

# Perspektiven der Erforschung von Sonne und Heliosphäre in Deutschland



Herausgegeben von

**Prof. Dr. F. Kneer**, Universitäts-Sternwarte Göttingen  
Geismarlandstr. 11, 37083 Göttingen, [www.uni-sw.gwdg.de](http://www.uni-sw.gwdg.de)

**Prof. Dr. S. K. Solanki**, Max-Planck-Institut für Aeronomie  
Max-Planck-Str. 2, 37191 Katlenburg-Lindau, [www.linmpi.mpg.de](http://www.linmpi.mpg.de)

**Prof. Dr. K. G. Strassmeier**, Astrophysikalisches Institut Potsdam  
An der Sternwarte 16, 14482 Potsdam, [www.aip.de](http://www.aip.de)

**Prof. Dr. O. von der Lühe**, Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik  
Schöneckstr. 6, 79104 Freiburg i. Brsg., [www.kis.uni-freiburg.de](http://www.kis.uni-freiburg.de)

**Prof. Dr. R. F. Wimmer-Schweingruber**, Institut für Experimentelle und Angewandte Physik  
Universität Kiel, Olshausenstr. 40, 24098 Kiel, [www.ieap.uni-kiel.de/space](http://www.ieap.uni-kiel.de/space)

und der **Arbeitsgemeinschaft Extraterrestrische Forschung** der Deutschen Physikalischen  
Gesellschaft, Max-Planck-Str. 13, 37191 Katlenburg-Lindau, [www.aef-ev.de](http://www.aef-ev.de)

unter Mitarbeit von

Prof. Dr. M. Brüggem, School of Engineering and Science, International University Bremen

PD Dr. H. Fichtner, Institut für Theoretische Physik IV, Ruhr-Universität Bochum

Dr. H. Kunow, Institut für Experimentelle und Angewandte Physik, Universität Kiel

Prof. Dr. G. Mann, Astrophysikalisches Institut Potsdam

Prof. Dr. E. Marsch, Max-Planck-Institut für Aeronomie, Katlenburg-Lindau

Dr. K. Scherer, Institut für Astrophysik und Extraterrestrische Forschung, Universität Bonn

Dr. R. Schlichenmaier, Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik, Freiburg

Prof. Dr. M. Schüssler, Max-Planck-Institut für Aeronomie, Katlenburg-Lindau

Prof. Dr. R. Schwenn, Max-Planck-Institut für Aeronomie, Katlenburg-Lindau

Prof. Dr. J. Staude, Astrophysikalisches Institut Potsdam

Dr. J. Woch, Max-Planck-Institut für Aeronomie, Katlenburg-Lindau

ISBN 3-936586-19-5

Copernicus GmbH, Katlenburg-Lindau

Druck: Schaltdienst Lange, Berlin

Printed in Germany, 2003

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;  
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Eine elektronische Version dieser Schrift und weitere Informationen sind verfügbar unter  
<http://www.linmpi.mpg.de/publikationen/perspektiven>

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Hintergrund</b> .....	<b>3</b>
<b>2. Das System Sonne und Heliosphäre</b> .....	<b>5</b>
2.1 Das Sonneninnere .....	6
2.2 Photosphäre und Chromosphäre .....	7
2.3 Korona und Sonnenwind .....	7
2.4 Auswirkungen auf die Erde .....	9
2.5 Die Heliosphäre und das interstellare Medium.....	10
2.6 Vereinheitlichte Sicht .....	11
<b>3. Die Bedeutung der Erforschung von Sonne und Heliosphäre</b> .....	<b>12</b>
3.1 Beziehung zu anderen Forschungsgebieten.....	12
3.2 Die Verbindung zwischen Sonnen- und Sternphysik .....	13
3.3 Gesellschaftliche Bedeutung .....	14
<b>4. Forschungsschwerpunkte</b> .....	<b>16</b>
4.1 Helioseismologie: Blick ins Innere der Sonne.....	16
4.2 Stetiger Wandel: das komplexe Magnetfeld in der Photosphäre .....	17
4.3 Heiß und kalt zugleich: die dynamische Chromosphäre .....	19
4.4 Korona und Sonnenwind: kosmisches Labor für die Plasmaphysik.....	21
4.5 Wirkung auf die Erde: „Weltraumwetter“ und Erdklima .....	24
4.6 Die Heliosphäre: Schutzschild gegen das interstellare Medium.....	25
4.7 Sonne und Heliosphäre als gekoppeltes System.....	26
4.8 Das Zusammenspiel von Experiment und Theorie.....	27
<b>5. Forschungsziele und Projekte</b> .....	<b>28</b>
5.1 Das Innere der Sonne: Konvektion, Rotation, Dynamo .....	28
5.2 Magnetische Struktur und Dynamik der Atmosphäre .....	28
5.3 Sonne und Heliosphäre als gekoppeltes System.....	30
5.4 Weltraumwetter und solar-terrestrische Beziehungen .....	31
5.5 Die Heliosphäre als Labor für die Untersuchung energiereicher Teilchen.....	32
5.6 Die Sonne als ein Stern von vielen .....	33
5.7 Perspektiven für die fernere Zukunft.....	33
5.8 Zusammenhang mit den wissenschaftlichen Fragen .....	35
<b>6. Perspektiven und Vorschläge</b> .....	<b>37</b>
6.1 Neue Projekte und Beteiligungen .....	37
6.2 Stärkung der universitären Forschung und Ausbildung .....	38
6.3 Etablierung des Forschungsgebietes Helioseismologie.....	39
<b>Anhang</b> .....	<b>41</b>
A1 Forschungsinstitute .....	41
A2 Kurzbeschreibung der Kerninstitute .....	41
A3 Die wichtigsten Observatorien.....	44
A4 Glossar .....	45



# Zusammenfassung

Sonnen- und Heliosphärenphysik ist ein vielfältiges Forschungsfeld, das sich im internationalen Rahmen dynamisch und expansiv entwickelt. Dies ist insbesondere auf die großen Erfolge einer Reihe von Weltraummissionen zurückzuführen, allen voran der SOHO-Mission mit starker deutscher Beteiligung. Die vorliegende Schrift stellt die mittelfristigen Perspektiven dar, die sich für dieses Gebiet in der deutschen Forschungslandschaft für die kommenden 15 Jahre abzeichnen. **Die in der Sonnen- und Heliosphärenphysik tätigen Wissenschaftler haben, aufbauend auf die erfolgreiche Tradition dieser Forschungsgebiete in Deutschland, in einem ausführlichen Diskussionsprozess gemeinsame Forschungsziele definiert und Prioritäten hinsichtlich der Projekte gesetzt, mit deren Hilfe diese Ziele erreicht werden sollen.**

Die Erforschung der Sonne und der sie umgebenden Heliosphäre hat weitreichende Bedeutung und Konsequenzen, die auch über den Rahmen der Grundlagenforschung hinausreichen. Die Sonne hat eine besondere Stellung innerhalb der Astrophysik, da sie der einzige Stern ist, bei dem man grundlegende Prozesse auf ihren charakteristischen Skalen räumlich und zeitlich aufgelöst untersuchen kann. Durch ihre Rolle als Energiequelle und durch ihre magnetische Aktivität, die sich auf die ganze Heliosphäre auswirkt, beeinflusst die Sonne die Erde und die anderen Planeten im Sonnensystem auf vielfältige Art und Weise. Dies betrifft insbesondere auch die menschliche Zivilisation, die in zunehmendem Maße von komplexen technischen Systemen abhängig ist: das durch die Sonnenaktivität hervorgerufene „Weltraumwetter“ kann zu Funktionsstörungen oder Ausfällen sowohl von satellitengestützten als auch von terrestrischen Systemen führen. Darüber hinaus verdichten sich die Hinweise, dass die Sonne eine wesentliche Rolle bei Veränderungen des Erdklimas auf Zeitskalen von Dekaden bis Jahrhunderten spielt. Die Sonnen- und Heliosphärenphysik liegt somit am Schnittpunkt von Forschungslinien der Astrophysik, der Physik des Sonnensystems und der Physik der Erde.

Die zentralen offenen wissenschaftlichen Fragen in der Sonnen- und Heliosphärenphysik reichen vom Ursprung der magnetischen Aktivität im Sonneninnern bis zur Auswirkung der veränderlichen Sonne und Heliosphäre auf die Erde. Der Schlüssel zu ihrer Beantwortung liegt beim Magnetfeld, das die verschiedenen Schichten vom Inneren der Sonne bis zum Rand der Heliosphäre miteinander verbindet. **Es besteht Einigkeit unter den beteiligten Wissenschaftlern, für die Beantwortung der zentralen Fragen und zur Erforschung der magnetischen Kopplung folgenden, aufeinander abgestimmten neuen Instrumenten und Projekten höchste Priorität zu geben:**

**Solar Orbiter:** Die kommende Sonnenmission der ESA, die zum ersten Mal die Pole der Sonne der direkten Beobachtung zugänglich machen wird und den Schlüssel zum Verständnis der magnetischen Kopplung von Sonne und Heliosphäre liefern soll. Der Start ist für 2010-2012 vorgesehen. Bei dieser Mission, die auf eine Initiative deutscher Wissenschaftler zurückgeht, wird eine führende Beteiligung bei den wichtigsten Instrumenten angestrebt.

**Sunrise:** Ein ballongetragenes Teleskop von 1 m Öffnung zur Beobachtung der Sonnenatmosphäre mit bisher unerreichter räumlicher Auflösung. Dieses internationale Projekt steht unter deutscher Führung und wird auch der Entwicklung von Technologie für Instrumentente auf der Mission *Solar Orbiter* dienen. Der Erstflug ist für 2006 geplant.

**ATST:** Das US-Projekt „Advanced Technology Solar Telescope“ ist ein bodengebundenes Teleskop von 4 m Öffnung, das ca. 2012 in Betrieb gehen wird. Eine Beteiligung an diesem Projekt ist geplant, um deutschen Sonnenphysikern den Zugang zum dann weltweit leistungsfähigsten bodengebundenen Instrument zu sichern.

**SDO:** Das „Solar Dynamics Observatory“ der NASA soll ab ca. 2007-2008 die Sonne über einen vollen Sonnenzyklus mit hoher Genauigkeit und bisher unerreichter Vollständigkeit beobachten und insbesondere auch Daten für die Erforschung des Sonneninneren mittels Helioseismologie liefern. Bei dieser Mission werden kleinere deutsche Beiträge zu den Schlüsselinstrumenten angestrebt.

**FASR:** Das „Frequency Agile Solar Radiotelescope“ ist ein vorwiegend US-amerikanisches Projekt mit dem Ziel, ab 2009 das Magnetfeld in der Sonnenkorona mit großer Genauigkeit zu vermessen. Eine deutsche Beteiligung ist im Bereich der Software für Datenauswertung und -analyse vorgesehen.

**Eddington:** Diese Mission der ESA (Start voraussichtlich 2008) wird unter anderem die innere Struktur von Sternen mittels helioseismologischer Methoden erforschen (Asteroseismologie). Es wird erwartet, dass dadurch das Verständnis von Sternaufbau und -entwicklung entscheidend erweitert und vertieft wird. Als hauptsächliche deutsche Beteiligung ist ein Datenzentrum geplant. **Das Projekt Eddington ist ein Beispiel für die wachsende wissenschaftliche Bedeutung der Verbindung zwischen Sonnen- und Sternphysik („solar-stellar connection“), der auch in Deutschland durch die Unterstützung entsprechender Forschungsaktivitäten verstärkt Rechnung getragen werden sollte.**

Diese neuen Projekte bilden gemeinsam mit laufenden Vorhaben wie **GREGOR** (bodengebundenes Sonnenteleskop von 1.5 m Öffnung) und **STEREO** (NASA-Mission zur Erforschung koronaler Massenauswürfe) ein abgestimmtes Konzept, um die Grundfragen der magnetischen Dynamik und Kopplung von Sonne und Heliosphäre erstmals im Zusammenhang zu erforschen.

Um den optimalen Nutzen aus den Investitionen in diese Projekte ziehen zu können und so die international gute Stellung der deutschen Forschung zu behaupten und auszubauen, bedarf es einer Verbesserung der Forschungs-Infrastruktur und der Nachwuchsförderung. **Sonnen- und Heliosphärenphysik ist an deutschen Universitäten (im Vergleich zur starken außeruniversitären Forschung oder zur Situation an den Hochschulen in anderen europäischen Ländern) viel zu wenig vertreten. Eine Stärkung dieser Forschungsrichtung an unseren Universitäten ist insbesondere auch im Hinblick auf die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses dringend erforderlich. Dabei sollten insbesondere die zukunftssträchtigen Bereiche Helio- und Asteroseismologie gefördert werden.**

Die Erforschung der Sonne und der sie umgebenden Heliosphäre liefert nicht nur Grundlagenwissen, das für weite Bereiche der Physik und insbesondere der Astrophysik von Bedeutung ist, sondern ist darüber hinaus notwendig für das Verständnis der Wirkung der veränderlichen Sonne auf unsere Umwelt und auf zentrale technische Systeme. Das hier dargelegte Forschungsprogramm soll deshalb die Stellung der deutschen Sonnen- und Heliosphärenforschung im internationalen Wettbewerb festigen und ausbauen und dabei Antworten auf Fragen liefern, die nicht nur von großer wissenschaftlicher, sondern auch von wesentlicher gesellschaftlicher Bedeutung sind.

# 1. Hintergrund

Die Sonne hat die Menschheit seit Anbeginn fasziniert. Davon zeugen Sonnenkulte und Mythen, frühe Versuche zur Vorhersage von Sonnenfinsternissen und Beobachtungen von Sonnenflecken mit bloßem Auge durch griechische und chinesische Astronomen in der Antike. Zur Zeit Galileis spielten Beobachtungen der Sonne eine wichtige Rolle bei der Begründung der modernen Naturwissenschaft. Nach unserem heutigen Wissen über den Aufbau der Sonne, ihre innere und äußere Dynamik, sowie über ihre Wirkung auf unseren Heimatplaneten rückt die Erforschung der Sonne in den Schnittpunkt von Forschungslinien der Astrophysik, der Physik des Sonnensystems und der Physik der Erde.

In der vorliegenden Schrift werden die mittelfristigen Perspektiven der Erforschung von Sonne und der sie umgebenden Heliosphäre im Rahmen der deutschen Forschungslandschaft aufgezeigt. Eine Darstellung dieser Art erscheint sowohl aus wissenschaftlicher wie auch aus wissenschaftspolitischer Hinsicht zum jetzigen Zeitpunkt angebracht. Einerseits haben die durch Weltraummissionen wie SOHO, Yohkoh, TRACE, Ulysses, RHESSI und an bodengebundenen Observatorien gewonnenen neuen Erkenntnisse im Zusammenspiel mit theoretischen Untersuchungen unser Verständnis der physikalischen Prozesse in Sonne und Heliosphäre deutlich vorangebracht, zur Entdeckung neuer Phänomene geführt und bisher verborgene Eigenschaften der Sonne offenbart. Aufgrund dieser Erkenntnisse können alte Fragen präzisiert und neue Probleme formuliert werden. Auf der anderen Seite hat sich in den letzten Jahren durch eine Reihe von Neuberufungen an Institute, in denen das Forschungsgebiet traditionell stark vertreten ist (Astrophysikalisches Institut Potsdam, Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik, Max-Planck-Institut für Aeronomie und Institut für Experimentelle und Angewandte Physik der Universität Kiel) eine Neuausrichtung der Arbeitsgebiete ergeben, so dass es sinnvoll und notwendig erscheint, die mittelfristigen Ziele und die gemeinsame Strategie für die Erforschung von Sonne und Heliosphäre zu formulieren und darzustellen.

Die kürzlich erstellte DFG-Denkschrift zur Astronomie deckt nur einen geringen Teil der in der vorliegenden Schrift behandelten Themen ab. Dies liegt an der besonderen Stellung der Sonnenforschung. Die Sonne ist einerseits Gegenstand der Astrophysik, insoweit sie als „normaler“ Stern zu betrachten ist; andererseits aber ist die Sonne für uns ein ganz besonderer Stern, denn sie beeinflusst die Erde und das ganze Sonnensystem auf vielfältige Art und Weise. Dadurch ergeben sich besonders enge Verbindungen zwischen der Sonnenphysik und der Physik der Heliosphäre, aber auch der Geophysik im weiteren Sinne und der Planetenforschung.

Die vorliegende Schrift ist folgendermaßen aufgebaut: zunächst werden die wesentlichen Eigenschaften des Systems Sonne/Heliosphäre skizziert (Kapitel 2), die Beziehungen zu anderen Forschungsbereichen diskutiert (Kapitel 3) und die zentralen Forschungsthemen und wissenschaftlichen Fragen dargestellt (Kapitel 4). Darauf aufbauend werden die Forschungsziele für die nächsten 15 Jahre beschrieben und die im jeweiligen Zusammenhang stehenden Projekte vorgestellt (Kapitel 5). Im abschließenden Kapitel 6 stellen wir ein abgestimmtes Konzept für Projekte und Beteiligungen im Bereich Sonnen- und Heliosphärenphysik in den kommenden 15 Jahre vor und beschreiben eine Reihe von notwendigen Maßnahmen in den Bereichen Ausbildung und Forschungsinfrastruktur, um den optimalen Nutzen aus diesen Projekten ziehen zu können.

## **Erfolgreiche Tradition der Erforschung von Sonne und Heliosphäre in Deutschland**

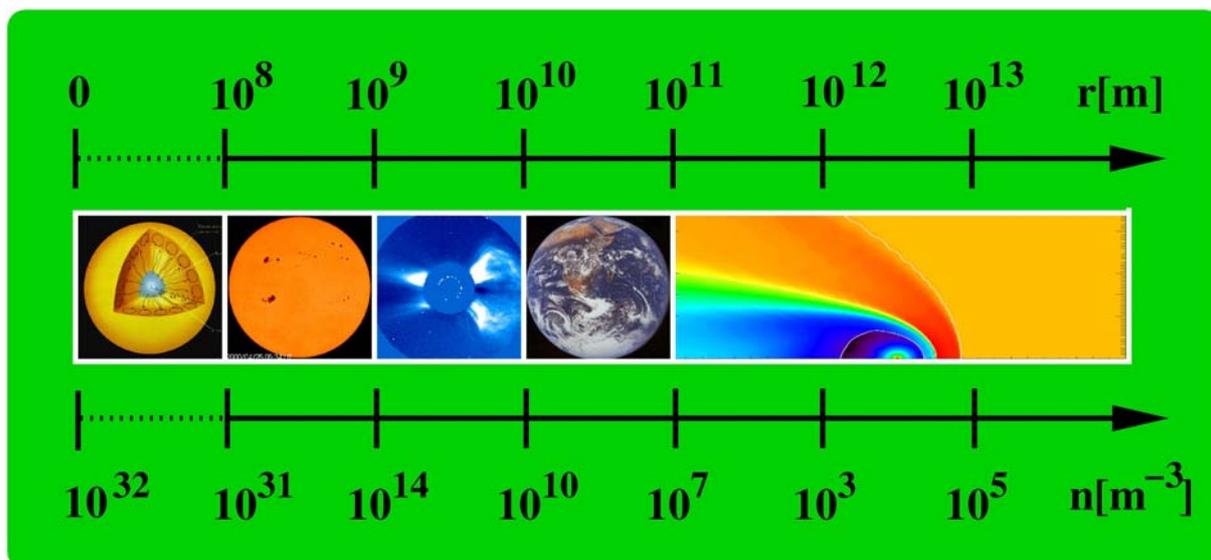
*(Diese Liste ist bewusst im Jahre 1975 abgebrochen. Sie enthält keine Leistungen, die von heute aktiven Wissenschaftlern erbracht wurden und in diesem Rahmen nicht bewertet werden sollen.)*

- 1611** Erste teleskopische Beobachtung von Sonnenflecken durch Christoph Scheiner und Johannes Fabricius.
- 1814** Joseph Fraunhofer entdeckt die nach ihm benannten Linien im Sonnenspektrum.
- 1843** Samuel Heinrich Schwabe findet den 11-jährigen Zyklus der Sonnenflecken.
- 1896** Johannes Wilsing und Julius Scheiner postulieren Radiostrahlung von der Sonne.
- 1905** Das Kriterium für konvektive Instabilität wird von Karl Schwarzschild formuliert.
- 1930** Julius Bartels identifiziert die Sonne als Quelle regelmäßig wiederkehrender geomagnetischer Störungen.
- 1930** Albrecht Unsöld begründet die Physik der Sternatmosphären anhand der Untersuchung der Sonnenatmosphäre.
- 1939** Walter Grotrian entdeckt, dass die Korona der Sonne aus einem sehr dünnen und ca. 1 Million K heißen Gas besteht.
- 1949/1951** Georg Thiessen und Karl-Otto Kiepenheuer entwickeln den Magnetographen zur Messung solarer Magnetfelder.
- 1951** Ludwig Biermann sagt die Existenz des Sonnenwindes anhand von Studien an Kometenschweiften voraus.
- 1964** Fritz Krause, Karl-Heinz Rädler und Max Steenbeck formulieren das Prinzip des turbulenten selbsterregten Dynamos.
- 1974/76** Start der deutsch-amerikanischen Sonnensonden Helios 1/2, die erstmals die innere Heliosphäre erkunden.
- 1975** Franz-Ludwig Deubner identifiziert die 5-Minuten-Oszillationen der Sonne und begründet damit die Helioseismologie.

