetogramme, in denen die magnetische Nord-Süd-Polaritätsverteilung größerer Gebiete durch unterschiedliche Farbgebung

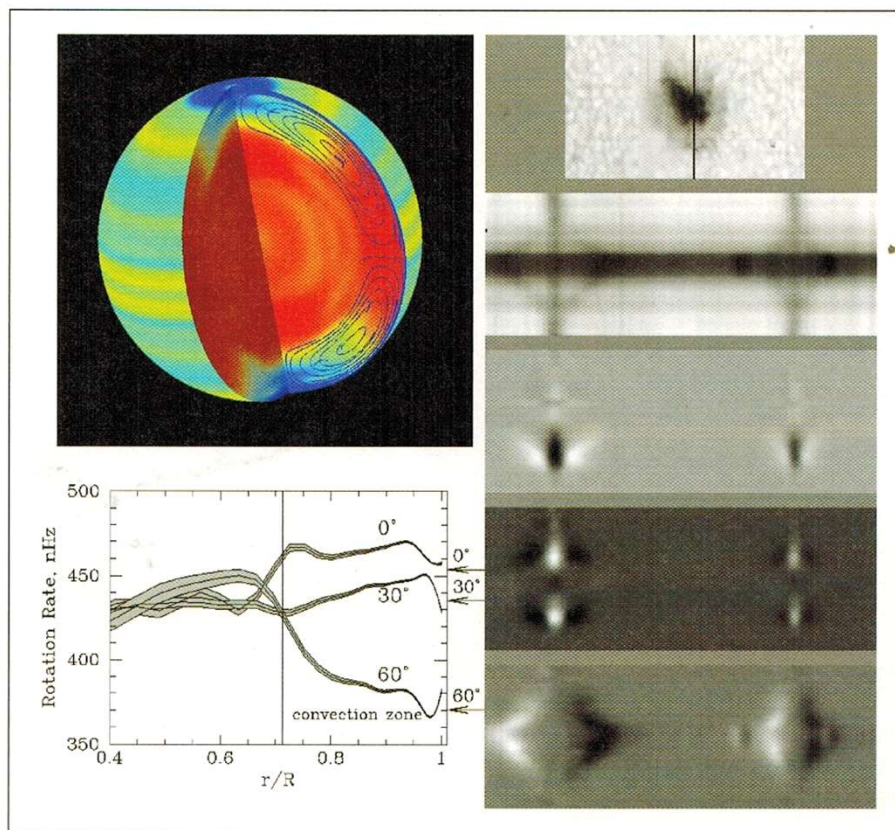


2 Protuberanzen und koronale Massenauswürfe (Extrem Ultraviolet Imaging Telescope (EIT) des SOHO – Solar and Heliospheric Observatory) im ultravioletten Licht sowie Modellbild zur Auslösung solarer Eruptionen (U. v. Kusserow 2000)



dargestellt ist, werden täglich anhand von Messungen der Stärke und Orientierung der in Richtung zum Beobachter weisenden Magnetfeldkomponente erstellt. Die mit hochentwickelten Polarimetern durchgeführten Messungen so genannter Stokes-Parameter, deren Werte den Polarisationszustand der von der Sonne ausgesandten Strahlung vollständig charakterisieren, ermöglichen heute die modellhafte Rekonstruktion der Verteilung magnetischer Feldvektoren größerer Fleckengebiete. Die Ermittlung der in Protuberanzen um mehr als einen Faktor 10 schwächeren Magnetfeldstärken erfordert dagegen die Anwendung des erstmals 1924 von *Hanle* im Labor demonstrierten Effekts, wonach Magnetfelder die Stärke und Ausrichtung der linearen Polarisation des an Teilchen gestreuten Lichts verringern beziehungsweise verändern können. Erst seit wenigen Jahren ermöglicht die Untersuchung des Einflusses solarer magnetischer Felder auf die Form einzelner Linien im so genannten „zweiten Sonnenspektrum“, in dem der Polarisationsgrad des gestreuten, linear polarisierten Sonnenlichtes in Abhängigkeit von der Wellenlänge dargestellt ist, die Ermittlung magnetischer Flussdichten auch unterhalb von 0,01 Tesla.