## 2. Das System Sonne und Heliosphäre

Die Physik des Systems Sonne und Heliosphäre ist komplex und vielfältig. Dies ergibt sich nicht zuletzt aus der extremen Variation der Teilchenzahldichte, die vom Kern der Sonne bis zum äußeren Rand der Heliosphäre etwa 30 Größenordnungen überdeckt. Die Temperatur variiert dabei zwischen den Extremwerten von über 15 Millionen Kelvin im Sonnenzentrum und etwa 3000 Kelvin in der unteren Sonnenatmosphäre, d.h. über 4 Größenordnungen. Aus dieser Spannweite ergibt sich, dass sich sowohl die physikalische Beschreibung als auch die instrumentellen Methoden für die verschiedenen Bereiche im System Sonne/Heliosphäre stark unterscheiden. Dies wiederum führt zu einer Diversifikation in der Forschung, bei der sich die jeweiligen Unterdisziplinen mit jeweils angepassten Methoden auf verschiedene Aspekte des Systems konzentrieren. Man kann sie grob den folgenden Hauptgebieten zuordnen: Sonneninneres, innere Atmosphäre (Photosphäre und Chromosphäre), äußere Atmosphäre (Korona und Sonnenwind), sowie interplanetares Medium, Heliosphäre und Übergang ins interstellare Medium.

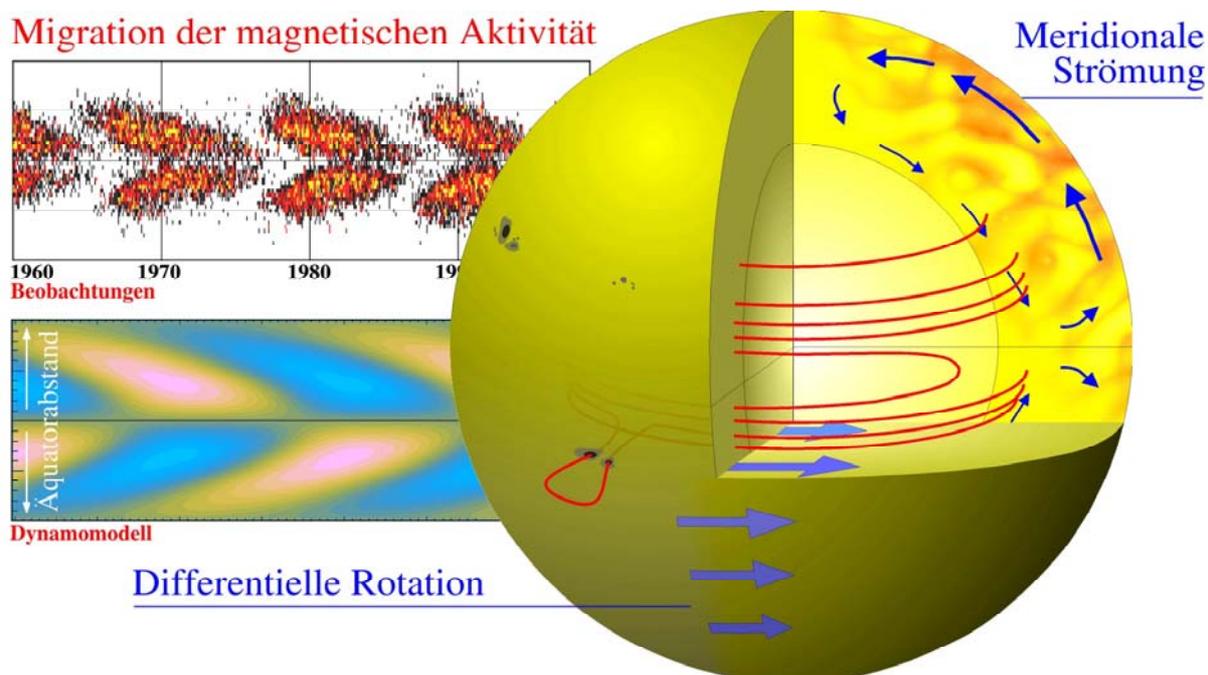
In den folgenden Abschnitten werden die verschiedenen Bereiche des Systems Sonne und Heliosphärenphysik kurz vorgestellt und die wichtigsten physikalischen Prozesse beschrieben.



Vom Kern der Sonne bis zum Rand der Heliosphäre durchlaufen physikalische Größen wie Teilchenzahldichte, Temperatur, Druck und Magnetfeldstärke extrem ausgedehnte Wertebereiche. Daraus ergibt sich, dass die Materie in diesem System unter einer großen Vielfalt von physikalischen Bedingungen vorliegt, welche mit unterschiedlichen experimentellen und theoretischen Methoden untersucht werden.

## 2.1 Das Sonneninnere

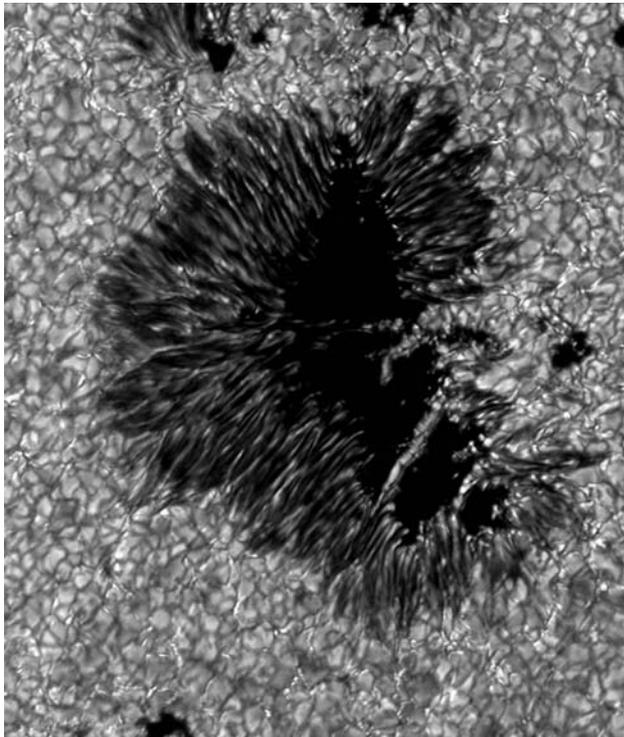
Die Energiequelle der Sonne befindet sich wie bei fast allen Sternen im Kern. Dort sind Temperatur und Dichte so hoch, dass über ein Netzwerk von Kernreaktionen Wasserstoff zu Helium verschmolzen wird. Die bei der Kernfusion freigesetzte Energie wird in der den Kern umgebenden Strahlungszone durch elektromagnetische Strahlung nach außen transportiert. In der äußeren Schale der Sonne, der Konvektionszone, findet der Energietransport durch das Aufströmen heißer und das Abströmen kühler Gase statt. Weil das Sonneninnere einen Resonanzkörper darstellt, bilden sich stehende Schallwellen aus, die durch die Konvektion angeregt werden. Durch die Vermessung der an der Sonnenoberfläche beobachteten Wellen können der innere Aufbau der Sonne mit hoher Genauigkeit bestimmt und die Gasströmungen im Sonneninneren untersucht werden. Unter anderem wurde auf diese Weise gefunden, dass es am Übergang zwischen Strahlungstransport- und Konvektionszone zu einer starken Scherströmung (differentielle Rotation) kommt, die eine wesentliche Rolle bei der Erzeugung des sich im 11-jährigen Aktivitätszyklus periodisch umkehrenden großräumigen Magnetfeldes der Sonne spielt.



Die an der Oberfläche beispielsweise in Form von Sonnenflecken beobachtbare magnetische Aktivität hat ihren Ursprung im Sonneninneren. Magnetischer Fluss wird in einem Dynamoprozess in der Konvektionszone erzeugt, der durch Konvektion, differentielle Rotation und meridionale Strömung getrieben wird. Die Rotationsrate variiert zwischen dem Äquator und den Polen der Sonne und in einer Scherschicht zwischen der Konvektionszone und der inneren Strahlungszone. Die daraus resultierende Scherströmung (differentielle Rotation) wickelt das Magnetfeld des Dipols auf und erzeugt so ein Feld in Rotationsrichtung (rote Linien), das durch eine meridionale Strömung am Boden der Konvektionszone äquatorwärts transportiert wird. Wenn einzelne Flussröhren dieses Feldes durch Instabilitäten an die Oberfläche gelangen, entstehen Sonnenflecken und aktive Regionen, deren Zahl und Äquatorabstand im Laufe des 11-jährigen Aktivitätszyklus periodisch variieren (Astrophysikalisches Institut Potsdam).

## 2.2 Photosphäre und Chromosphäre

Vom ca. 15 Millionen Kelvin heißen Kern der Sonne nimmt die Temperatur nach außen hin ab. Am äußeren Rand der Konvektionszone beträgt sie nur noch einige tausend Grad. Das solare Plasma wird durchsichtig und es bildet sich die Atmosphäre der Sonne. Hier wird die im Inneren erzeugte Energie in Form von Licht (Photonen) abgestrahlt, welches mittels Instrumenten auf der Erde oder im Welt- raum beobachtet und analysiert werden kann. Die innere Atmosphäre der Sonne besteht aus der Photosphäre und der Chromosphäre. In diesen beiden Schichten können in einzigartiger Weise die vielfältigen Wechselwirkungen zwischen Strahlung, Magnetfeld und Konvektion studiert werden, die für die gesamte Astrophysik von grundlegender Bedeutung sind, aber nur hier beobachtet werden können. Die auffälligsten Phänomene der Photosphäre sind die Granulation der „ruhigen“ Sonne und die Sonnenflecken in den magnetisch aktiven Gebieten. Die Granulation ist der Ausläufer der Konvektionsströmungen im Sonneninneren und bildet ein Muster aus helleren, heißen Aufströmungsgebieten und dunkleren, kühlen Abströmungskanälen. Die dunklen Sonnenflecken entstehen durch konzentrierte Magnetfelder, welche den Energietransport durch Konvektion stark vermindern.



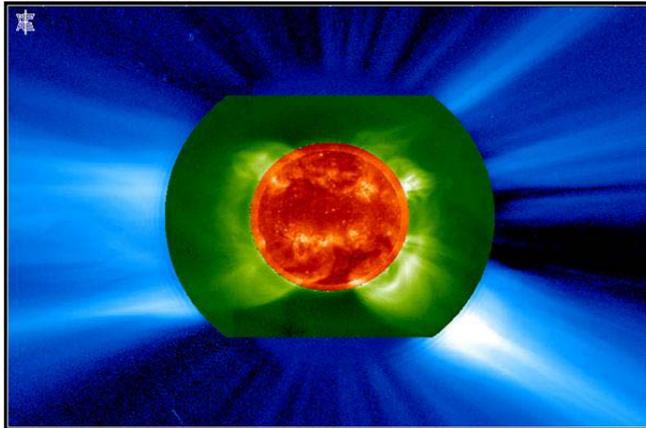
Granulation und magnetische Strukturen in einem etwa  $45000 \times 60000 \text{ km}^2$  großen Ausschnitt der solaren Photosphäre, aufgenommen bei einer Wellenlänge von  $430.4 \text{ nm}$  am Vakuum-Turmteleskop des Observatorio del Teide, Teneriffa. Die Wechselwirkung zwischen Magnetfeld und konvektiven Strömungen führt zur Bildung einer Hierarchie magnetischer Strukturen, die von Sonnenflecken von etlichen  $10^4 \text{ km}$  Größe bis zu Flusskonzentrationen von unter  $100 \text{ km}$  Durchmesser reicht. Die Magnetfeldstärke liegt dabei in allen Strukturen über  $1000 \text{ Gauß}$  (zum Vergleich: das Erdmagnetfeld beträgt etwa  $0.6 \text{ Gauß}$ ). Während Sonnenflecken wegen der Verminderung des konvektiven Energietransports durch das starke Magnetfeld dunkel erscheinen, werden die kleineren Flusskonzentrationen durch lokale Heizungsprozesse als helle Strukturen sichtbar. Sie spielen bei der Heizung der oberen Sonnenatmosphäre eine wesentliche Rolle, da sie mechanische Energie in Form von Wellen und magnetischen Spannungen in diese Bereiche transportieren (Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik).

Während die Temperatur in der Photosphäre nach außen abnimmt, zeichnet sich die Chromosphäre durch einen Temperaturanstieg aus. Durch diesen Anstieg werden Emissionslinien angeregt, die dazu führen, dass die Chromosphäre farbig leuchtet. Dieses ist am eindrucksvollsten als roter Farbsaum bei einer Sonnenfinsternis zu sehen, weil dann die lichtstarke Sonnenscheibe abgedeckt ist, und die rote Emissionslinie des neutralen Wasserstoffs das sichtbare Licht dominiert.

## 2.3 Korona und Sonnenwind

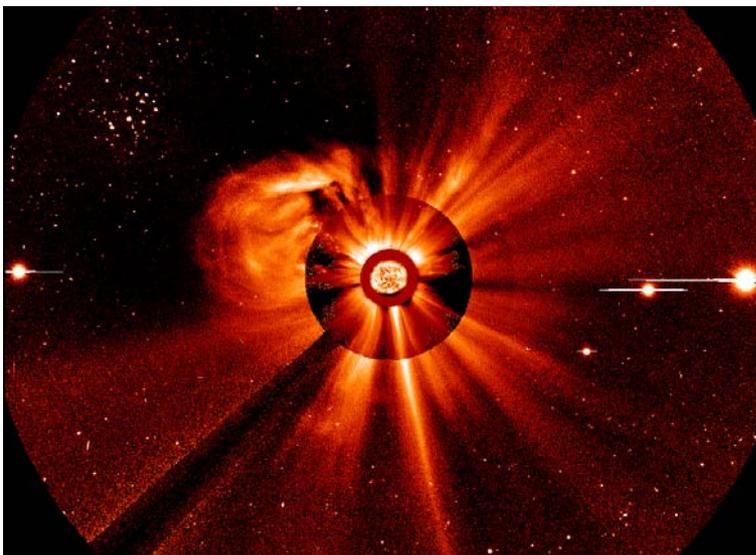
Die Korona, die bei Sonnenfinsternissen als Strahlenkranz um die verdeckte Sonnenscheibe erscheint, ist die äußerste Schicht der Sonnenatmosphäre. Sie ist durch eine nur wenige  $100 \text{ km}$  dicke Übergangsregion von der darunter liegenden Chromosphäre getrennt und geht nach außen kontinuierlich in die Heliosphäre über.

Infolge der hohen Temperatur von etwa 1-2 Millionen Kelvin ist das Plasma in der Korona fast vollständig ionisiert. Die kinetische Energiedichte des Plasmas ist hier wesentlich kleiner als die Energiedichte des solaren Magnetfeldes, das deshalb der Korona seine Strukturen aufzwingt. Über den Aktivitätsgebieten bilden sich röhren- und schleifenartige, nach außen geschlossene Magnetfeldstrukturen aus. Darin wird heißes, dichteres Plasma gehalten, das ein reichhaltiges Spektrum im UV- und Röntgenlicht abstrahlt. Daneben gibt es unipolare, magnetisch offene Regionen (im solaren Minimum insbesondere über den Polkappen der Sonne), die durch dünnes, wenig abstrahlendes Plasma und weit hinausreichende Magnetfeldlinien charakterisiert sind, die sog. Koronalöcher.



Die Korona im Licht der grünen Emissionslinie des 13-fach ionisierten Eisens und im Streulicht freier Elektronen (blau), aufgenommen mit dem Koronagraphen LASCO auf der Weltraumsonde SOHO (Solar and Heliospheric Observatory). Das Bild der Sonnenscheibe wurde mit dem UV-Teleskop EIT auf SOHO aufgenommen und zeigt die innere Korona (rot). In der Zusammensetzung wird die Verbindung zwischen den magnetischen Bögen in der inneren Korona und den lang gestreckten „Streamer“-Strukturen weiter außen in der Korona deutlich (Max-Planck-Institut für Aeronomie).

Die in der Korona gespeicherte Magnetfeldenergie kann in aktiven Gebieten explosionsartig in spektakulären Flares freigesetzt und in Strahlung, Wärme, Materiebewegung und Teilchenenergie umgesetzt werden. Dabei können sogar Kernreaktionen auftreten. In diesem Zusammenhang kommt es auch zu koronalen Massenauswürfen, bei denen ausgedehnte Plasmawolken mit hohen Geschwindigkeiten ausgestoßen werden. Sie können großräumige Stoßwellen erzeugen, deren Auswirkungen in weiten Teilen der Heliosphäre feststellbar sind. Flares und koronale Massenauswürfe führen insbesondere zur Beschleunigung von Elektronen und Ionen auf hohe Energien. Die Messung der Teilchen dieser solaren kosmischen Strahlung und der von ihnen erzeugten Radio-, Röntgen- und Gammastrahlung lässt wichtige Rückschlüsse auf die in der Korona ablaufenden Prozesse zu.

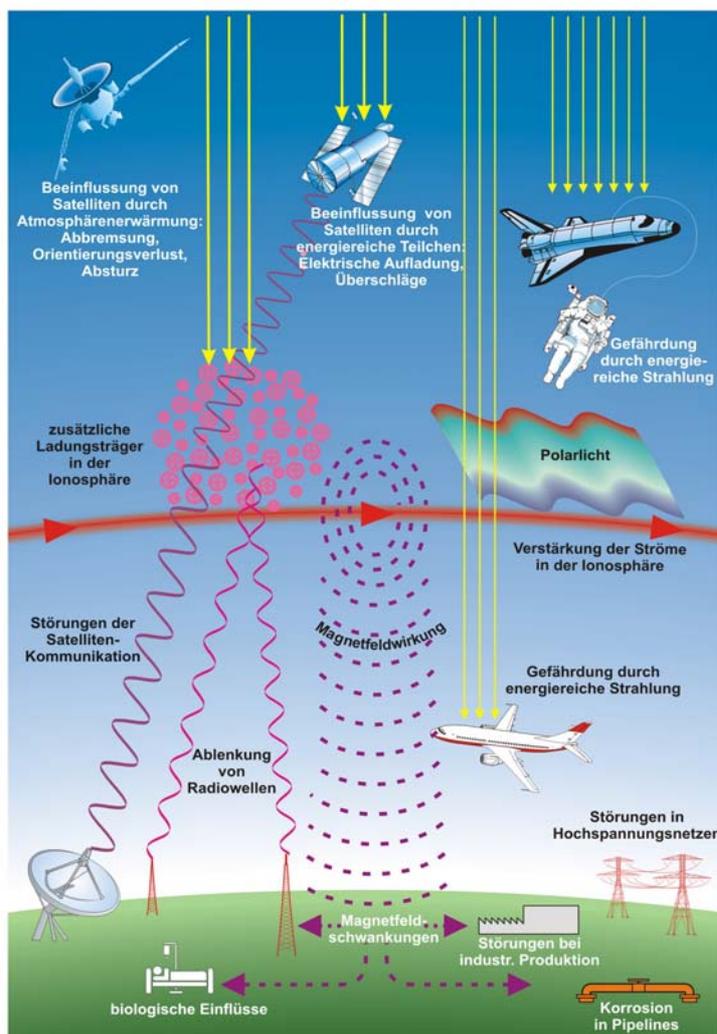


Ein großer koronaler Massenauswurf (CME: coronal mass ejection). Das Bild ist zusammen gesetzt aus Aufnahmen des Koronagrafen LASCO (außen) und der UV-Kamera EIT (maßstabsgetreues Sonnenbild in der Mitte), beides an Bord von SOHO. Solche Massenauswürfe entstehen oft aus Protuberanzen, die magnetisch destabilisiert und mit hohen Geschwindigkeiten ausgeschleudert werden. Dies ist oft mit Energiefreisetzung in Flares verbunden. Es bilden sich Stoßfronten, an denen Teilchen auf hohe Energien beschleunigt werden (Max-Planck-Institut für Aeronomie).

Wegen der hohen Temperaturen in der Korona gibt es kein Druckgleichgewicht zwischen dem Koronaplasma und dem umgebenden interstellaren Medium. Deshalb strömt ständig Materie als Sonnenwind nach außen. Das expandierende Plasma wird innerhalb weniger Sonnenradien Abstand auf Geschwindigkeiten zwischen 300 km/s und 800 km/s (über Koronalöchern) beschleunigt. Ab etwa 20 Sonnenradien Abstand überwiegt die kinetische Energiedichte des Sonnenwindes die des Magnetfeldes, das deshalb nach außen in den interplanetaren Raum getragen wird. Das Zusammenwirken der rotierenden Sonne und des radial abströmenden Sonnenwindes lässt so ein spiralförmiges, die Sonne großräumig umgebendes Magnetfeldmuster entstehen.

## 2.4 Auswirkungen auf die Erde

Während ihre uns so gleichförmig erscheinende Strahlung Leben auf der Erde erst möglich macht, greift die Sonne auch in anderer, vielfältiger Weise in Prozesse auf der Erde ein. Die variierende magnetische Aktivität der Sonne beeinflusst den erdnahen Weltraum sowie die Magnetosphäre und Atmosphäre der Erde. So führen eruptive Ereignisse wie Flares und koronale Massenauswürfe zu einem plötzlichen Anstieg der UV-Einstrahlung und des Flusses energiereicher Teilchen. Darüber hinaus gibt es längerfristige Veränderungen, etwa im Verlauf des 11-jährigen Aktivitätszyklus und auf noch längeren Zeitskalen. Da das variierende solare Magnetfeld den Energietransport zur Sonnenoberfläche und damit die Abstrahlung in den

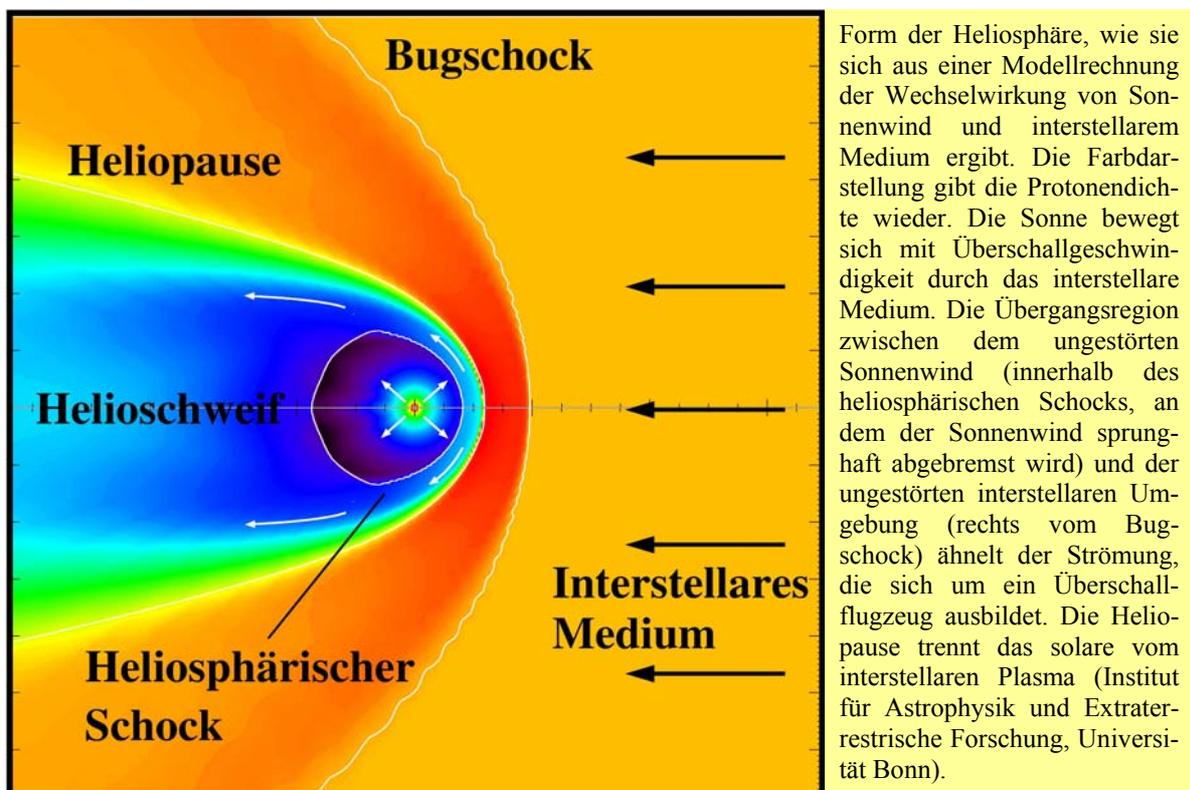


Die magnetisch aktive und veränderliche Sonne wirkt auf vielfältige Art und Weise auf natürliche und technische Systeme auf der Erde, in ihrer Atmosphäre und im erdnahen Weltraum ein. Die Erhöhung der UV-Strahlung bei hoher Sonnenaktivität bewirkt eine Ausdehnung der Erdatmosphäre, wodurch niedrig fliegende Satelliten abgebremst und zum Absturz gebracht werden können. Durch solare Eruptionen erzeugte hochenergetische Teilchen beeinträchtigen oder beschädigen elektronische Komponenten in Erdsatelliten und gefährden Astronauten. Die bei Eruptionen ausgeschleuderten Plasmawolken können das Magnetfeld in der Umgebung der Erde erheblich beeinflussen. Solche geomagnetischen Stürme sind mit Polarlichterscheinung verbunden. Erhöhte Elektronendichten und verstärkte Ströme in der Ionosphäre stören Kommunikationssysteme und führen zu Magnetfeldschwankungen, die am Erdboden elektrische Ströme induzieren. Dies kann zu Zusammenbrüchen der Elektrizitätsversorgung, Korrosion in Pipelines und zu Störungen bei komplexen Fertigungsprozessen wie der Herstellung von Halbleiterchips führen. Es gibt Hinweise auf Wirkungen auf biologische Prozesse (Max-Planck-Institut für Aeronomie).

Weltraum beeinflusst, kommt es zu Schwankungen der Gesamthelligkeit und der spektralen Helligkeit (insbesondere im UV-Bereich) auf Zeitskalen zwischen Tagen und Jahrhunderten. Das beeinflusst die Erdatmosphäre (z.B. den Ozongehalt der Stratosphäre) und trägt zu langfristigen Veränderungen des Erdklimas bei.

## 2.5 Die Heliosphäre und das interstellare Medium

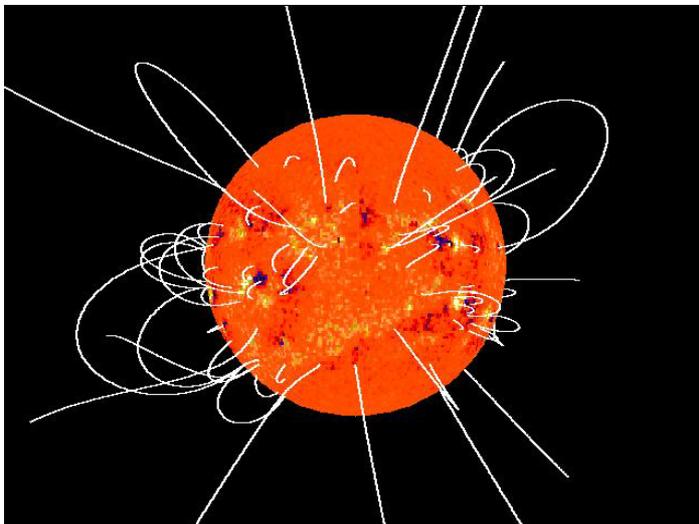
Die Wechselwirkung des Sonnenwindes mit dem die Sonne und das Planetensystem umgebenden interstellaren Medium führt zur Ausbildung einer tropfenförmigen Plasmablase, der Heliosphäre. Die Anpassung der überschallschnellen Sonnenwindströmung an das interstellare Medium erfolgt über den heliosphärischen Schock, der durch Sprünge in der Dichte, der Geschwindigkeit und der Temperatur des Plasmas charakterisiert ist. Das solare und das interstellare Plasma sind durch eine weiter außen liegende Grenzfläche, die Heliopause, voneinander getrennt.



Das Magnetfeld in der Heliosphäre schirmt die Planeten teilweise gegen energiereiche geladene interstellare Teilchen (galaktische kosmische Strahlung) ab. Gleichzeitig wird auch der Fluss interstellarer Neutralatome, insbesondere des hochreaktiven atomaren Wasserstoffes, infolge der Wechselwirkung mit dem Sonnenwind stark reduziert. Die Schwankung der Abschirmwirkung der Heliosphäre gegen die galaktische kosmische Strahlung im Verlaufe des 11-jährigen Aktivitätszyklus und seiner langfristigen Modulation wird in jüngster Zeit hinsichtlich ihrer möglichen Auswirkung auf die globale Wolkenbedeckung und damit auf das Erdklima diskutiert.

## 2.6 Vereinheitlichte Sicht

Die traditionelle Unterteilung der Sonnenforschung nach einzelnen Schichten basiert auf den Messmöglichkeiten der jeweiligen Instrumente und der Gültigkeit von Näherungen zur Beschreibung der oftmals komplexen physikalischen Phänomene. Die Sonne selbst kennt keine solchen Grenzen; vielmehr sind ihre verschiedenen Schichten eng miteinander gekoppelt. Diese Verbindung wird durch differentielle Rotation, Konvektion, akustische Wellen und Strahlung, vor allem aber durch das Magnetfeld bewirkt. So wird beispielsweise das photosphärische Magnetfeld durch die konvektiven Bewegungen ständig verändert, was sich in den äußeren Schichten der Atmosphäre in Form von auslaufenden Wellen, der Ausbildung von Stromschichten und schließlich in der explosiven Freisetzung magnetischer Energie bei Flares auswirkt. Die große wissenschaftliche Herausforderung ist, ein quantitatives Verständnis dieser Kopplungsprozesse zu gewinnen, indem man koordinierte Messungen der physikalischen Größen in den verschiedenen Schichten durchführt und miteinander in Zusammenhang bringt.



Das Magnetfeld verbindet die verschiedenen Schichten der Sonne vom Boden der Konvektionszone bis in die äußeren Bereiche der Korona. Es transportiert Energie, Impuls und Drehimpuls. Das Bild zeigt Magnetfeldlinien in der Korona, wie sie sich aus einer Extrapolation des gemessenen Magnetfelds in der Photosphäre (gelb und blau entsprechen den beiden Magnetfeldpolaritäten) ergeben. Man erkennt geschlossene Feldlinienbögen über bipolaren Aktivitätsgebieten, während die Feldlinien über den Polkappen weit in den interplanetaren Raum hinausreichen (Max-Planck-Institut für Aeronomie).

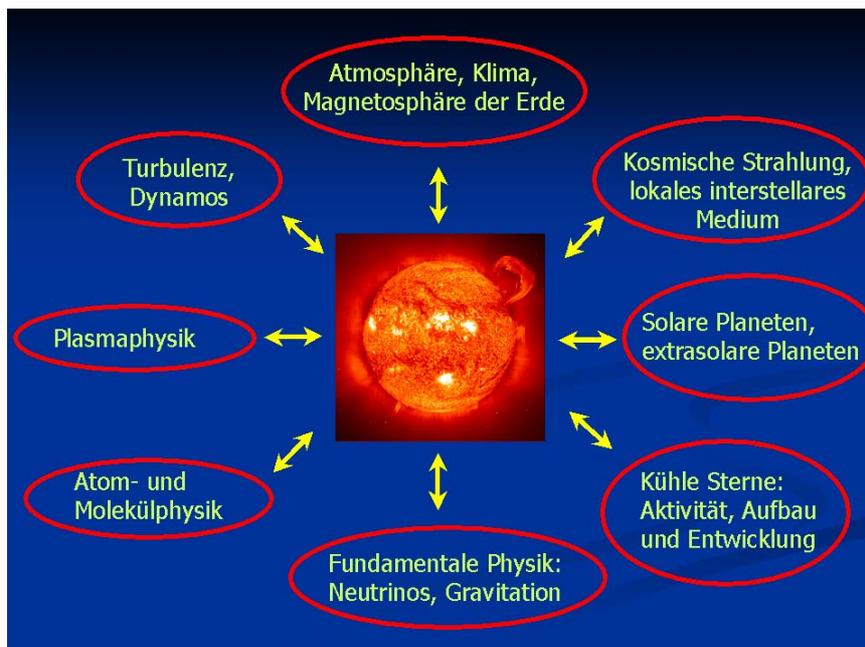
Die Wichtigkeit einer übergreifenden Sicht der solaren Prozesse ist in letzter Zeit gerade auch durch die Ergebnisse der Weltraummissionen immer deutlicher geworden. Eine zentrale Aufgabe für die kommenden Jahre wird es daher sein, die Zusammenarbeit der auf den verschiedenen Teilgebieten arbeitenden Forschergruppen zu verstärken. Eine gemeinsame Definition der übergreifenden Forschungsziele ist deshalb eines der Hauptanliegen der vorliegenden Schrift. Durch internationale Workshops unter deutscher Führung und bei der Planung zukünftiger Weltraummissionen wird diesem Aspekt bereits Rechnung getragen. Die Mission *Solar Orbiter* der ESA spielt hierbei eine Schlüsselrolle.

### 3. Die Bedeutung der Erforschung von Sonne und Heliosphäre

Das vorrangige Ziel der Sonnen- und Heliosphärenforschung ist, die physikalischen Grundlagen der vielfältigen Vorgänge in diesem System zu verstehen. Aus dem breiten Spektrum der untersuchten Prozesse ergeben sich vielfältige Beziehungen zu anderen Forschungsgebieten. Dies betrifft naturgemäß die Astrophysik (Sterne und extrasolare Planeten), aber auch eine ganze Reihe anderer Bereiche. Sonne und Heliosphäre spielen eine besondere Rolle, da sie terrestrische Systeme auf vielerlei Art beeinflussen und ihre Veränderungen sich direkt auf die Lebensbedingungen und die Umwelt des Menschen auswirken können. Die Untersuchung der Wirkungen von Sonne und Heliosphäre auf die Erde, die auf den Ergebnissen der Grundlagenforschung aufbaut, ist deshalb von großer praktischer Bedeutung. Dies betrifft auch die Rolle dieses Forschungszweigs in den Bereichen Technologieentwicklung und Ausbildung.

#### 3.1 Beziehung zu anderen Forschungsgebieten

Die Sonnen- und Heliosphärenphysik hat stets andere Forschungsgebiete befruchtet und wiederum von deren Fortschritten profitiert. Der Bezug zur stellaren Astrophysik ist naheliegend (siehe den nachfolgenden Abschnitt 3.2). Ein Verständnis solarer und damit stellarer Aktivität erleichtert die Suche nach extrasolaren Planeten und das Studium der Wirkung von Sternen auf die Magnetosphären und Atmosphären ihrer Planeten. Auch mit der Physik der interstellaren Materie und der kosmischen Strahlung besteht ein enger Zusammenhang: einerseits sind Merkmale der Heliosphäre durch beide Medien mitbestimmt, andererseits gestattet das Eindringen von Neutralatomen und von Teilchen der kosmischen Strahlung in die Heliosphäre direkte Messungen dieser astrophysikalisch bedeutsamen Komponenten.



Die Beziehung der Sonnen- und Heliosphärenforschung zu anderen Forschungsgebieten. Die angedeuteten Wechselwirkungen mit den verschiedenen Disziplinen machen die Bedeutung dieses Forschungsgebietes als Brücke zwischen Erdwissenschaften, Grundlagen- und Astrophysik deutlich.

Magnetfelder spielen für viele Vorgänge im Kosmos eine zentrale Rolle. Das reicht von der Sternentstehung und der Erzeugung der kosmischen Strahlung über kompakte Objekte, Akkretionsscheiben und kosmische Jets bis hin zur Strukturbildung im frühen Universum. Die Sonnen- und Heliosphärenphysik nimmt beim Studium aller magnetischen Prozesse eine Vorreiterstellung ein, weil hier alle relevanten Prozesse in einem zwar komplexen, aber grundsätzlich gut beobachtbaren System auf den ihnen charakteristischen Skalen untersucht werden können. So ist die anhand des magnetischen Aktivitätszyklus der Sonne entwickelte Dynamotheorie zum Paradigma für das Verständnis der Entstehung kosmischer Magnetfelder auf allen Skalen bis hin zu Galaxien geworden.

Der Aufbau der Sonne und die Dynamik ihrer Atmosphäre kann nur über vielfältige Beobachtungen der von ihr emittierten Strahlung verstanden werden. Zur Interpretation des komplexen elektromagnetischen Spektrums der Sonne werden präzise Ergebnisse aus der Atom- und Molekülphysik benötigt. Umgekehrt können viele Merkmale des solaren Spektrums nur schwer oder gar nicht im Labor untersucht werden, so dass das Studium der Sonnenatmosphäre zur Gewinnung von Daten zur atomaren Struktur beiträgt.

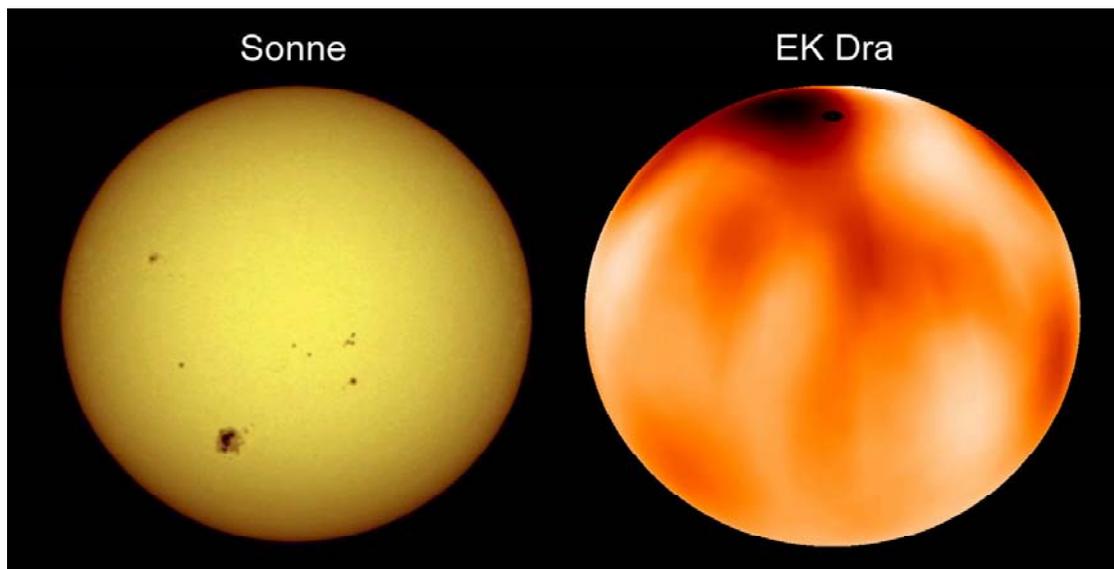
Da viele Phänomene der Sonnen- und Heliosphärenphysik nur als Folge von Plasmaprozessen verstanden werden können, ergeben sich enge Beziehungen zur Plasmaphysik. Die Sonnen- und Heliosphärenforschung erlaubt es, Plasmen in Wertebereichen physikalischer Parameter zu studieren, die im Labor und auch im erdnahen Weltraum nicht zugänglich sind.

Die Entwicklung der Helioseismologie hat von den Methoden der Geoseismologie profitiert. Die Anwendung auf andere Sterne, die Asteroseismologie, hat sich zu einem schnell wachsenden Zweig der Astrophysik entwickelt. Bei der Erforschung des Sonneninneren ergibt sich auch eine Beziehung zur Neutrino-Physik: die Kernfusionsprozesse im Zentralbereich der Sonne erzeugen Neutrinos, die das Sonneninnere ungehindert verlassen und auf der Erde nachgewiesen werden können. Ebenso offensichtlich wie der Zusammenhang mit der Kernphysik ist damit die Beziehung zur noch jungen Disziplin der Astroteilchenphysik.