Die aktuelle Sonnenforschung möchte durch den Einsatz moderner Großteleskope, hochentwickelter Post-Fokus-Instrumente und Bildbearbeitungstechniken, durch umfangreiche Messkampagnen, Entwicklung neuer Modellansätze und Modellierungstechniken, durch den Einsatz leistungsfähiger Computer auch für Simulationsrechnungen zentrale Fragestellungen beantworten, bei denen in der Regel magnetische Prozesse eine besonders wichtige Rolle spielen [8]. Wie lässt sich die Entstehung solarer Magnetfelder in einem selbsterregten Dynamoprozess überhaupt erklären? Wie sehen die Rückkopplungsprozesse zwischen Materieströmungen und Magnetfeldern im Sonneninneren im Zusammenspiel mit Strahlungs- und Beschleunigungsprozessen in der Sonnenatmosphäre aus, die die beobachtbaren Strukturen und Entwicklungen von Sonnenfleckengruppen und Protuberanzen unterschiedlichster Art bewirken? Welche magnetohydrodynamischen Prozesse bewirken die Auf-



3 Darstellung meridionaler Strömungsstrukturen und differentieller Rotations-Profile im Sonneninneren als Ergebnis helioseismologischer Untersuchungen mit dem Michelson Doppler Imager (MDI) auf SOHO (links); Messung der Stokes-Parameter-Profile durch Umbra und Penumbra eines Sonnenflecks mit Hilfe des Infrarot-Polarimeters im Vakuum-Turm-Teleskop (VTT) auf Teneriffa (*Horst Balthasar*, Potsdam) (rechts)

heizung der Korona, die Beschleunigung hochenergetischer Teilchen, treiben den Sonnenwind, führen zum Auswurf magnetisierter Plasmawolken in die das Sonnensystem einhüllende Heliosphäre?

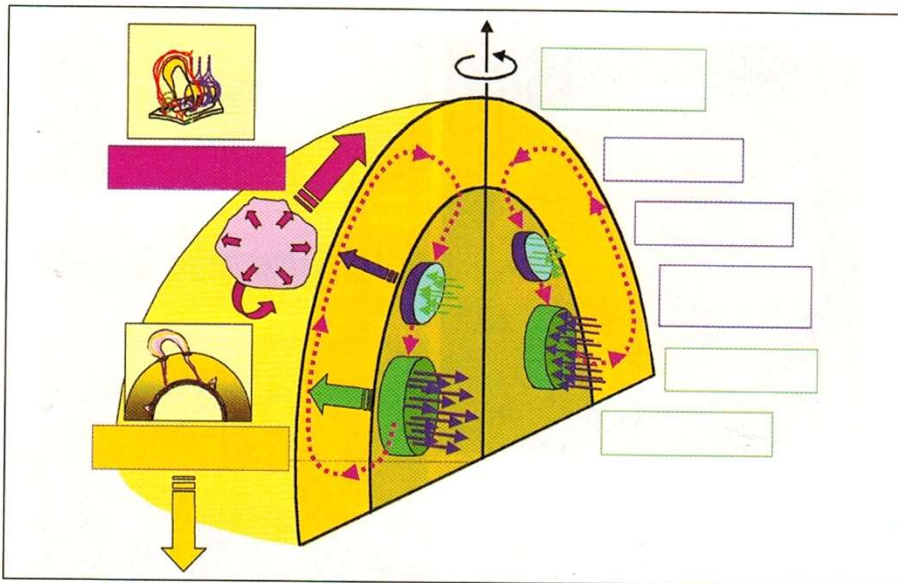
### Theorien zum solaren Aktivitätszyklus