## **3.2 Die Verbindung zwischen Sonnen- und Sternphysik**

Für die Astrophysik der (kühlen) Sterne ist die Sonne das Maß aller Dinge. Theoretische Sternentwicklungsrechnungen basieren auf den astrophysikalischen Parametern der Sonne. Bei der sogenannten „solar-stellar connection“ geht man einen wesentlichen Schritt weiter, indem man die durch Magnetfelder verursachten Aktivitätsphänomene auch auf anderen Sternen zu beobachten und zu erklären sucht. Dabei ergänzen sich die Erforschung von Sonne und Sternen in nahezu idealer Weise: während nur auf der Sonne die für die relevanten Prozesse wesentlichen räumlichen und zeitlichen Skalen aufgelöst werden können, erlaubt es die Vielfalt der Sterne, einen weiten Parameterbereich abzudecken. In Analogie zur im Abschnitt 2.6 dargestellten vereinheitlichten Sicht der einzelnen Sonnenschichten ist das Ziel der „solar-stellar connection“ die vereinheitlichte Beschreibung der magnetischen Aktivität und Dynamik von kühlen Sternen und deren zeitlicher Entwicklung.

Um 1970 beginnende Langzeituntersuchungen ergaben, dass eine ganze Reihe von sonnenähnlichen Sternen Aktivitätszyklen mit Perioden zwischen etwa 5 und 15 Jahren aufweisen. Dabei zeigt sich, dass die Stärke der stellaren Aktivität mit der Rotationsrate zunimmt, was Rückschlüsse auf den magnetfelderzeugenden Dynamomechanismus ermöglicht. Manche Sterne scheinen auch eine Phase stark reduzierter Aktivität zu durchlaufen, ähnlich dem Maunder-Minimum der Sonne in der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts.



Eine Oberflächenkarte des ca. 100 Millionen Jahre „jungen“ sonnenähnlichen Sterns EK Draconis (rechts) im Vergleich mit einer Weißlichtaufnahme der Sonne. Die Farbskala gibt die Temperatur wieder (hellorange: 5800 K, bis schwarz: 4800 K). Der etwa um einen Faktor 10 schneller als die Sonne rotierende Stern zeigt ausgedehnte dunkle Flecken, die wie Sonnenflecken vermutlich magnetischer Natur sind. Die „Sternflecken“ befinden sich vor allem bei hohen Breiten bis hin zum Rotationspol, der als schwarzer Punkt oben angedeutet ist (Astrophysikalisches Institut Potsdam).

Mit den jetzt verfügbaren großen Teleskopen mit 8-10 m Spiegeldurchmesser ist es möglich, typische solare Instrumente auch an Nachtteleskopen anzuwenden. Mit Hilfe spektroskopisch-tomographischer Methoden kann man die Temperatur- und Magnetfeldverteilung auf den Oberflächen schnell rotierender Sterne rekonstruieren. So kann die Verteilung der magnetischen Aktivitätsphänomene wie Sternflecken in Abhängigkeit von der Rotationsrate und der Tiefe der Konvektionszone untersucht werden und zum Test theoretischer Dynamomodelle dienen.

### 3.3 Gesellschaftliche Bedeutung

Die Themengebiete, bei denen die Sonnen- und Heliosphärenphysik (über die Schaffung von Grundlagenwissen hinaus) eine unmittelbare Bedeutung für die Gesellschaft hat, lassen sich in drei Gruppen einordnen: Umwelt, Technologie und Ausbildung. Die Themengruppe **Umwelt** bezieht sich auf die Entwicklung der Erdatmosphäre (z.B. CO<sub>2</sub>-Gehalt, Ozonloch) und des Erdklimas. Dies betrifft vor allem den Einfluss der Sonne auf Klimavariationen auf Zeitskalen von Jahrzehnten bis Jahrhunderten, welcher im Zusammenhang mit der globalen Erwärmung von unmittelbarem gesellschaftlichen Interesse ist.

Solar-terrestrische Beziehungen manifestieren sich auf kürzeren Zeitskalen in der Themengruppe **Technologie**. Die steigende Leistungsfähigkeit vieler Technologien geht einher mit einer wachsenden Anfälligkeit gegenüber Störungen durch energiereiche Teilchen von der Sonne. Zur Einleitung von Schutzmaßnahmen bedarf es einer zuverlässigen Vorhersage des „Weltraumwetters“, was wiederum ein tieferes Verständnis der Vorgänge auf der Sonne und ihrer Auswirkungen auf die Erde und den erdnahen Weltraum voraussetzt. Andererseits stimuliert die Erforschung von Sonne und Heliosphäre die Technologieentwicklung wegen der extremen Anforderungen an weltraumgestützte Instrumente und der hohen Genauigkeitsforderungen an bodengebundene Teleskope und Messeinrichtungen. Dies eröffnet Möglichkeiten zum Technologietransfer, insbesondere in den Bereichen Detektorentwicklung und Miniaturisierung.

Die technologischen Herausforderungen, welche die Forschung im Bereich Sonne/Heliosphäre stellt, weisen auch auf die Themengruppe **Ausbildung** hin. Instrumentell orientierte Arbeitsgruppen bieten ein ideales Umfeld für die Heranbildung von vielseitigem technischem Personal, das es gewohnt ist, extremen Anforderungen gerecht zu werden. Darüber hinaus motiviert die Erforschung der Sonne und Heliosphäre durch spektakuläre Missionen und Resultate junge Menschen, sich mit Naturwissenschaft zu befassen und ein entsprechendes Studium aufzunehmen. Die enge Verknüpfung von Messung und Experimententwicklung mit Modell- bzw. Theoriebildung, die typisch für dieses Forschungsgebiet ist, führt zu anspruchsvollen und vielseitigen Ausbildungsprogrammen. Die Zusammenarbeit in den oft großen internationalen Arbeitsgruppen stärkt die Teamfähigkeit und fordert frühzeitig die Aneignung von Managementfähigkeiten.

### **Gesellschaftliche Bedeutung der Erforschung von Sonne und Heliosphäre**

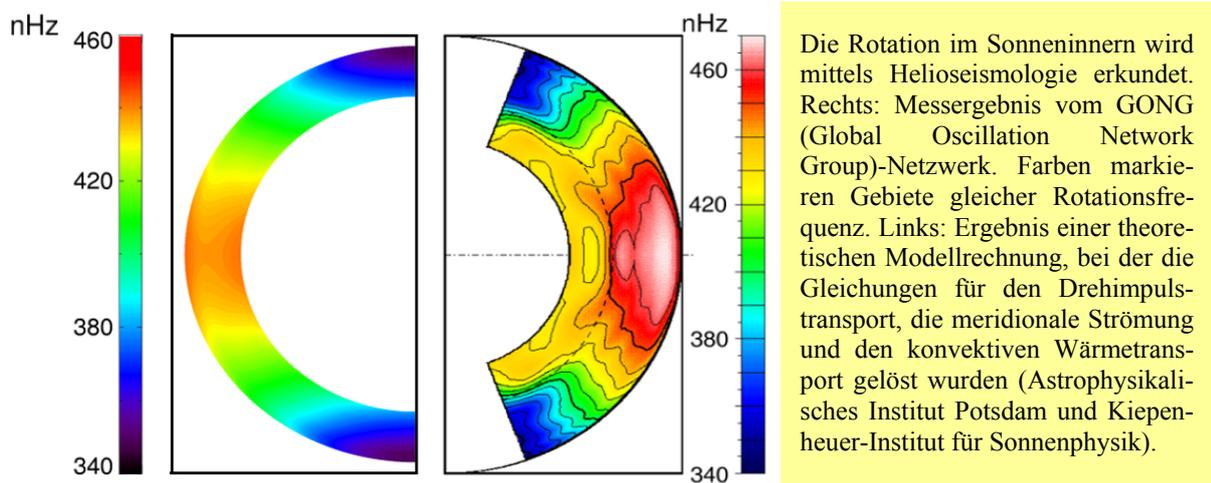
- **Umwelt:**
  - Einfluss der veränderlichen Sonne auf die langfristige Variation des Erdklimas
  - Einwirkung der Sonnenaktivität auf die oberen Schichten der Erdatmosphäre
- **Technologie:**
  - Komplexe Anforderungen an die Entwicklung von Instrumenten fördern die technologische Kompetenz
  - Gefährdung von Satellitensystemen und technischen Systemen am Erdboden
- **Ausbildung:**
  - Faszinierendes Forschungsgebiet mit spektakulären Missionen und Ergebnissen
  - Steigerung des Interesses an Forschung in der Öffentlichkeit
  - Motivation von jungen Menschen für ein naturwissenschaftliches Studium

## 4. Forschungsschwerpunkte

In den folgenden Abschnitten wird dargelegt, auf welche Themen sich die Sonnen- und Heliosphärenforschung in Deutschland in den kommenden 15 Jahren konzentrieren wird und welche zentralen wissenschaftlichen Fragen die Forschung bestimmen werden. Neben Bereichen, in denen deutsche Forschungsgruppen bereits in der Vergangenheit erfolgreich aktiv waren, umfasst dieses Kapitel Themen, die neu aufgegriffen werden sollen, bzw. bei denen das vorhandene Engagement deutlich verstärkt werden soll.

### 4.1 Helioseismologie: Blick ins Innere der Sonne

Die Sonne wirkt als Resonanzkörper für Schallwellen, die von der Konvektion im Sonneninneren erzeugt werden und eine Vielfalt von Mustern stehender Wellen bilden. Mit Hilfe der Dopplerverschiebung von Spektrallinien auf der Sonnenoberfläche konnten mehr als 10 Millionen akustische Eigenschwingungen identifiziert und ihre Frequenzen mit großer Genauigkeit vermessen werden. Diese Ergebnisse bilden die Grundlage der Helioseismologie, die in den letzten 20 Jahren das Innere der Sonne mit großer Präzision entschlüsselt hat. So konnte der radiale Verlauf von Temperatur, Dichte und chemischer Zusammensetzung im Sonneninneren mit einer Genauigkeit von bis zu 0.1% bestimmt werden. Diese Ergebnisse zeigten, dass die Lösung des solaren Neutrinoproblems in der Physik der Elementarteilchen (Neutrino-Oszillationen) und nicht in Unsicherheiten des Sonnenmodells begründet sein musste, was durch die neueren Neutrinoexperimente schließlich glänzend bestätigt wurde. Die Messung der Tiefe der Konvektionszone sowie der internen Rotation der Sonne sind zwei weitere herausragende Erfolge. Helioseismologie ist allerdings nicht auf das Sonneninnere beschränkt: Wellenprozesse können von der Photosphäre bis in die Korona gemessen werden, um Information über die Struktur und Dynamik der Sonnenatmosphäre zu erlangen.



Seit wenigen Jahren ist es möglich, die lokale Wellenausbreitung unterhalb der Sonnenoberfläche zu vermessen. Diese „lokale Helioseismologie“ verwendet Methoden, die denen der terrestrischen Seismologie ähnlich sind, um dreidimensionale Bilder vom Sonneninnern zu erstellen und die dortigen Strömungen zu studieren. Damit kann beispielsweise die Tiefenstruktur von Sonnenflecken und magnetisch aktiven Regionen erforscht und ihr Ausbruch vorhergesagt werden, bevor sie an der Oberfläche erscheinen. Für die Zukunft werden auch detaillierte Erkenntnisse über die Plasmaströmungen in der unteren Konvektionszone sowie über die

Struktur und Variabilität der Rotations-Scherschicht und das Magnetfeld am Boden der Konvektionszone erwartet. Die Resultate solcher Messungen werden die Grundlage bilden, um Fortschritte beim Verständnis des Dynamomechanismus, der das Magnetfeld der Sonne erzeugt, zu erzielen. Die nächste Generation weltraumgestützter Instrumente, z.B. auf dem Solar Dynamics Observatory (SDO) und dem *Solar Orbiter* werden dazu entscheidend beitragen.

Man kann erwarten, dass die meisten kühlen Sterne mit äußeren Konvektionszonen akustische Eigenschwingungen analog denen der Sonne aufweisen. Obwohl ihre Messung erheblich schwieriger ist als im Fall der Sonne (Sterne sind viel lichtschwächer und ihre Schwingungen können nicht räumlich aufgelöst beobachtet werden), sind Beobachtungen von Eigenschwingungen weißer Zwergsterne und kürzlich auch eines sonnenähnlichen Sterns gelungen. Mit den Weltraummissionen *Corot* und *Eddington* wird es möglich sein, mittels „Asteroseismologie“ die innere Struktur von mehreren hundert Sternen zu bestimmen und so die Theorie des inneren Aufbaus und der Entwicklung von Sternen, welche das Fundament für weite Bereiche der Astrophysik darstellt, experimentell zu überprüfen.

### Offene Fragen im Bereich Sonneninneres

Übergreifende Frage: **Wie funktioniert der Dynamo, der das Magnetfeld erzeugt und den Aktivitätszyklus bewirkt ?**

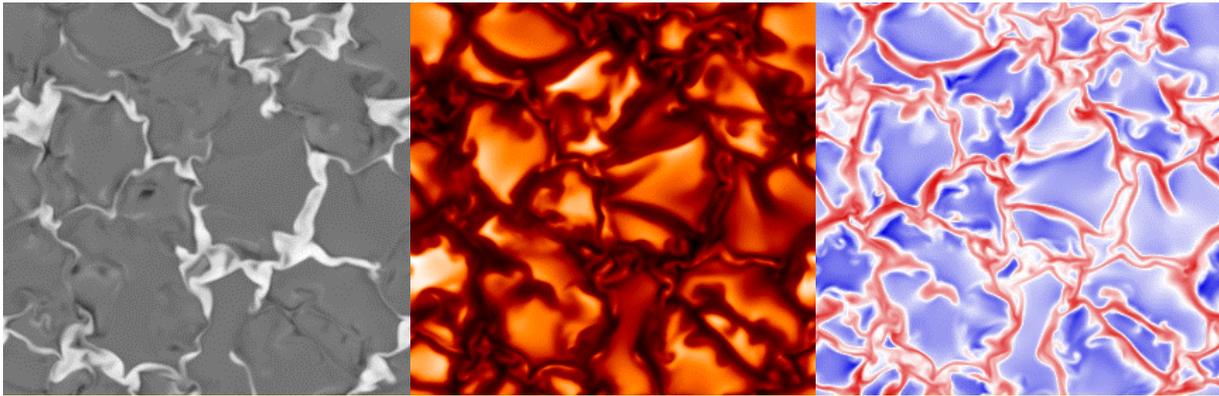
Dies führt zu einer Reihe von Einzelfragen, unter anderem:

- Wie sieht das Strömungsfeld (differentielle Rotation, Konvektion und meridionale Zirkulation) in der unteren Konvektionszone aus? Wie variiert es im Sonnenzyklus?
- Auf welche Weise findet der Drehimpuls-austausch zwischen der Konvektionszone und der inneren Strahlungszone statt? Wie wird die differentielle Rotation aufrecht-erhalten?
- Welche Wechselwirkung gibt es zwischen dem Magnetfeld an der Oberfläche und dem Feld in der Dynamoregion am Boden der Konvektionszone?

## 4.2 Stetiger Wandel: das komplexe Magnetfeld in der Photosphäre

Die als „Magneto-Konvektion“ bezeichnete Wechselwirkung zwischen Magnetfeldern und konvektiven Strömungen ist am intensivsten in der Photosphäre, da hier die magnetische, thermische und kinetische Energiedichte von der gleichen Größenordnung sind. Im elektrisch gut leitfähigen Plasma der Photosphäre führt dies zur Bildung einer hochgradig intermittenten Magnetfeldstruktur, bei der magnetischer Fluss in den Bereichen konvektiver Abwärtsströmungen konzentriert wird, während die übrigen Gebiete mit wesentlich schwächeren Feldern durchsetzt sind. Der ständige Auf- und Abbau der Magnetfeldkonzentrationen und ihr horizontaler Transport über die Sonnenoberfläche durch die konvektiven Strömungsmuster führt zu einer sich dauernd ändernden komplexen magnetischen Topologie, die mit einem Transport mechanischer Energie in die obere Atmosphäre verbunden ist. Diese Energie trägt zur Heizung der Korona bei und ist die Quelle von Flares und koronalen Massenauswürfen. Das Verständnis der aus der Magneto-Konvektion in der Photosphäre resultierenden magnetischen Struktur und Dynamik ist deshalb eine Voraussetzung für die Erforschung der Koronaheizung und impulsiver Ereignisse wie Flares.

Die Rückwirkung der Magnetfeldkonzentrationen auf den konvektiven Energietransport und die Strahlungsgeometrie werden als Ursache der gemessenen Helligkeitsvariation der Sonne im Verlauf des Aktivitätszyklus betrachtet. Ein quantitatives Verständnis dieses möglicherweise für das Erdklima bedeutsamen Effekts verlangt wiederum eine genaue Kenntnis der photosphärischen Magnetfeldstruktur und ihrer Konsequenzen für das Strahlungsfeld.



Um die komplexen Prozesse der Magneto-Konvektion, die von der Beobachtung jeweils nur über einen kleinen Höhenbereich erfasst werden, in ihrer Gesamtheit zu verstehen, werden Computersimulationen durchgeführt. Die Abbildungen zeigen jeweils einen Schnitt durch eine dreidimensionale Simulation etwa in Höhe der sichtbaren Sonnenoberfläche. Die horizontale Ausdehnung des betrachteten Gebietes entspricht  $6000 \times 6000 \text{ km}^2$  auf der Sonne. Links ist das Magnetfeld (Graustufendarstellung: schwarz und weiß sind die beiden Polaritäten, grau entspricht schwachem Feld), in der Mitte die Helligkeit und rechts das Geschwindigkeitsfeld (rot: Abwärtsströmungen, blau: Aufwärtsströmungen) dargestellt. Das Magnetfeld wird im Netzwerk der Abwärtsströmungen konzentriert und bildet dort ein Spektrum von Strukturen. Während die größeren Flusskonzentrationen dunkel erscheinen, zeichnen sich die kleinen, länglichen Elemente hell gegen den dunklen Hintergrund der Abströmungsgebiete ab (Max-Planck-Institut für Aeronomie).

Die dunklen Sonnenflecken sind das bekannteste Phänomen in der Photosphäre. Im Zusammenhang mit ihrer Struktur, Dynamik und Energetik gibt es eine Reihe von ungelösten grundlegenden Fragen, die unser unzulängliches Verständnis der komplexen Wechselwirkung zwischen konvektivem Energietransport und Magnetfeld zum Ausdruck bringen. Einerseits stellt sich die Frage, auf welche Weise in der dunklen inneren Fleckenzzone (Umbra) etwa 20% des ungestörten Energiestroms transportiert werden, obwohl das starke vertikale Magnetfeld Materiebewegungen weitgehend unterdrückt. Weiterhin ist nicht verstanden, wie es in der helleren peripheren Fleckenzzone (Penumbra) zu einer Filamentierung des dort geneigten Magnetfeldes und zu einer starken Ausströmung von Plasma entlang der Magnetfeldlinien kommt. Sonnenflecken sind ein ideales Labor für das Studium der astrophysikalischen Magneto-Konvektion unter verschiedenen Bedingungen (z.B. Feldneigung und -stärke). Dazu ist es allerdings erforderlich, Beobachtungen auf den charakteristischen Längenskalen ihrer Feinstruktur im Bereich von 100 km auf der Sonne zu gewinnen.

Die Photosphäre bietet für das Studium des Magnetfeldes gute Möglichkeiten, da hier die meisten Spektrallinien entstehen, die über den Zeeman-Effekt Magnetfeldmessungen gestatten. Eine Herausforderung ist allerdings die typische Größe der Magnetfeldkonzentrationen von 100 km und weniger. Die Auflösung solcher kleiner Strukturen mit Instrumenten großer Öffnung erfordert

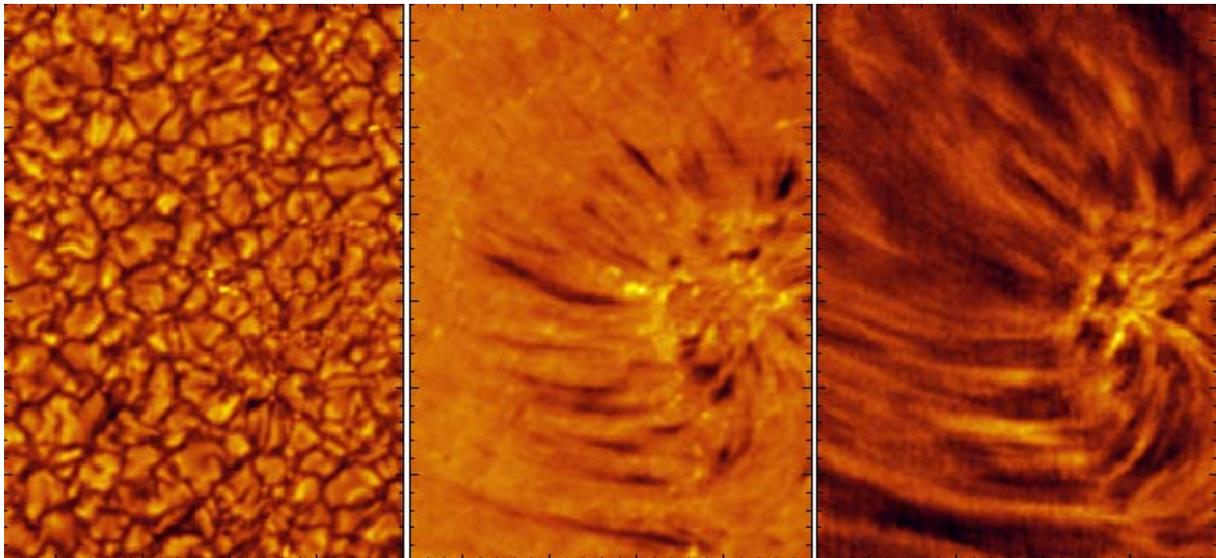
#### Offene Fragen im Bereich Photosphäre

Übergreifende Frage: **Welche Bedeutung hat die magnetische Strukturierung für den Energietransport, für die Heizung der oberen Atmosphäre und für den Dynamo?**

Daraus resultierende Einzelfragen, z.B.:

- Werden die zyklischen Helligkeitsvariationen der Sonne global oder lokal verursacht?
- Welche Rolle spielt die magnetische Struktur beim Transport mechanischer Energie?
- Wie taucht magnetischer Fluss an der Oberfläche der Sonne auf und wie wird er von dort wieder entfernt?
- Gibt es einen „lokalen“, d.h. vom zyklischen Dynamo unabhängigen, Dynamo nahe der Oberfläche auf der Skala der Granulation?
- Welche Prozesse bestimmen die komplexe Strukturierung von Sonnenflecken? Auf welche Weise wird die Energie im dunklen Kern (Umbra) und in der faserigen Peripherie (Penumbra) eines Sonnenflecks transportiert?

bei bodengebundenen Teleskopen aufgrund der Luftunruhe aufwändige Bildrekonstruktionsverfahren und Methoden der adaptiven Optik. Eine sichere Ausschaltung atmosphärischer Einflüsse auf höchstauflösende Messungen kann durch den Einsatz von weltraumgestützten Instrumenten oder von Teleskopen an Stratosphärenballons erreicht werden. Dies erlaubt auch wesentliche spektroskopische Beobachtungen.



Magnetische Kopplung zwischen Photosphäre und Chromosphäre am Beispiel eines mit dem Vakuum-Turm-Teleskop am Observatorio del Teide, Teneriffa, beobachteten Ausschnitt der Sonnenatmosphäre von etwa  $12000 \times 20000 \text{ km}^2$  Ausdehnung. *Links*: das Konvektionsmuster der Granulation in der Photosphäre mit räumlich nicht aufgelösten Aufhellungen von etwa 150 km Durchmesser, die von Magnetfeldkonzentrationen verursacht werden. *Mitte*: zeitgleich das selbe Gebiet im Flügel der Fraunhofer-Linie  $H_\alpha$  des Wasserstoffs. Hier werden Strukturen in der Chromosphäre sichtbar. Die Aufhellungen sind wiederum Indikatoren für Magnetfelder und mit den entsprechenden Strukturen in der Photosphäre verbunden. Die dunklen, fadenartigen Gebilde sind chromosphärisches Plasma, das in die Korona geschleudert wurde und dunkel erscheint, weil es das von unten kommende Licht teilweise absorbiert. Die Materiebewegung folgt den magnetischen Feldlinien. *Rechts*: ein noch höherer Teil der Chromosphäre im Zentrum der  $H_\alpha$ -Linie, der von dynamischen, magnetisch bedingten Strukturen dominiert wird (Universitäts-Sternwarte Göttingen).

### 4.3 Heiß und kalt zugleich: die dynamische Chromosphäre

Die Chromosphäre stellt das Bindeglied zwischen der Photosphäre und der Korona dar, deren Energetik und Dynamik nur zusammen mit der darunter liegenden chromosphärischen Struktur verstanden werden kann. Während konvektive Strömungen und die Abstrahlung des Großteils der Sonnenenergie in den Weltraum weitgehend die Struktur und Dynamik der Photosphäre bestimmen, spielen in der darüber liegenden Chromosphäre das Magnetfeld und akustische Wellen, die sich zu Stoßwellen aufteilen, die zentrale Rolle. Zusammen mit Strahlungsprozessen in Spektrallinien und der Bildung und Dissoziation von Molekülen wie CO führt dies zu einer extremen Strukturierung mit zeitlich dauernd veränderlichen Mustern von Stoßwellen und der Koexistenz von heißer ( $> 10^4 \text{ K}$ ) und vergleichsweise kühler Materie ( $< 3000 \text{ K}$ ). Das heiße Plasma findet sich vorwiegend in einer Netzwerkstruktur, die weitgehend mit der Verteilung des photosphärischen Magnetfeldes übereinstimmt. Wie dieses Plasma, das für den überwiegenden Teil der Variabilität der Sonne im UV-Bereich verantwortlich ist, geheizt wird, ist nicht verstanden. Der räumliche Zusammenhang mit dem Magnetfeld spricht für Prozesse wie magneto-hydrodynamische Wellen oder die Dissipation von Strömen, die

durch die ständige „Fußpunktbewegung“ der Magnetfelder in der Photosphäre getrieben werden.

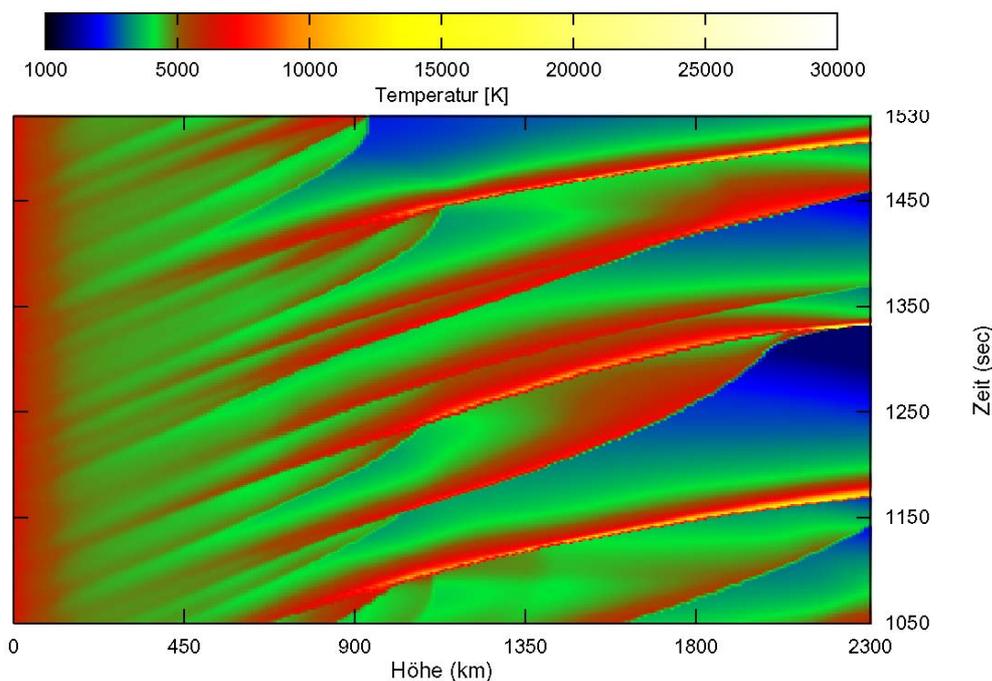
Eine Lösung dieser Probleme erfordert die gleichzeitige spektroskopisch-polarimetrische Beobachtung von Photosphäre und Chromosphäre auf den charakteristischen Skalen ihrer magnetischen Struktur. Um solche Daten schlüssig interpretieren zu können, wird es notwendig sein, den Höhenbereich der numerischen 3D-Simulationen von Magneto-Konvektion in die chromosphärischen Schichten zu erweitern. Dazu muss in den Computerprogrammen erheblicher methodischer Entwicklungsaufwand für eine Erweiterung des Strahlungstransports hinsichtlich der Abstrahlung durch die chromosphärischen Spektrallinien aufgebracht werden.

### Offene Fragen im Bereich Chromosphäre

Übergreifende Frage: **Wie vermittelt die Chromosphäre den Strom mechanischer Energie von der Photosphäre in die Korona?**

Daraus resultierende Einzelfragen, z.B.:

- Wie koexistieren heiße und kühle Gebiete?
- Wie beeinflusst das dynamische photosphärische Magnetfeld die Chromosphäre?
- Wie wird solares Plasma fraktioniert und in die Korona eingespeist?
- Welche Rolle spielen Stromschichten und Feldlinien-Rekonnexion?
- Welche Arten von Wellen werden angeregt? Wie viel Energie transportieren sie dabei in die Korona? Wo wird die Energie deponiert?



Eng benachbarte heiße und kalte Gebiete in der Chromosphäre können durch akustische Wellen hervorgerufen werden, die in der Konvektionszone der Sonne entstehen. Das hier gezeigte Zeit-Höhen-Diagramm der Temperatur ist das Ergebnis einer eindimensionalen numerischen Simulation. Am Boden der Photosphäre (0 km Höhe) startet eine Überlagerung von Schallwellen verschiedener Frequenzen, die durch die Chromosphäre nach oben laufen und sich dabei zu Stoßfronten aufsteilen. Dadurch bilden sich eng begrenzte heiße Gebiete und ausgedehnte kühlere Regionen. Die heißen Gebiete (hellrot und gelb-weiß eingefärbte Flächen) geben den Weg der Stoßfronten durch die Atmosphäre wieder, wobei etliche dieser Fronten unterwegs miteinander verschmelzen (Institut für Theoretische Astrophysik, Universität Heidelberg).

## 4.4 Korona und Sonnenwind: kosmisches Labor für die Plasmaphysik

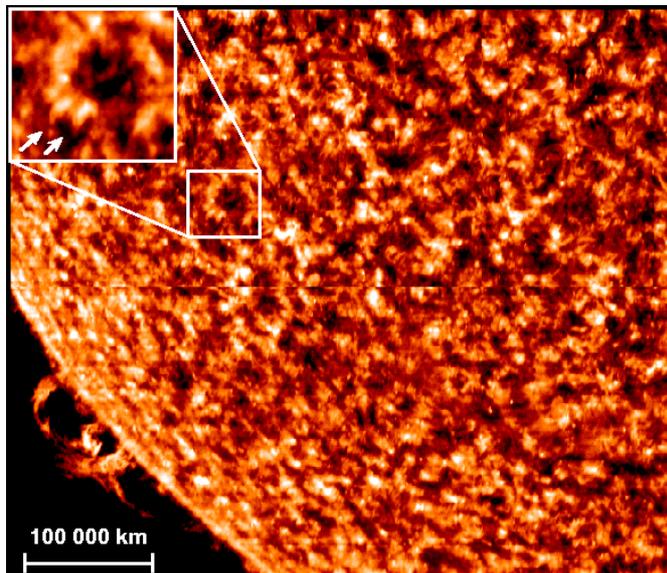
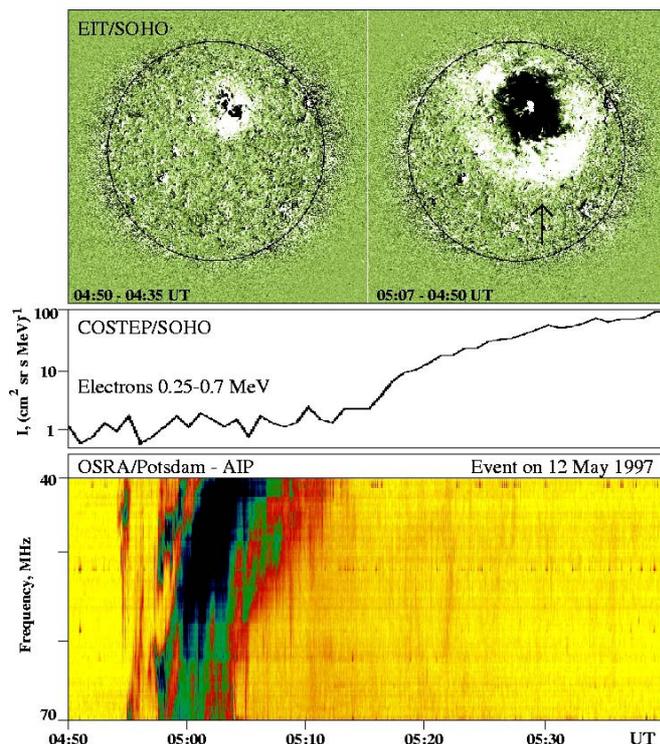
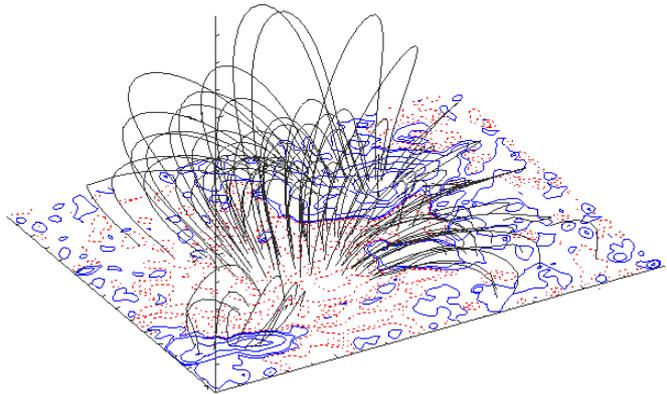
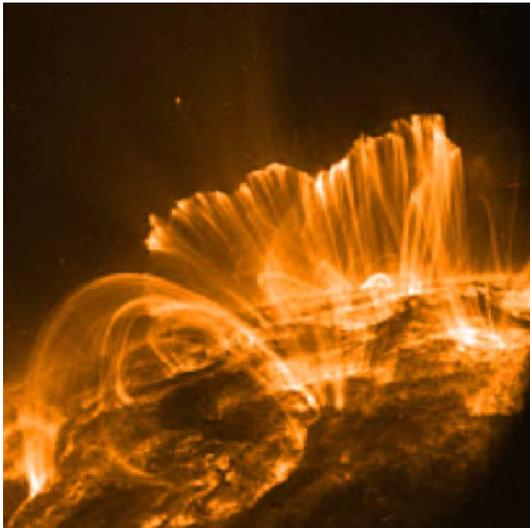


Bild der Sonne im Licht des vierfach ionisierten Kohlenstoffs bei einer Wellenlänge von 97.7 nm. Hier wird das Plasma in der Übergangsregion zwischen Chromosphäre und Korona bei einer Temperatur von etwa 80000 K sichtbar. Die netzartige Struktur spiegelt konzentrierte Magnetfelder wider. Eine Netzwerkzelle ist links oben vergrößert dargestellt. Durch Pfeile sind zwei kleine kühle magnetische Bögen hervorgehoben. Solche Bögen von unter 5000 km Länge stellen Grundbausteine der Übergangsregion über dem Netzwerk dar. Links unten ist eine Protuberanz sichtbar, relativ kühle Materie, die in die heiße Korona eingebettet ist. Die Aufnahme wurde mit dem EUV-Spektrometer SUMER auf SOHO gewonnen (Max-Planck-Institut für Aeronomie und Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik).

Die durch die Weltraummissionen Yohkoh, SOHO, TRACE und RHESSI gewonnenen Erkenntnisse haben unser Bild von der Korona und der Übergangszone zur Chromosphäre stark verändert. Die magnetischen Strukturen zeigten eine unerwartete Vielfalt und große Dynamik über einen ausgedehnten Bereich räumlicher Skalen, bis hin zu Strukturen an der Auflösungsgrenze der Instrumente bei etwa 1000 km. Es wurden Temperaturunterschiede von bis zu einem Faktor 100 zwischen den verschiedenen Komponenten des koronalen Plasmas (Elektronen, Protonen, schwere Ionen) gefunden, die darauf hinweisen, dass kinetische Prozesse eine große Rolle spielen. Dies eröffnet eine neue Dimension für die Erforschung der Korona: Plasmakinematik und Thermodynamik fern vom Gleichgewicht müssen im Zusammenhang mit dem Magnetfeld und den Strahlungsprozessen betrachtet werden.



Infolge eines Flares am 12. Mai 1997 wurde eine gigantische kreisförmige Welle auf der Sonne beobachtet. Auf den beiden oberen Bildern, die durch das EIT-Instrument auf SOHO gewonnen wurden, sieht man die Ausbreitung dieser Welle über die Sonnenoberfläche in der Zeit zwischen 04:35 bis 05:07 UT (Weltzeit). Das gleichzeitig gemessene Radiospektrum (unten) zeigt von 04:55 bis 05:12 UT eine erhöhte solare Radiostrahlung, die von höheren Frequenzen (70 MHz) zu niedrigeren (40 MHz) driftet. Das weist auf die Bildung einer Stoßwelle hin, die sich durch die Korona in den interplanetaren Raum ausbreitet, wobei die Radiostrahlung bei 70 MHz und 40 MHz in der mittleren, bzw. oberen Korona emittiert wird. Gleichzeitig werden hochenergetische Elektronen in der Korona erzeugt, wie die Messungen (Mitte) mit dem Instrument COSTEP auf SOHO zeigen (Bild oben: ESA/NASA; Bild Mitte: Institut für Experimentelle und Angewandte Physik, Universität Kiel; Bild unten: Astrophysikalisches Institut Potsdam).

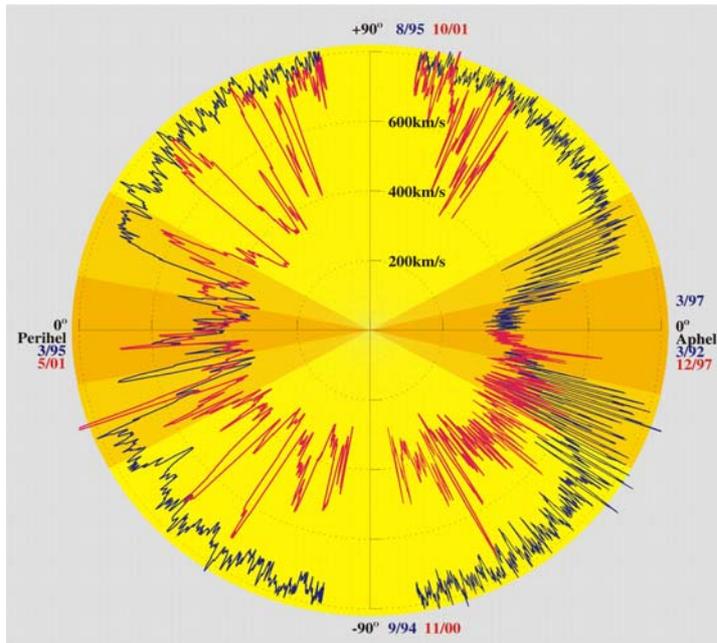


*Links:* Arkade von etwa 70000 km hohen Bögen in der Korona nach einem Flare, aufgenommen vom Satelliten TRACE. Eine Million Grad heißes Plasma, gefangen im Magnetfeld, leuchtet hier im ultravioletten Spektralbereich. Die Bögen heben sich in ihrer Helligkeit so deutlich von ihrer Umgebung ab, da sie Plasma von höherer Dichte enthalten, das während des Flares aus der Chromosphäre „verdampft“ wurde. Das Bild zeigt Strukturen bis hinunter zur Auflösungsgrenze des Instruments von etwa 1000 km.. Die Dynamik des sich ständig verändernden Magnetfeldes steht wahrscheinlich in engem Zusammenhang mit der Heizung der Korona. *Rechts:* Auf der Grundlage von Magnetfeldmessungen in der Photosphäre extrapoliertes Magnetfeld in der Korona für eine ähnliche Situation wie im linken Bild. Durch den Vergleich der Feldlinien mit im ultravioletten Licht beobachteten Bögen können Rückschlüsse auf die Magnetfeldstruktur in der Korona gezogen werden. Die Magnetfeldmodelle können in Zukunft durch die gleichzeitige Messung des Feldes in der Photosphäre und der Chromosphäre noch wesentlich verbessert werden (Bild links: NASA, Bild rechts: Astrophysikalisches Institut Potsdam).