Eine erfolgreiche Theorie des periodischen Sonnenzyklus muss die magnetisch „gesteuerte“, periodische Entwicklung der Sonnenfleck- und Protuberanzen-Strukturen mit Hilfe von Dynamo-Szenarien zur Regeneration magnetischer Felder sowie die Dynamik solarer Eruptionen und die Freisetzung magnetischer Energien durch Rekonnexionsprozesse konsistent erklären. Messungen der Sonnen-Oszillationen und die physikalische Interpretation gewonnener Daten im Rahmen moderner helioseismologischer Untersuchungen (Bild 3, [5]) haben in den letzten Jahren die Kenntnis über die Strömungsstrukturen des Plasmas im Sonneninneren entscheidend verbessert, erfordern offensichtlich ein-

schneidende Veränderungen bei der Modellierung insbesondere des Dynamo-Prozesses. (Übersichtsartikel von *Dibyendu Nandy* <http://solar.physics.montana.edu/~nandi/papers/nandy03b.pdf>).

In kinetische Energie in Form von turbulenten und konvektiven Strömungsstrukturen umgewandelte Fusionsenergie treibt in der rotierenden, mit elektrisch sehr gut leitender Plasmamaterie „gefüllten“ Sonne die durch magnetische Induktion vermittelte Erzeugung magnetischer Feldstrukturen nach dem Prinzip des selbsterregten Dynamos. Nach einer einfachen Modellvorstellung werden so genannte poloidale, dipolartige magnetische Feldstrukturen durch insbesondere radiale Gradienten in der solaren Winkelgeschwindigkeit aufgewickelt, in so genannte toroidale, azimuthal verlaufende Feldstrukturen umgewandelt und in der Grenzschicht zwischen turbulenter Konvektionszone und stabil geschichteter Strahlungszone gespeichert (Bild 1, [1]). Der Entstehungsprozess der Sonnenflecken durch Aufstieg und Durchbruch insta-





4 Modellbild zur Veranschaulichung eines möglichen Dynamo-Szenarios zur Erzeugung magnetischer Feldstrukturen im Sonneninneren; zyklische Umwandlung und Transport der magnetischen Feldkomponenten, Wanderung der Fleckenzonen und Filamentkanäle im Verlaufe des solaren Aktivitätszyklus (U. v. Kusserow 2003)

bil gewordener toroidaler magnetischer Flussröhren durch die Sonnenoberfläche wird durch die neuen Erkenntnisse über das detaillierte Profil der differentiellen Rotation der Sonne nicht grundsätzlich in Frage gestellt. Für den Prozess der zur Erklärung des Sonnenzyklus erforderlichen Rückführung toroidaler Feldkomponenten in poloidale Feldkomponenten bieten sich nach Entdeckung meridionaler, mit der beobachteten Polwärtswanderung poloidaler Protuberanzenstrukturen konsistenter Materiestromungsmuster aber Abwandlungen der bisher favorisierten Modellvorstellungen an ([5], Bild 4).

Corioliskräfte und Konvektionsbewegungen in der äußeren Konvektionszone sowie Rekonnexions- und Scherungsprozesse in der Sonnenatmosphäre könnten die auch in höheren heliographischen Breiten mit abweichender magnetischer Polarität aufsteigenden schwächeren Feldstrukturen hierzu in gewünschter Weise verdrehen. An der Sonnenoberfläche polwärts gerichtete meridionale Strömungen, Scherungsprozesse auf Grund breitenabhängiger differentieller Rotation und durch supergranulare Strömungsmuster vermittelte Diffusion könnten im Zusammenspiel mit dem globalen polaren Magnetfeld der Sonne die Entstehung, Verformung und Wanderung der die solaren Gaswolken stützenden magnetischen Filamentkanäle verständlich machen. Rekonne-

xionsprozesse erklären die Freisetzung der bei diesen Prozessen in den magnetischen Feldstrukturen gespeicherten Energie (Übersichtsartikel von Gunnar Hornig [http://www.ruhr-unibochum.de/rubin/rbin2\\_01/natur/Beitrag1/index.html](http://www.ruhr-unibochum.de/rubin/rbin2_01/natur/Beitrag1/index.html)).