Theoretische Überlegungen und Extrapolationen des in der Photosphäre gemessenen Feldes zeigen, dass das Magnetfeld die Dynamik der Korona dominiert, die Ursache für ihre filigrane Strukturierung ist und die Energie für koronale Massenauswürfe und Flares bereitstellt. Die Prozesse, durch welche gespeicherte Magnetfeldenergie bei Flares fast instantan in Wärme, Massebewegungen und Teilchenenergie umgewandelt und ein das ganze elektromagnetische Spektrum umfassender Strahlungsblitz erzeugt werden, sind bisher sehr unzureichend verstanden. Ebenso unklar ist, wie koronale Massenauswürfe ausgelöst und getrieben werden. Beiden Phänomenen liegt eine Instabilität der magnetischen Konfiguration in der jeweiligen aktiven Region zu Grunde. Einem tiefer greifenden Verständnis der Dynamik des koronalen Magnetfeldes und seiner komplexen Topologie steht aber entgegen, dass es bisher nicht direkt gemessen werden kann. Neue Ansätze für eine quantitative Bestimmung des koronalen Magnetfeldes sind eine Herausforderung für zukünftige Weltraummissionen (UV-Polarimetrie) und für bodengebundene Teleskope (Infrarotmessungen, Radiointerferometrie).

Der Sonnenwind bildet ein einzigartiges Labor zum Studium magnetohydrodynamischer Wellen und Turbulenz. Er ist der einzige Sternwind, in dem mittels in-situ-Messungen kinetische Untersuchungen an Verteilungsfunktionen von Protonen, Alphateilchen, schweren Ionen und Elektronen vorgenommen werden können, so dass auf diese Weise indirekt auch die Plasmaprozesse in der Korona sowie Effekte von interplanetaren Transportvorgängen studiert werden können.

Die Quellen des schnellen Sonnenwindes sind die magnetisch offenen „Koronalöcher“, die zu Zeiten von Aktivitätsminima großflächig die Polkappen bedecken. Der schnelle Wind erfüllt dann bis auf einen Äquatorgürtel von ca. 30° Breite die gesamte Heliosphäre. Durch Messungen mit dem SUMER-Spektrometer auf SOHO wurde gefunden, dass der schnelle Sonnenwind sehr tief entsteht, nämlich im



Die Sonnenwindgeschwindigkeit als Funktion der heliographischen Breite nach Messungen von der Weltraumsonde *Ulysses*, aufgetragen als Polardiagramm. Während des Aktivitätsminimums weht überwiegend ein gleichmäßiger, schneller Sonnenwind mit etwa 800 km/s, der einen äquatornahen Gürtel unruhigen und langsameren Windes umgibt (blaue Kurve). In Phasen hoher Sonnenaktivität findet man eine unregelmäßige Verteilung schneller und langsamer Sonnenwindströme (rote Kurve). Dies spiegelt die Veränderung der Magnetfeldgeometrie wider: während im Aktivitätsminimum ein dipolartiges Feld mit offenen Feldlinien vorherrscht, entsteht im Aktivitätsmaximum eine komplexe Multipolstruktur, die überwiegend magnetisch geschlossene Gebiete aufweist (Max-Planck-Institut für Aeronomie).

magnetischen Netzwerk der Übergangszone zwischen Chromosphäre und Korona. Ein solcher Zusammenhang war vorher auf Grund von in-situ-Messungen von Ionenhäufigkeiten vorausgesagt worden. Bei maximaler Sonnenaktivität strömt in fast alle Richtungen langsamer Wind ab, mit nur wenigen schnellen Strömen aus kleinen, isolierten Koronalöchern. Der Ursprung des langsamen Sonnenwindes in der stark strukturierten und magnetisch überwiegend geschlossenen Korona ist noch weitgehend unklar. Er ist sehr variabel und wird möglicherweise durch magnetische Rekonnexion zwischen Bögen und lokal offenen Feldern ermöglicht, durch welche einzelne Plasmablasen frei abströmen können.

Messungen im Sonnenwind erlauben die präzisesten Messungen der chemischen Zusammensetzung der Sonne. Die äußere Konvektionszone der Sonne kann als Probe der ursprünglichen Zusammensetzung des präsolaren Nebels, aus dem das Sonnensystem entstanden ist, betrachtet werden. Dieses Material wird über die Chromosphäre in die Korona und den Sonnenwind eingespeist. Dabei wird das Material teilweise fraktioniert. Ein Vergleich mit photosphärischen und meteoritischen Messungen erlaubt somit Rückschlüsse auf die Fraktionierungs- und Beschleunigungsmechanismen in der äußeren Sonnenatmosphäre. Ein detailliertes Verständnis dieser Prozesse ist wiederum grundlegend für eine genaue Bestimmung der Zusammensetzung der Sonne.

### Korona und Sonnenwind

Übergreifende Fragen: **Wie wird die Korona geheizt und der Sonnenwind beschleunigt? Welche Prozesse setzen plötzlich magnetische Energie frei?**

Daraus resultierende Einzelfragen, z.B.:

- Wie stark ist das Magnetfeld in den verschiedenen Gebieten und Strukturen der Korona und wie ist es gerichtet?
- Wo und wie werden die verschiedenen Typen des Sonnenwindes erzeugt?
- Wodurch werden Flares und koronale Massenauswürfe ausgelöst?
- Welche Prozesse führen bei Flares zur abrupten Freisetzung großer Mengen von magnetischer Energie?
- Wie werden Teilchen innerhalb kurzer Zeiten auf hohe Energien beschleunigt?
- Welche Bedeutung haben kinetische Plasma-Prozesse im Vergleich zur Heizung durch Wellenabsorption und Stromdissipation?

## 4.5 Wirkung auf die Erde: „Weltraumwetter“ und Erdklima

Der Begriff „Weltraumwetter“ umfasst alle Bedingungen auf der Sonne, im Sonnenwind, der Erdmagnetosphäre, der Ionosphäre und der Thermosphäre, die Einfluss auf Satelliten und andere technologische Systeme sowie auf menschliches Leben ausüben. Unter diesem Schlagwort ist in den letzten Jahren ein spezieller Bereich der Weltraumforschung entstanden. Ziel ist es, die physikalischen Mechanismen zu verstehen, die den von der Sonne ausgehenden Wirkungen zu Grunde liegen, und potentiell bedrohliche Ereignisse auf der Sonne vorherzusagen oder zumindest so rechtzeitig zu erkennen, dass geeignete Schutzmaßnahmen getroffen werden können. Hier hat es vor allem durch die SOHO-Mission erhebliche Fortschritte gegeben, da deren Instrumente die Sonne praktisch ohne Unterbrechung überwachen. Es gibt erste Ansätze, um auf die Erde gerichtete koronale Massenauswürfe frühzeitig zu erkennen und ihre voraussichtliche Laufzeit zur Erde abzuschätzen. Die Vorhersage energetischer Ereignisse auf der Sonne mit längerer Vorlaufzeit ist das langfristige Ziel dieser Forschung. Satelliten und Astronauten sind vor allem durch die damit verbundenen hochenergetischen Teilchen gefährdet.

Statistische Betrachtungen deuten an, dass die Sonne in der Vergangenheit einen deutlichen Einfluss auf die Variabilität des Erdklimas auf Zeitskalen von Jahrzehnten und länger hatte. Mögliche Wirkmechanismen reichen dabei von der Variabilität der Gesamtstrahlung und der Schwankung der UV-Strahlung bis zur Modulation der galaktischen kosmischen Strahlung, sind allerdings im Einzelnen wenig verstanden. Dies liegt unter anderem daran, dass direkte Messdaten für diese Größen erst seit wenigen Jahrzehnten vorliegen. Anstrengungen werden deshalb unternommen, um die entsprechenden Größen auf der Basis von anderen Daten (z.B. Sonnenfleckenzahlen oder Isotopenhäufigkeiten im polaren Eis) in der Vergangenheit zu rekonstruieren und mit Klimadaten zu vergleichen.

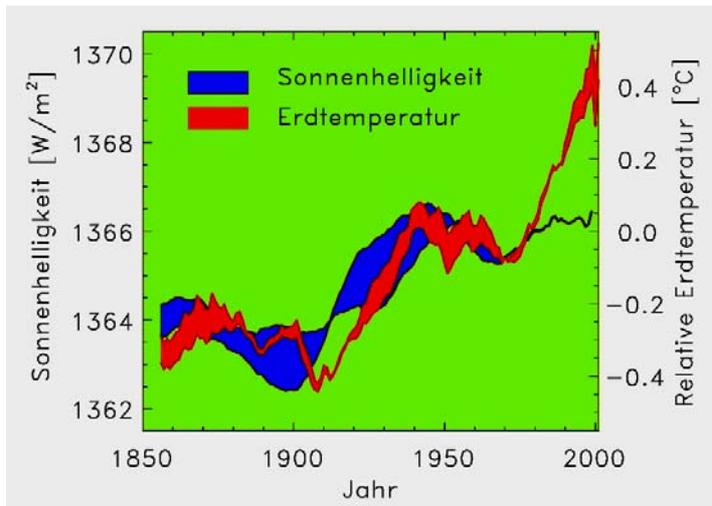
Die Variabilität der Sonne auf allen bekannten Zeitskalen ist durch die Schwankungen ihres Magnetfeldes bedingt. Dies reicht von kurzfristigen Variationen in aktiven Gebieten über den 11-jährigen Zyklus bis zu langfristigen Modulationen und ausgedehnten Aktivitätsminima wie dem Maunder-Minimum im 17. Jahrhundert, während dessen die Sonnenflecken für etwa 60 Jahre fast ganz verschwanden. Das Maunder-Minimum fiel mit dem Höhepunkt der „kleinen Eiszeit“ mit extrem kalten Wintern in Europa zusammen. Für eine Vorhersage der zukünftigen Entwicklung der magnetischen Aktivität und ihres Einflusses auf das Erdklima ist es notwendig, den gesamten Lebenszyklus des solaren Magnetfeldes von seiner Erzeugung im Dynamo am Boden der Konvektionszone über den Aufstieg und Ausbruch an der Sonnenoberfläche bis zur Korona und Heliosphäre quantitativ zu verstehen. Dies stellt eines der zentralen Ziele der Sonnen- und Heliosphärenforschung dar.

### Offene Fragen im Bereich Wirkung auf die Erde

Übergreifende Fragen: **Wie stark und auf welchen Wegen beeinflusst die veränderliche Sonne das Erdklima? In welchem Maße kann das „Weltraumwetter“ vorhergesagt werden?**

Daraus resultierende Einzelfragen, z.B.:

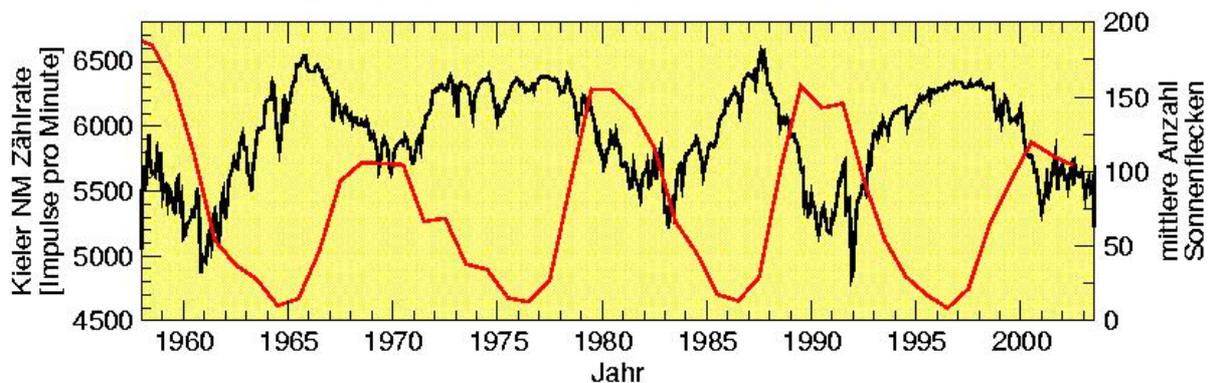
- Welche solaren Größen sind für das Erdklima von Bedeutung?
- Wie haben sich diese Größen in der Vergangenheit verändert? Kann man ihre zukünftige Entwicklung vorhersagen?
- Welche solaren Ereignisse führen zu potentiell gefährlichen Störungen im erdnahen Weltraum und wie werden die damit verbundenen hochenergetischen Teilchen beschleunigt?
- Wie breiten sich die durch Flares und koronale Massenauswürfe hervorgerufenen Störungen in der Heliosphäre aus?



Langfristige Entwicklung der Gesamteinstrahlung der Sonne auf die Erde (blau; seit 1978 direkte Messung, davor rekonstruiert aus Sonnenflecken- und Fackeldaten) und der globalen Erdtemperatur (rot). Die Flächen zwischen den Kurven geben die jeweiligen Unsicherheiten an. Die weitgehend parallelen Verläufe vor 1980 weisen auf einen wesentlichen Einfluss der Sonne hin. Danach dominieren offenbar andere Faktoren die Klimaentwicklung (Max-Planck-Institut für Aeronomie).

#### 4.6 Die Heliosphäre: Schutzschild gegen das interstellare Medium

Zentrales Forschungsziel ist das Verständnis der großräumigen Struktur und Dynamik der Heliosphäre, ihrer Wechselwirkung mit dem sie umgebenden interstellaren Medium, sowie ihrer Schutzfunktion für planetare Umwelten. Von besonderem Interesse ist dabei die Wirkung auf die Erde, die das Klima auf Zeitskalen von Jahrhunderten bis zu Jahrtausenden beeinflussen kann. Mögliche Mechanismen sind eine verstärkte Wolkenbildung infolge eines erhöhten Flusses kosmischer Strahlung oder auch die Veränderung der Atmosphärenchemie durch vermehrten Einstrom von Neutralatomen. Wegen der heliosphärischen Modulation dieser Teilchenflüsse ist für deren Beschreibung die Kenntnis der zeitlich und räumlich veränderlichen Heliosphärenstruktur erforderlich.



Die galaktische kosmische Strahlung erzeugt in der oberen Erdatmosphäre Elementarteilchen, welche am Boden nachgewiesen werden können. Der Kieler Neutronenmonitor misst diese Teilchen seit 1957 (schwarze Kurve); dies stellt weltweit eine der längsten Zeitreihen solcher Messungen dar. Die Intensität der kosmischen Strahlung ist mit der mittleren Anzahl von Sonnenflecken (rote Kurve) antikorreliert, weil das Magnetfeld in der Heliosphäre die kosmische Strahlung in Zeiten hoher solarer Aktivität besser abschirmt. Die kleine zeitliche Verschiebung zwischen der Sonnenfleckenanzahl und der Intensität der kosmischen Strahlung resultiert aus der Zeit, die der Sonnenwind braucht, um Veränderungen des Magnetfeldes über die Heliosphäre zu verbreiten (Institut für Experimentelle und Angewandte Physik, Universität Kiel).

Die physikalischen Bedingungen in der Heliosphäre können durch in-situ Messungen der verschiedenen Teilchenpopulationen bestimmt werden. Diese Messungen zielen auch auf ein tieferes Verständnis von grundlegenden Plasmaprozessen ab, da die heliosphärischen Plasmakomponenten unter im Labor nicht herstellbaren Bedingungen beobachtet werden können. Wesentlicher Fortschritt wird in Zukunft

mit der direkten Messung des Sonnenwindes und der kosmischen Strahlung bei höheren heliographischen Breiten und der Messung von energetischen Elektronen und Positronen möglich sein. Eine der bisher unbeantworteten Kernfragen ist dabei, wie sich die energetischen Teilchen quer zum mittleren heliosphärischen Magnetfeld bewegen. Dies spielt eine besondere Rolle im Hinblick auf die Tatsache, dass der Transport der energetischen Teilchen dazu verwendet werden kann, Aussagen über die magnetische Struktur der Heliosphäre zu gewinnen.

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt wird das Studium des Übergangs von der Heliosphäre in das interstellare Medium sein. Ein Verständnis der Struktur dieser Grenzregion ist wichtig, um von der in der inneren Heliosphäre gemessenen Zusammensetzung der verschiedenen Teilchenpopulationen auf die des interstellaren Mediums zu schließen. Dieses wird bei seinem Eindringen in die Heliosphäre durch Ionisation in der Grenzschicht elementspezifisch "filtriert". Wegen der raschen Ionisation der Teilchen in der inneren Heliosphäre erfordert dies Messungen bei großen heliozentrischen Abständen. Eine zentrale Rolle wird dabei die kombinierte Messung der Zusammensetzung der verschiedenen interstellaren Komponenten spielen. Die auf diese Weise zu gewinnende Kenntnis der Zusammensetzung des lokalen interstellaren Mediums ist wesentlich für das Verständnis der chemischen Entwicklung der Milchstrasse und anderer Galaxien.

#### Offene Fragen im Bereich Heliosphäre

Übergreifende Frage: **Wie ist die Heliosphäre strukturiert und wie verändert sie sich in der Zeit? Welche Wechselwirkung gibt es zwischen der Heliosphäre und dem lokalen interstellaren Medium?**

Daraus resultierende Einzelfragen, z.B.:

- Welche globale Form, Stärke und Variation hat das heliosphärische Magnetfeld?
- Wie erfolgen Transportprozesse für energiereiche Teilchen im Sonnenwind als Beispiel für ein turbulentes, magnetisiertes, stoßarmes Plasma?
- Wie erfolgt der Übergang des Sonnenwindes in das interstellare Medium?
- Welche Eigenschaften haben Astrosphären anderer Sterne?

## 4.7 Sonne und Heliosphäre als gekoppeltes System

Um die in den vorausgehenden Abschnitten aufgeworfenen Fragen zu beantworten, muss in den meisten Fällen der Zusammenhang zwischen den Teilgebieten betrachtet werden. Das betrifft sowohl die Teilchenströme, die das System Sonne/Heliosphäre durchsetzen (z.B. Sonnenwind und kosmische Strahlung), als auch das Magnetfeld, welches die einzelnen Schichten und Bereiche miteinander dynamisch und energetisch koppelt.

Ein Beispiel soll dies illustrieren. Am Boden der Konvektionszone wird durch den Dynamoprozess kinetische Energie, die in konvektiven Strömungen und differentieller Rotation enthalten ist, in magnetische Energie umgewandelt. Bei Überschreitung einer kritischen Feldstärke wird das Feld instabil, magnetische Flussbögen steigen durch die Konvektionszone auf und brechen schließlich durch die Sonnenoberfläche, wo sie Sonnenflecken und magnetisch aktive Regionen bilden. Mit ihren oberen Teilen reichen diese Bögen bis in die Korona hinein, sind aber weiterhin unterhalb der Sonnenoberfläche verankert, wo sie mit der Konvektion wechselwirken. Kinetische Energie wird ins Magnetfeld überführt, indem sowohl die Feldlinien verdreht und verspannt als auch Wellen angeregt werden. Die Dissipation dieser mechanischen Energie in der Korona führt zur Aufheizung des Plasmas. Bei diesen dynamischen Prozessen können sich Feldlinien verschiedener Richtung stark annähern, Stromschichten bilden und sich dabei neu verbinden (magnetische

Rekonnexion), was unter anderem zur Freisetzung magnetischer Energie in Flares führen kann. Auf diese Weise kann ein Teil des heißen Plasmas dem magnetischen Einschluss entkommen und zum langsamen Sonnenwind beitragen. Gleichzeitig werden in der Sonnenatmosphäre und im interplanetaren Raum geladene Teilchen auf hohe Energien beschleunigt. Diese wiederum können Rückwirkungen auf Magnetfeldfluktuationen haben. Insgesamt kann man somit feststellen, dass durch das Magnetfeld alle Schichten vom Boden der Konvektionszone bis zum Rand der Heliosphäre dynamisch miteinander verbunden werden.

#### **4.8 Das Zusammenspiel von Experiment und Theorie**

In der Sonnen- und Heliosphärenphysik gibt es traditionell eine enge Wechselwirkung zwischen experimentellen (messenden) und theoretischen (rechnenden) Forschungsansätzen. Beispiele sind die gegenseitige Befruchtung von solarer Spektroskopie und der Theorie der Atomstruktur und des Strahlungstransports, die Wechselbeziehung zwischen Plasmatheorie und Messungen der Plasmaparameter in der Heliosphäre sowie die enge Verknüpfung zwischen der (Magneto-)Hydrodynamik und der Messung konvektiver Strömungen und magnetischer Strukturen in Photosphäre und Chromosphäre. Die spektakulären Erfolge der Helioseismologie wären ohne die Verzahnung zwischen den hochpräzisen Messungen der solaren Eigenschwingungen und den detaillierten theoretischen Modellrechnungen des inneren Aufbaus der Sonne nicht möglich gewesen.

Einen Zwischenbereich stellen die methodischen Entwicklungen zur Datenanalyse (beispielsweise Inversionsmethoden und tomographische Methoden) und die numerischen Simulationen dar. Einerseits werden hier theoretische/mathematische Ansätze verfolgt, andererseits werden diese aber unmittelbar auf Messdaten angewandt bzw. mit solchen verglichen. Räumlich und zeitlich hochauflösende Messungen mit zukünftigen Instrumenten und die geplanten simultanen Beobachtungen der Wechselwirkung zwischen den verschiedenen Schichten enthalten die gesuchte physikalische Information fast immer in Form von Integralen über die jeweiligen Größen, so dass es für ihre Analyse komplexer Inversionsmethoden und des Vergleichs mit numerischen Simulationen bedarf, um die physikalischen Prozesse aus den Messdaten zu destillieren. Der Bereich Datenanalyse/Simulation entwickelt sich so einerseits zu einer eigenständigen Teildisziplin, die eine das gesamte Gebiet stimulierende Verbindung zwischen den traditionellen Bereichen Theorie und Experiment/Beobachtung herstellt.

## 5. Forschungsziele und Projekte

Um die in der Sonne und Heliosphäre ablaufenden Prozesse zu verstehen, bedarf es verschiedenartiger Instrumente und Vorgehensweisen, da die physikalischen Parameter und die relevanten Beobachtungsgrößen stark variieren. Dies trifft insbesondere zu, wenn man die zentrale Frage nach der magnetischen Kopplung des gesamten Systems untersuchen möchte. Dabei kann es kein einzelnes „Schlüsselexperiment“ geben, sondern es muss vielmehr eine Reihe von aufeinander abgestimmten Instrumenten eingesetzt werden. Wiederum andere Experimente und Methoden sind erforderlich, um den Einfluss der Sonne auf die Erde und den erdnahen Weltraum zu erforschen. In den folgenden Abschnitten werden die wichtigsten Ziele beschrieben, auf die sich die Erforschung von Sonne und Heliosphäre in Deutschland in den nächsten 10 Jahren konzentrieren wird. In diesem Zusammenhang werden solche geplanten oder im Aufbau befindlichen Projekte für bodengebundene und weltraumbasierte Instrumente dargestellt, an denen Arbeitsgruppen oder Institute in Deutschland beteiligt sind oder eine Beteiligung anstreben.

### 5.1 Das Innere der Sonne: Konvektion, Rotation, Dynamo

Die Wechselwirkung von Konvektion, Magnetfeld und Rotation im Sonneninneren ist ein zentrales Forschungsthema. Durch eine Kombination von theoretischen Ansätzen (vereinfachte Modelle und numerische Simulationen) und helioseismologischen Messungen sollen der Ursprung der differentiellen Rotation der Sonne und die Entstehung ihres Magnetfeldes in einem selbsterregten Dynamoprozess quantitativ verstanden werden. Auf der Seite der Theorie wird man dazu die Entwicklung und den umfassenden Einsatz von Programmcodes zur dreidimensionalen, zeitabhängigen Simulation von magnetohydrodynamischen Vorgängen im Sonneninnern forcieren. Lokale Helioseismologie wird die Messung der Strömungen und Magnetfelder in der Dynamoregion am Boden der Konvektionszone ermöglichen, so dass ein direkter Test von Modellen vorgenommen werden kann.

Für helioseismologischen Untersuchungen ist ein guter Zugang zu den besten Datensätzen notwendig. Solche Daten werden vom *Solar Dynamics Observatory* (SDO) und vom *Solar Orbiter* (beides siehe Abschnitt 5.3) sowie von bodengebundenen Beobachtungsnetzwerken erwartet. Die ESA-Mission *Eddington* (siehe Abschnitt 5.6) wird darüber hinaus das Gebiet der Asteroseismologie, d.h. die Untersuchung von Sternen mit Methoden der Helioseismologie, revolutionieren.

### 5.2 Magnetische Struktur und Dynamik der Atmosphäre

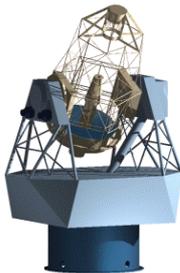
Das übergeordnete Forschungsziel in diesem Bereich ist es, die magnetischen Strukturen in Photosphäre und Chromosphäre als Resultat der Wechselwirkung des Magnetfelds mit den konvektiven Strömungen und dem Strahlungsfeld zu verstehen. Die Strukturierung wirkt sich auf die Abstrahlung der Energie und den Transport von mechanischer Energie in die obere Atmosphäre aus. Dies hat direkte Folgen für die Helligkeitsschwankungen der Sonne, für die Heizung der oberen Atmosphäre und für die Beschleunigung des Sonnenwindes. Um die magnetische Kopplung der Sonnenatmosphäre zu verstehen bedarf es der Untersuchung der Dynamik des Magnetfeldes auf seinen charakteristischen Skalen im Bereich von 100 km und darunter. In Deutschland werden gegenwärtig zwei größere Projekte (*Sunrise* und *GREGOR*) vorangetrieben, um dies zu erreichen. In der logischen Folge dieser Projekte liegen entsprechende Beteiligungen an der ESA-Mission *Solar Orbiter* und am amerikanischen Projekt *ATST*, einem Sonnenteleskop von 4 m Öffnung, das ab 2012 weltweit die bodengebundene Sonnenbeobachtung dominieren wird.

### **Sunrise** (<http://www.linmpi.mpg.de/english/projekte/sunrise>)



Mit dem Ballonteleoskop **Sunrise** (unter Führung des Max-Planck-Instituts für Aeronomie, mit umfangreichen Beteiligungen des Kiepenheuer-Instituts für Sonnenphysik sowie spanischer und US-amerikanischer Partner) sollen spektropolarimetrische Messungen im sichtbaren und ultravioletten Spektralbereich bis hinunter zu 200 nm Wellenlänge durchgeführt werden. Dazu wird ein Teleskop von 1 m Öffnung in ca. 40 km Höhe an einem Stratosphärenballon betrieben, um die Turbulenz und die UV-Absorption der unteren Erdatmosphäre zu vermeiden und zu beugungsbegrenzter Abbildung zu kommen. Die erreichbare räumliche Auflösung beträgt etwa 30 km bei 200 nm Wellenlänge. Damit werden erstmals die charakteristischen Skalen der magnetischen Struktur in der Sonnenatmosphäre und die magnetische Kopplung zwischen Photosphäre und Chromosphäre der direkten Messung zugänglich. Für den Winter 2006/07 ist ein erster Langzeitflug über der Antarktis geplant. **Sunrise** spielt eine wesentliche Rolle bei der Entwicklung von Technologie, die später in Instrumenten für die ESA-Mission **Solar Orbiter** (siehe Abschnitt 5.3) eingesetzt werden soll. Darüber hinaus ist es ein Pilotprojekt für ein späteres weltraumgestütztes **Solar Space Observatory** (siehe Abschnitt 5.6) für die Zeit nach dem **Solar Orbiter** und dient als Demonstrationsmission für den späteren Weltraumeinsatz von optischen Leichtgewichtsspiegeln auf C/SiC-Basis, für die es viele Anwendungen in den Bereichen Astronomie und Erdbeobachtung gibt.

### **GREGOR** (<http://gregor.kis.uni-freiburg.de>)



**GREGOR** ist bodengebundenes Teleskop mit 1.5 m Öffnung zur spektropolarimetrischen Messung der magnetischen Feinstruktur in der solaren Photo- und Chromosphäre. **GREGOR** wird mit einer adaptiven Optik ausgestattet, die eine beugungsbegrenzte räumliche Auflösung ermöglichen wird. **GREGOR** wird zur Zeit am Observatorio del Teide auf Teneriffa errichtet und ist unter der Federführung des Kiepenheuer-Instituts für Sonnenphysik ein Gemeinschaftsprojekt mit der Universitäts-Sternwarte Göttingen und dem Astrophysikalischen Institut Potsdam. Erste Beobachtungen mit **GREGOR** werden ab 2005 möglich sein.

### **ATST** (<http://www.sunspot.noao.edu/ATST>)



Das National Solar Observatory der USA plant mit internationaler Beteiligung das *Advanced Technology Solar Telescope* (**ATST**) mit einer Öffnung von 4 m. Durch seine hohe Lichtstärke in Verbindung mit adaptiver Optik wird es **ATST** ermöglichen, bei der Spektropolarimetrie hohe räumliche mit großer zeitlicher Auflösung zu verbinden, um rasch veränderliche Prozesse auf kleinen Skalen zu untersuchen. Das Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik ist bereits an der Untersuchung möglicher **ATST**-Standorte, der Erarbeitung des wissenschaftlichen Anforderungskataloges und, gemeinsam mit der Universitäts-Sternwarte Göttingen, an der Designstudie für ein Fabry-Perot-Spektrometer beteiligt. **ATST** wird in der „Decadal Study“ der amerikanischen National Academy of Sciences aus dem Jahr 2000 an zweiter Stelle der „Moderate Initiatives“ genannt. Der Betriebsbeginn ist für 2012 vorgesehen.

### 5.3 Sonne und Heliosphäre als gekoppeltes System

Die wissenschaftlichen Herausforderungen bei der Erforschung der äußeren Schichten der Sonnenatmosphäre und des Sonnenwindes liegen in den Bereichen Plasmakinetik, Thermodynamik fernab vom Gleichgewicht, Teilchenbeschleunigung und impulsive Freisetzung magnetischer Energie. Zum Verständnis dieser Prozesse bedarf es sowohl in-situ-Messungen als auch spektroskopischer Fernerkundung und der Analyse der Radioemission energiereicher Teilchen.

Das Magnetfeld der Sonne verbindet alle Schichten vom Boden der Konvektionszone bis zum Rand der Heliosphäre miteinander. Ein zentrales Forschungsziel ist, die Prozesse in ihrem Zusammenhang, von ihren Ursachen in, auf oder in der Nähe der Sonne bis zu ihren Auswirkungen in der Heliosphäre (und nicht zuletzt auf die Erde), zu verstehen. Im Zentrum dieser Anstrengungen stehen die beiden Weltraummissionen *Solar Orbiter* und *SDO*; praktisch werden aber alle Projekte zu dieser vereinheitlichten Sicht der Sonne und der Heliosphäre als eines magnetisch gekoppelten Systems beitragen. Arbeitsgruppen in Deutschland streben eine kleinere Beteiligung an *SDO* und einen substantiellen Beitrag zu den Instrumenten auf *Solar Orbiter*, sowie eine intensive Nutzung der auch für solare Beobachtungen geeigneten neuen Einrichtungen der Radioastronomie an. Letzteres betrifft insbesondere das amerikanische Projekt *Frequency-Agile Solar Radiotelescope (FASR)*, aber auch eine intensive Nutzung der Möglichkeiten, die das *Atacama Large Millimeter Array (ALMA)*, (<http://www.alma.nrao.edu/>) für solare Beobachtungen bieten wird. Das Astrophysikalische Institut Potsdam wird hier koordinierte Messkampagnen (Simultanbeobachtungen mit GREGOR) zur Untersuchung der Übergangsschicht zwischen Chromosphäre und Korona und der Radiostrahlung von hochenergetischen Elektronen in der Korona durchführen.

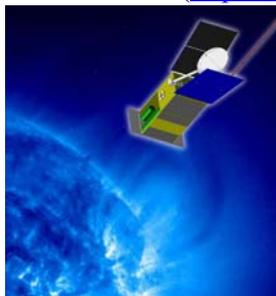
#### **SDO** (<http://sdo.gsfc.nasa.gov>)



Das *Solar Dynamics Observatory (SDO)* ist eine NASA-Mission im Rahmen des Programms „International Living with a Star“ (<http://lws.gsfc.nasa.gov>), an dem auch die ESA beteiligt ist. SDO wird auf einer geostationären Erdumlaufbahn ab 2007 die Sonne für 5 Jahre mit einer Reihe von Instrumenten vom EUV bis zum sichtbaren Spektralbereich mit hoher Zeitauflösung permanent beobachten. Ziel der Mission ist das Verständnis des Zusammenhangs zwischen

dem im Sonneninneren erzeugten Magnetfeld (dessen Ursprung und Dynamik mittels Helioseismologie untersucht wird) und der koronalen Energiespeicherung und -freisetzung in impulsiven und energetischen Ereignissen. Darüber hinaus untersucht *SDO* die Variabilität der kurzwelligen solaren Strahlung und ihre Auswirkungen auf die obere Erdatmosphäre. Das Max-Planck-Institut für Aeronomie plant eine Beteiligung am Bau der abbildenden Instrumente.

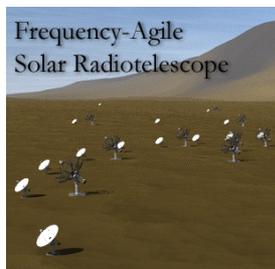
#### **Solar Orbiter** (<http://sci.esa.int/home/solarorbiter>)



*Solar Orbiter* ist die erste Sonnenmission der ESA nach SOHO. Die Sonde soll sich nach ihrem Start 2010-2012 der Sonne bis auf 45 Sonnenradien (etwa 1/5 des Erdbahnradius) nähern und sich dabei von der Ekliptik bis auf 38 Grad heliographischer Breite entfernen. Damit können das Plasma und der Sonnenwind in einer bisher unerreichten Region der sonnennahen Heliosphäre in situ untersucht und erstmals das Magnetfeld an den Sonnenpolen direkt gemessen werden. Während Phasen der

Korotation mit der Sonne wird die Sonde längere Zeit praktisch auf einer magnetischen Feldlinie verbleiben, so dass die Verbindung zwischen der magnetischen Dynamik der tiefen Schichten und den energetischen Ereignissen und Plasmaeigenschaften in der Korona und im Sonnenwind hergestellt werden kann. Der **Solar Orbiter** wird so einen wichtigen Beitrag leisten, um die Mechanismen der magnetischen Kopplung der Sonnenatmosphäre zu klären. Dazu werden zwei Instrumentpakete dienen: eines für heliosphärische in-situ-Messungen und eines für hochauflösende solare Beobachtungen, die vom photosphärischen Magnetfeld über die Dynamik der Korona bis zur Ausbreitung von Massenauswürfen in der Heliosphäre reichen. Das Max-Planck-Institut für Aeronomie und das Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik planen in internationaler Kooperation eine Beteiligung an abbildenden, spektroskopischen und polarimetrischen Instrumenten, wobei für zumindest ein Instrument eine Führungsrolle angestrebt wird. Gemeinsam mit dem Astrophysikalischen Institut Potsdam ist das Institut für experimentelle und angewandte Physik der Universität Kiel maßgeblich an der Definition der Experimente beteiligt und koordiniert bereits jetzt internationale Konsortien für ein Sonnenwind- und ein Teilchenexperiment.

**FASR** (<http://www.ovsa.njit.edu/fasr>)



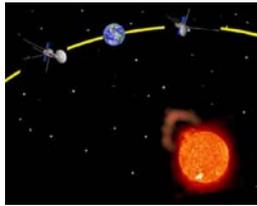
Das *Frequency-Agile Solar Radiotelescope* ist ein US-Projekt mit internationaler Beteiligung. FASR wird die solare Radiostrahlung im Bereich von 0.1-30 GHz mit hoher räumlicher (1 Bogensekunde bei 20 GHz), spektraler ( $df/f = 0.01-0.03$ ) und zeitlicher ( $< 1s$ ) Auflösung messen. Damit können alle Prozesse, die mit energetischen Elektronen verbunden sind, in der Sonnenkorona in bisher ungekannter Qualität beobachtet werden. FASR wird das modernste solare Radioteleskop der kommenden

zwei Jahrzehnte sein. Der Bau von FASR wurde in der amerikanischen „Decadal Study“ empfohlen. Das Instrument soll Ende 2008 fertiggestellt sein und die Messungen werden im Jahre 2009 beginnen. Das Astrophysikalische Institut Potsdam wird sich im Rahmen einer Co-Investigatorschaft an der Entwicklung von Software und der Datenanalyse in der Betriebsphase beteiligen.

## 5.4 Weltraumwetter und solar-terrestrische Beziehungen

Die Auswirkungen der Sonnenaktivität auf technische und natürliche Systeme auf und in der Nähe der Erde ist von beträchtlicher gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Bedeutung. Die Forschungsziele in diesem Bereich reichen vom Verständnis der solaren Ursachen und der terrestrischen Wirkungsmechanismen bis zu einer Vorhersage von Ereignissen. Konkret betrifft dies vor allem die energetischen Ereignisse (Flares, koronale Massenauswürfe und die dabei beschleunigten Teilchen) und den Einfluss der Sonnenaktivität auf das Erdklima. Deutsche Forschergruppen engagieren sich in beiden Bereichen, wobei als wesentliche Projektbeteiligungen die NASA-Missionen **STEREO** und **SDO** (siehe Abschnitt 5.2) zu nennen sind. Darüber hinaus wird das Astrophysikalische Institut Potsdam im Rahmen des Projekts *Low Frequency Array* (<http://www.lofar.org>) an der Datenanalyse im Teilprojekt LOIS (LOFAR Outrigger in Scandinavia), beteiligt sein (<http://www.physics.irfu.se/LOIS>). LOIS wird durch Radarsondierung koronale Plasmastrukturen und insbesondere koronale Massenauswürfe untersuchen. SDO wird mit seinen Instrumenten zur Messung der solaren Strahlung im EUV-Bereich (0.1-125 nm) auch eine wichtige Rolle bei der Erforschung der Einwirkung der Sonnenaktivität auf die obere Erdatmosphäre spielen. Viele dieser Forschungsaktivitäten werden im Rahmen des Programms „International Living With a Star (ILWS)“ durchgeführt.

STEREO (<http://stereo.gsfc.nasa.gov>)



Die NASA-Mission STEREO besteht aus zwei Raumsonden, welche die Sonne aus verschiedenen Sichtwinkeln von der Erdbahn aus beobachten werden. Dadurch wird man die räumliche Struktur der inneren Heliosphäre und insbesondere die zeitliche Entwicklung koronaler Massenauswürfe mittels stereoskopischer und tomographischer Techniken studieren können. Dies erlaubt auch eine frühzeitige Vorhersage, ob und wann ein bestimmtes Ereignis die Erde treffen wird. STEREO wird darüber hinaus gestatten, die Beschleunigung von Teilchen, insbesondere an den Bugstoßwellen koronaler Massenauswürfe, zu untersuchen. An STEREO sind verschiedene deutsche Gruppen beteiligt. Das Max-Planck-Institut für Aeronomie liefert Teile der optischen Instrumente und Programme zur Stereoskopie und Tomographie koronaler Strukturen. Darüber hinaus sind dieses Institut und das Institut für experimentelle und angewandte Physik der Universität Kiel am Bau von Instrumenten zur Messung von Teilchen beteiligt. Die beiden Raumsonden der STEREO-Mission sollen im Jahr 2006 gestartet werden.

## 5.5 Die Heliosphäre als Labor für die Untersuchung energiereicher Teilchen

Das Hauptziel der Heliosphärenforschung in den kommenden Jahren wird es sein, die Heliosphäre als globales System zu betrachten und ihre Struktur, Dynamik und zeitliche Variabilität infolge der Sonnenaktivität zu verstehen. Das globale System umfasst dabei insbesondere die energiereichen Teilchen, welche die heliosphärische Struktur und Dynamik mitbestimmen. Diese Teilchen dienen auch zur Untersuchung der Schutzwirkung der Heliosphäre gegen Einflüsse des interstellaren Mediums auf die Erde. Dabei interessiert besonders die äußere Heliosphäre und ihr Übergang in das ungestörte interstellare Medium. Das Studium des Teilchentransportes in der dynamischen Heliosphäre wird das Verständnis dieser Zusammenhänge ebenso wie der grundlegenden Plasmaprozesse vertiefen. Neben den bereits diskutierten Weltraum-Missionen *Solar Orbiter*, **STEREO** und **SDO** sind in diesem Zusammenhang vor allem **PAMELA** und die Verlängerung der äußerst erfolgreichen *Ulysses*-Mission zu nennen.