Während im stetigen Sonnenwind und in dynamischen solaren Eruptionen (Bild 2) magnetischer Fluss in den interplanetaren Raum abtransportiert wird, sinken zurückbleibende, auf Grund der hohen elektrischen Leitfähigkeit in die meridionalen Strömungsmuster eingefrorene poloidale Feldanteile wieder in die als Tachokline bezeichnete Grenzschicht ab. Die nach neuesten Erkenntnissen in Polnähe besonders stark ausgeprägte differentielle Rotation erzeugt hier in großer Tiefe wieder toroidale Flussröhren, jetzt mit veränderter magnetischer Polarität. Die im Verlaufe des Sonnenzyklus in der meridionalen Strömung schon näher zum Äquator gewanderten Flussröhren werden instabil, durchlaufen, durch magnetischen Auftrieb und konvektive Strömungsmuster vermittelt, innerhalb einiger Wochen die Konvektionszone und erzeugen zunehmend näher am Äquator die beobachtbaren Fleckenstrukturen.

### Zukunft der Sonnenforschung

Das deutsche Vakuum-Turm-Teleskop (VTT), das Gregory-Coudé-Teleskop

(GCT) und das auf Messung der magnetischen Flussdichte spezialisierte französische Sonnenteliskop THEMIS im Observatorio Izaña auf Teneriffa sowie das New Swedish Solar Tower Telescope (NSST) und das Dutch Open Telescope (DOT) im Observatorio Roque de los Muchachos auf La Palma waren die Sonnenteliskope, die die großen Fortschritte bei den Sonnenbeobachtungen vom Erdboden aus im letzten Jahrzehnt in Europa bewirkt haben. Unter optimalen Seeing-Bedingungen können heute durch den Einsatz adaptiver Optik teilweise Bilder und Videosequenzen von nahezu allein beugungsbegrenzter Schärfe gewonnen werden.

Zur weiteren Verbesserung des räumlichen und zeitlichen, für die Messung des magnetischen Feldvektors vor allem auch des spektralen Auflösungsvermögens hat die Planung und Umsetzung des Baus noch leistungsfähigerer Sonnenteliskope überall auf der Welt begonnen. So werden für das GREGOR-Teleskop (1,5 m) als Nachfolger des GTC, für das neue Teleskop NST (New Solar Telescope, 1,6 m) im Big Bear Solar Observatory in den USA sowie für das holländische DOT (1,4 m) deutlich größere Durchmesser der Primäroptik gewählt, werden leistungsfähigere Post-Fokus-Instrumente und neue Beobachtungstechniken entwickelt. DOT leistet mit der Erprobung seiner offenen Bauweise heute schon wertvolle Pionierarbeit für das in Planung stehende amerikanische 4 m Advanced Technology Solar Telescope (ATST) (Bild 5). Mit der Optik dieses Teleskops, das die minimale Größe einer auf der Sonne gerade noch auflösbaren Struktur von heute etwa 100 km auf weniger als 50 km herabsetzt, hoffen die Sonnenforscher, endlich wesentliche magnetische Prozesse im Detail verfolgen, interpretieren und schließlich verlässlich modellieren zu können.

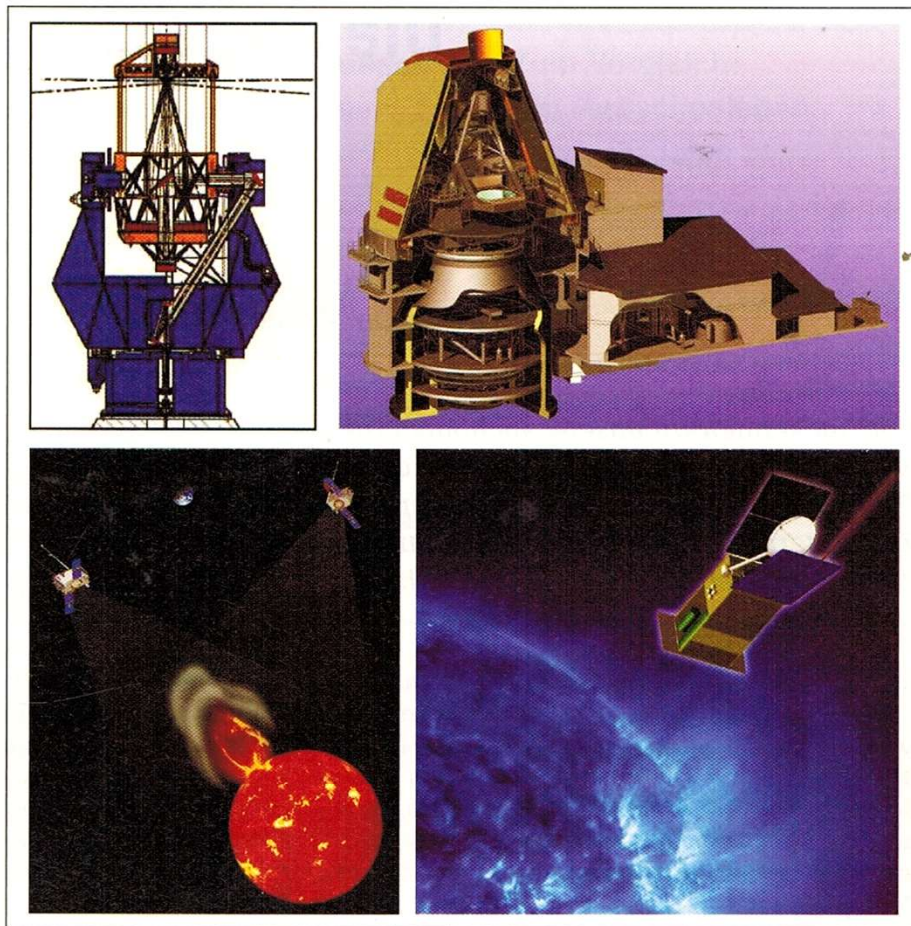
Der bereits abgeschaltete japanische Röntgensatellit Yohkoh, der den Sonnenwind und Magnetfeldstärken auf polnaher Umlaufbahn um die Sonne vermessende Satellit Ulysses und vor allem die so erfolgreich arbeitenden Sonnensatelliten SOHO und TRACE haben durch ihre Stationierung im Weltall ungestörte und kontinuierliche Beobachtungsmöglichkeiten auch in höherenergetischen Spektralbereichen



(UV- und Röntgenbereich) geschaffen, die für viele Bereiche der Sonnenforschung von großer Bedeutung sind.

Für das folgende Jahrzehnt ist die Verwirklichung einer großen Fülle weiterer ehrgeiziger Satelliten-Projekte geplant. Mit seinem Röntgenteleskop, einem optischen 0,5 m Spiegelteleskop sowie einem im extremen Ultraviolett-Bereich arbeitenden Imaging Spektrometer wird Solar-B als würdiger Nachfolger von Yohkoh in etwa zwei Jahren auch Arbeiten des zur Zeit im Röntgen- und Gammastrahlen-Bereich arbeitenden kleinen Satelliten RHESSI (Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager) übernehmen. Im gleichen Jahr soll auch die STEREO-Mission (Solar-Terrestrial-Relations Observatory) starten (Bild 5), bei der zwei baugleiche Teleskope, die die Entwicklung koronaler Massenauswürfe zeitgleich aus unterschiedlichen Richtungen beobachten, unter anderem wertvolle Hinweise für die Vorhersage des Weltraumwetters geben können. Das von einem Ballon in der Stratosphäre aus die Sonne im sichtbaren und ultravioletten Bereich beobachtende 1 m-Sunrise-Teleskop wird von 2006 an vor allem auch spektro-polarimetrische Messungen magnetischer Strukturen in der Chromosphäre durchführen. Für 2007 ist mit dem Solar Dynamic Observatory (SDO) der Start des ersten Satelliten im Rahmen des NASA-Projekts „Living With a Star“ geplant. Solar Probe und Solar Orbiter (Bild 5) sind schließlich zwei Missionen, die der Sonne auf ihren Bahnen bis auf 3 beziehungsweise 40 Sonnenradien Entfernung nahe kommen sollen. Solar Probe wird nach diesen Planungen 2010 die Atmosphäre der Sonne nahe einem Aktivitätsmaximum, 2015 vor einem Aktivitätsminimum durchlaufen und dabei insbesondere wertvolle Erkenntnisse über die Aufheizung der Sonnenatmosphäre und der Beschleunigung des Sonnenwindes liefern. Mehrere kleinere Satelliten-Projekte sollen in den nächsten Jahren für die Entwicklung des Erdklimas relevante Daten über die Variabilität der Sonnenausstrahlung in unterschiedlichen Frequenzbereichen sammeln.

In den nächsten Jahren wird die Schnelligkeit der Prozessoren, die Zunahme der Speicherkapazitäten, die Leistungsfähigkeit der Computer ins-



5 Veranschaulichung des Aufbaus, der Arbeitsmethoden und Aufgabenbereiche zukünftiger Sonnentelkope; GREGOR und das Advanced Technology Solar Telescope (ATST) in der oberen Reihe, STEREO und Solar Orbiter (untere Reihe)

gesamt, zum Segen auch der Sonnenphysik weiter ansteigen. Untersuchungen gezielter Fragestellungen anhand differenziert entwickelter Modell-Ansätze und verfeinerter Modellierungstechniken sowie ein ständiger Vergleich der Ergebnisse von Simulationsrechnungen mit den gesicherten Beobachtungsdaten sollten es möglich machen, ein konsistentes globales Modell für den Ablauf der in der Regel nichtlinearen Prozesse im Sonneninnern und in der Sonnenatmosphäre zu entwickeln. Niemals werden die Sonnenforscher aber ganz zufrieden sein, immer werden auch einfache analytische Überlegungen weiterhelfen. Vielleicht können die Wissenschaftler dann doch endlich gegenüber der Öffentlichkeit ein vereinfachtes und befriedigendes Bild der Vorgänge in der Sonne zeichnen, erläutern, wie die Entwicklung der Sonnenflecken, Protuberanzen und solaren Eruptionen ihre natürliche Erklärung im Ablauf des solaren magnetischen Aktivitätszyklus findet, vielleicht sogar verlässliche Vorhersagen für das Weltraumwetter machen.

#### Literatur

- [1] Schmitt, D., Schüssler, M.: Klimaveränderungen – Treibhauseffekt oder Sonnenaktivität? In: *ASTRONOMIE + RAUMFAHRT im Unterricht 2002*, H. 5, S. 31–35
- [2] Schlegel, K.: Das Weltraumwetter und seine Auswirkungen. In: *ASTRONOMIE + RAUMFAHRT im Unterricht 2002*, H. 5, S. 15–18
- [3] Horneck, G., Baumstark-Khan, Chr. (Hrsg.): *Astrobiology, The Quest for the Conditions of Life*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2002
- [4] Lang, K. R.: *Sun, Earth and Sky*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 1995
- [5] Stix, M.: *The Sun, An Introduction*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2002
- [6] Strassmeier, K. G.: *Aktive Sterne, Laboratorien der solaren Astrophysik*. Springer-Verlag, Wien 1997
- [7] *Spektrum der Wissenschaft – Dossier 01/03: Vom Quant zum Kosmos*, Heidelberg 2003
- [8] Staude, J.: *Magnetfelder der Sonne*, in *ASTRONOMIE + RAUMFAHRT im Unterricht 2001*, H. 3, S. 16–19

Dipl.-Phys. Ulrich v. Kusserow  
Besselstraße 32–34  
D-28203 Bremen