PAMELA (<http://wizard.roma2.infn.it/pamela>)



Mit dem Satelliten-Experiment **PAMELA** (*Payload for AntiMatter Exploration and Light-nuclei Astrophysics*), das in internationaler Kollaboration mit deutscher Beteiligung (Time-of-Flight-Detektor, Universität Siegen) entwickelt wurde und Ende 2003 in eine polare Umlaufbahn gebracht wird, werden Elektronen und Positronen im Energiebereich 100 MeV bis 400 GeV, sowie Protonen, Antiprotonen und schwerere Antikerne im Bereich 50 MeV - 200 GeV in Erdnähe über einen Zeitraum von 3-5 Jahren untersucht. Durch die Messung von Antiteilchen (mit Hilfe der eindeutigen Bestimmung des Ladungsvorzeichens) wird das Verständnis der Plasmatransportprozesse in der Heliosphäre wesentlich vertieft werden. Somit stellen die mit der Mission zu gewinnenden Daten einen kritischen Test für Modelle der Modulation der kosmischen Strahlung im Verlauf des solaren Zyklus dar. Der Energiebereich von PAMELA lässt auch die Messung von solaren energetischen Teilchen zu.

## 5.6 Die Sonne als ein Stern von vielen

Die Erforschung der Sonne und sonnenähnlicher Sterne befruchteten sich gegenseitig. Die relative Nähe der Sonne erlaubt es, physikalische Prozesse mit großer Genauigkeit zu studieren. Dies gab immer wieder Anlass zur Entwicklung neuer Methoden, wie beispielsweise der Helioseismologie. Die Anwendung solcher Methoden auf andere Sterne erlaubt es, große Parameterbereiche (z.B. der Masse, der Rotationsrate und des Alters von Sternen) abzudecken. Die Weltraummission *Eddington* wird mit den Methoden der Helioseismologie erstmals den inneren Aufbau einer Vielzahl von Sternen erforschen und so einen Meilenstein in der Stellarphysik bilden. Für eine verstärkte Forschung im Bereich Helio- und Astero-seismologie in Deutschland wird diese Mission eine zentrale Rolle spielen.

*Eddington* (<http://spdext.estec.esa.nl/home/eddington>)



Ziele der ESA-Mission *Eddington* sind die Astero-seismologie sonnenähnlicher Sterne und die Entdeckung von extrasolaren Planeten mit Massen im Bereich der Erdmasse. Mittels eines Teleskopsystems von effektiv 1.2 m Öffnung und einem abbildenden Photometer werden die Helligkeiten von mehreren zehntausend Sterne über Zeiträume zwischen einem Monat und einem Jahr kontinuierlich gemessen. Die durch die stellaren Oszillationen verursachten periodischen Helligkeitsschwankungen bilden die Basis für die astero-seismologischen Untersuchungen, während auf extrasolare Planeten durch die Veränderung der Sternhelligkeit beim Transit über die sichtbare Sternscheibe geschlossen werden kann. Das Astrophysikalische Institut Potsdam plant eine Beteiligung beim Test der CCDs und wird gemeinsam mit anderen deutschen Instituten umfassende erdgebundene Simultanbeobachtungen durchführen.

## 5.7 Perspektiven für die fernere Zukunft

Aus der vereinheitlichten Sicht des Systems Sonne und Heliosphäre ergeben sich die oben beschriebenen Forschungsvorhaben und Beteiligungen an Missionen, es folgen jedoch daraus auch weiter reichende Perspektiven für mögliche zukünftige Aktivitäten in diesem Forschungsfeld über den hier betrachteten zeitlichen Rahmen von etwa 15 Jahren heraus. Diese Vorstellungen resultieren zwar aus den bereits gewonnenen Erkenntnissen, sind aber am absehbaren Zeithorizont angesiedelte Visionen, die höchste technologische Herausforderungen darstellen.

Im Folgenden sind stellvertretend für viele Ideen einige Vorschläge skizziert. Teilweise sind diese schon über das Stadium der „Vision“ hinaus gewachsen und werden bereits im Detail studiert. Die Auswahl soll auch zeigen, in welche Richtung sich die Erforschung des Systems Sonne und Heliosphäre wahrscheinlich entwickeln wird.

### Global Spectroscopic Monitoring Telescope

Bei diesem Projekt handelt es sich um ein Netz von etwa 10 gleichmäßig in geographischer Länge verteilten Roboter-Teleskopen der 4m-Klasse, die sowohl für den Tag- als auch für den\_Nachtbetrieb geeignet sind. Mit einem solchen weltumspannenden „Patrouillen“-Teleskop könnte die Sonne auf Zeitskalen von Sekunden bis Jahrzehnten gleichzeitig mit einer Reihe von sonnenähnlichen Sternen der näheren Sonnenumgebung untersucht werden, insbesondere auch hinsichtlich des Nachweises von extrasolaren Planeten. Der Einsatz von künstlicher Intelligenz im Betrieb und in der Datenreduktion ersetzt Bedienungspersonal vor Ort. Die technologischen Kernpunkte dieses Projektes sind *Robotik und Telematik* sowie kosten-

günstige modulare *Optik- und Teleskoptechnik* auf C/SiC-Basis. Das Projekt soll die Erfahrungen von anderen weltumspannenden Teleskopen wie z.B. GONG (Global Oscillation Network Group) und mit den beiden zukünftigen Sonnentelaskopen GREGOR und ATST (siehe Abschnitt 5.2) sowie mit der nächsten Generation von bodengebundenen Spektrographen verbinden.

### Solar Space Observatory

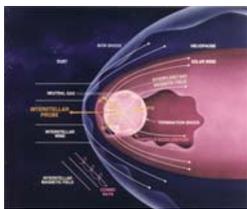
Die Erkenntnis, dass Sonne und Heliosphäre als ein magnetisch gekoppeltes System zu betrachten sind und nur in ihrer Gesamtheit wirklich verstanden werden können, führt zum Konzept eines integrierten Observatoriums, mittels dessen der Fluss von Energie, Impuls und magnetischem Fluss durch das ganze System beobachtet werden kann. Ein solches Observatorium muss breite Bereiche von Wellenlängen (vom Gamma- und Röntgenbereich bis zum fernen Infrarot), von räumlichen Skalen (von 30 km bis zu interplanetaren Distanzen) und von zeitlichen Skalen (von Sekunden bis zur Dauer des Aktivitätszyklus) abdecken. Die Kombination eines optischen Teleskops von 1-2 m Öffnung für optische Spektropolarimetrie und Helioseismologie, das auf den mit *Sunrise* gewonnenen Erkenntnissen aufbaut, mit einer Reihe kleinerer Teleskope mit Spektrometern und Kameras für die kürzeren Wellenlängen würde ein einzigartiges Instrumentarium für die Erforschung des Systems Sonne und Heliosphäre darstellen. Zur Klärung der mit der magnetischen Kopplung der Sonnenatmosphäre verbundenen Prozesse bedarf es dabei der Messung des Magnetfeldvektors in der Korona. Ein neuartiges Instrument („Coronal Field Mapper“), mit dem solche Messungen mittels des Hanle-Effektes in EUV-Linien durchgeführt werden können, soll ein wichtiger Bestandteil des **Solar Space Observatory** sein.

### Solar Probe ([http://www.jpl.nasa.gov/ice\\_fire/sprobe.htm](http://www.jpl.nasa.gov/ice_fire/sprobe.htm))



Die direkte Messung der Plasmaparameter in der Korona ist das Ziel der Mission *Solar Probe*. Dabei ist der nahe Vorbeiflug einer Sonde an der Sonne mit einem minimalen Abstand von 3 Sonnenradien vorgesehen, welche den Zustand des Plasmas in situ messen und hochauflösende Bilder im sichtbaren und UV-Bereich machen soll. Damit können die Heizungsprozesse in der Korona und die Beschleunigungsmechanismen für den Sonnenwind unmittelbar untersucht werden. Die Mission wurde bereits von verschiedenen Agenturen studiert.

### Interstellar Probe (<http://interstellar.jpl.nasa.gov>)



Die *Interstellar Probe* (ISP) wird die erste Sonde sein, die nicht nur die heliosphärische Grenzschicht mit Plasmainstrumenten und Detektoren für energiereiche Teilchen vermessen, sondern auch außerhalb der Heliosphäre in-situ-Beobachtungen des ungestörten interstellaren Mediums durchführen wird. Damit die ISP mehrere hundert Astronomische Einheiten in einer relativ kurzen Zeit zurücklegen

kann, soll sie bei einem nahen Vorbeiflug an der Sonne mit Hilfe eines Sonnensegels derart beschleunigt werden, dass sie die innere heliosphärische Stoßfront innerhalb von 10 Jahren erreichen und nach weiteren 10-20 Jahren das ungestörte interstellare Medium erkunden kann. Die Technik der Sonnensegel, bei deren Entwicklung das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) eine führende Position einnimmt, die notwendige Miniaturisierung der Instrumente und die extrem hohe thermische Beanspruchung von Sonde und Instrumenten erfordern die Entwicklung neuer Technologien, die auch für andere Missionen zur Erkundung des Sonnensystems eingesetzt werden können.

## 5.8 Zusammenhang mit den wissenschaftlichen Fragen

Die nachfolgende Grafik zeigt, welche Forschungsbereiche von den oben beschriebenen 5 bodengebundenen Projekten und 6 Weltraum- bzw. Ballonmissionen abgedeckt werden. Dabei steht das Bestreben im Mittelpunkt, die einzelnen Bereiche entsprechend der im Kapitel 4 beschriebenen Forschungsstrategie im Zusammenhang zu betrachten und ihre Wechselwirkung zu studieren. Während die großen Missionen *Sunrise*, *Solar Orbiter* oder auch *SDO* wissenschaftliche Fragestellungen im gesamten Forschungsfeld abdecken (allerdings mit verschiedenen Schwerpunkten), gibt es bei den kleineren Projekten und Missionen ausreichende Überlappungen, um koordinierte Beobachtungen durchführen zu können. Dabei deckt schon jedes Projekt für sich mindestens zwei Bereiche ab, so dass man die entsprechenden Wechselbeziehungen auch ohne Rückgriff auf andere Instrumente studieren kann.

Projekt	F	Jahr	Sonneninneres	Photosphäre	Chromosphäre	Korona und Sonnenwind	Wirkung auf die Erde	Heliosphäre	
<b>GREGOR</b>	✓	2005	[orange bar]		[orange bar]	[orange bar]			
<b>ATST</b>		2012	[orange bar]		[orange bar]	[orange bar]			
<b>FASR</b>		2009			[orange bar]	[orange bar]	[orange bar]		
<b>ALMA</b>	✓	2009			[orange bar]	[orange bar]			
<b>LOFAR</b>		2007				[orange bar]	[orange bar]	[orange bar]	
<i>Sunrise</i>	☑	2006	[orange bar]	[orange bar]	[orange bar]	[orange bar]	[orange bar]		
<b>SDO</b>		2007	[orange bar]					[orange bar]	
<i>Solar Orbiter</i>		2012	[orange bar]						
<b>STEREO</b>	✓	2006				[orange bar]	[orange bar]	[orange bar]	
<b>PAMELA</b>	✓	2003					[orange bar]	[orange bar]	
<i>Eddington</i>		2008	[orange bar]	[orange bar]					

Abdeckung der Forschungsbereiche der Sonnen- und Heliosphärenphysik durch die verschiedenen Projekte. Farbige Flächen geben Projektschwerpunkte wieder, Farbverläufe weitere Bereiche, für die das jeweilige Projekt ebenfalls von Bedeutung ist. In der mit 'F' bezeichneten Spalte sind die Projekte und Beteiligungen markiert, über deren Finanzierung bereits positiv entschieden wurde (Stand August 2003).

In der mit 'F' bezeichneten Spalte ist der Finanzierungsstatus der Beteiligung von in der Sonnen- und Heliosphärenforschung aktiven deutschen Instituten und Arbeitsgruppen an diesen Projekten angegeben. Die bereits seit einiger Zeit laufenden Projekte **GREGOR**, **STEREO** und **PAMELA** sind finanziert. *Sunrise* ist bisher bis einschließlich Phase B finanziert (die ausländische Beteiligung auch schon darüber hinaus). Bei den anderen Projekten ist über eine Finanzierung noch zu beschließen.

In Kapitel 4 wurden die grundlegenden wissenschaftlichen Fragen formuliert, welche die Ausrichtung der jeweiligen Forschungsarbeit in dieser und der kommenden Dekade prägen werden. Die nachfolgende Tabelle stellt die Zuordnung zwischen den Fragen und Projekten dar.

Abschnitt	Zentrale Fragestellung	Projekte
4.1: Sonnen-/Sterninneres	Wie funktioniert der Dynamo, der das Magnetfeld erzeugt und den Aktivitätszyklus bewirkt?	<b>SDO, Solar Orbiter, Eddington</b>
4.2: Photosphäre	Welche Bedeutung hat die magnetische Strukturierung für den Energietransport, für die Heizung der oberen Atmosphäre und für den Dynamo?	<b>Sunrise, GREGOR, ATST, Solar Orbiter, Eddington</b>
4.3: Chromosphäre	Wie vermittelt die Chromosphäre den Strom mechanischer Energie von der Photosphäre in die Korona?	<b>Sunrise, GREGOR, ATST, Solar Orbiter</b>
4.4: Korona/Sonnenwind	Wie wird die Korona geheizt und der Sonnenwind beschleunigt? Welche Prozesse setzen plötzlich magnetische Energie frei und beschleunigen Teilchen auf hohe Energien?	<b>SDO, Solar Orbiter, ALMA, FASR, STEREO</b>
4.5: Weltraumwetter/Klima	Wie beeinflusst die veränderliche Sonne das Erdklima? In welchem Maße kann das „Weltraumwetter“ vorhergesagt werden?	<b>SDO, STEREO, LOFAR, Sunrise, Solar Orbiter</b>
4.6: Heliosphäre	Wie ist die Heliosphäre strukturiert und wie verändert sie sich in der Zeit? Welche Wechselwirkung gibt es zwischen der Heliosphäre und dem lokalen interstellaren Medium?	<b>PAMELA, STEREO, LOFAR, Solar Orbiter</b>
Zuordnung der Projekte zu den zentralen wissenschaftlichen Fragen der Sonnen- und Heliosphärenphysik		

## 6. Perspektiven und Vorschläge

### 6.1 Neue Projekte und Beteiligungen

Innerhalb der kommenden 10 Jahre soll das in Kapitel 4 dargelegte Programm der koordinierten Erforschung von Sonne und Heliosphäre durch eine abgestimmte Folge von Projekten realisiert werden. Schon finanzierte und laufende Projekte (GREGOR) und Beteiligungen (STEREO, PAMELA), die bereits in den nächsten Jahren Daten liefern werden, bilden einen integralen Bestandteil dieses Forschungskonzepts. In Abschnitt 5.7 wurde gezeigt, auf welche Weise die Projekte die verschiedenen Bereiche überlappend abdecken, um die Erforschung der Kopplung zwischen den Schichten ins Zentrum zu rücken.

Die noch nicht (oder bisher nur teilweise) finanzierten Projekte und Beteiligungen in diesem Forschungsprogramm sind in der nachfolgenden Tabelle nach Einsatzort (Boden oder Weltraum) und nach vorgesehenem Finanzrahmen eingeordnet. Die Zahlenwerte geben die geschätzten Kosten für die deutschen Zuwendungsgeber an (bei *Eddington* nur der Kostenanteil für Asteroseismologie). Für die solare Nutzung der astronomischen Radioarrays **ALMA** und **LOFAR/LOIS**, ihre Vorbereitung und die Analyse der gewonnenen Daten werden ebenfalls Kosten anfallen, die aber jeweils unter 1M€ liegen werden.

Finanzrahmen	Weltraum			Bodengebunden		
	Projekt	Kosten (M€)	Betrieb ab	Projekt	Kosten (M€)	Betrieb ab
A: 5–25 M€	Sunrise Solar Orbiter	6–7 15–20	2006 2010–2012	ATST	10–15	2012
B: 1–5 M€	SDO Eddington	1–2 1	2007 2008	FASR	1.5	2009

Wie die nachfolgende Darstellung der Zeitpläne zeigt, gibt es keine wesentliche zeitliche Überlappung der jeweiligen Kostenbelastung während der Bauphase der großen Projekte und Beteiligungen, wenn man berücksichtigt, dass für weltraumgestützte und für bodengebundene Instrumente verschiedene Finanzierungsträger zuständig sind. Dabei ist allerdings zu beachten, dass Verzögerungen bei der Finanzierung der Bauphase dieser Projekte die Erhaltung und Weitergabe der Erfahrungen (z.B. beim Bau von **STEREO** oder *Sunrise*) gefährden würden. Erforderlich ist deshalb eine gesicherte Finanzierung der Projekte.

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
<i>Sunrise</i>	Rot									
SDO	Rot									
<i>Eddington</i>	Rot									
<i>Solar Orbiter</i>			Rot							
ATST		Rot								
FASR	Rot									
Zeitverlauf der Projekte. Rot: Planung (Phase A/B), gelb: Bau (Phase C/D), grün: Betrieb										

Die für die Sonnen- und Heliosphärenforschung in Deutschland wichtigsten in Vorbereitung befindlichen Projekte sind *Solar Orbiter* und *Sunrise*, da sie jeweils die Bedürfnisse eines großen Teils der Wissenschaftlergemeinschaft in Deutschland abdecken und deutsche Institute eine führende Rolle bei beiden Projekten spielen. Im Bereich der bodengebundenen Sonnenphysik ist eine Beteiligung an ATST das Projekt mit der höchsten Priorität.

**Die deutschen Sonnen- und Heliosphärenphysiker haben sich gemeinsam für die Beteiligung an einer Reihe von Projekten entschieden, die zusammen ein abgestimmtes und starkes Programm für die Entwicklung des Forschungsgebietes bis zur Mitte der kommenden Dekade bilden. Dabei haben die Projekte *Sunrise* (2006) und *Solar Orbiter* (2010-2012) die höchste Priorität. Bei den bodengebundenen Projekten steht eine Beteiligung an ATST an erster Stelle.**

## 6.2 Stärkung der universitären Forschung und Ausbildung

Die Erforschung von Sonne und Heliosphäre ist von besonderer Bedeutung für die moderne Industriegesellschaft. Sie steht an der Schnittstelle von Grundlagenforschung (Sonne als Stern), angewandter Forschung (Weltraumwetter) und Umweltforschung (Klimaveränderung). Sie erweckt damit ein großes Interesse in der breiten Öffentlichkeit und trägt dazu bei, die Bedeutung und den Nutzen naturwissenschaftlicher Forschung insbesondere für junge Menschen deutlich zu machen.

Die oben genannten Punkte und die durch langjährige Anstrengungen erreichte internationale Wettbewerbsfähigkeit der verschiedenen Forschergruppen in Deutschland bilden gute Voraussetzungen, um diesen Forschungszweig weiter zu entwickeln und auch den benötigten Nachwuchs an jungen Wissenschaftlern anzuziehen. Dazu bedarf es jedoch der Unterstützung seitens der diversen Träger und Einrichtungen der Forschungsförderung. **Insbesondere geht es um eine Stärkung der universitären Forschung und Ausbildung im Bereich Sonnen- und Heliosphärenphysik. Die Universitäten spielen die zentrale Rolle bei der Heranbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses, ohne den auch die außeruniversitären Einrichtungen nicht auf Dauer existieren können.** In Deutschland hat sich in der Sonnen- und Heliosphärenphysik eine deutliche Schieflage entwickelt, da eine Reihe von Professuren weggefallen oder umgewidmet worden sind. Es besteht die Gefahr, dass wesentliche Fähigkeiten und Kapazitäten sowohl in der Instrumentenentwicklung als auch bei der Auswertung und Interpretation von Daten verloren gehen. Gegenwärtig gibt es Universitätsinstitute nur noch in Göttingen (C3, experimentelle Sonnenphysik) und Kiel (C4, experimentelle Heliosphärenphysik). Dazu kommen kleine Arbeitsgruppen an anderen Universitäten, von denen allerdings einige wegen anstehender Pensionierung der Leiter kurz vor der Auflösung stehen.

Die erforderliche Erweiterung des Ausbildungsangebotes kann erreicht werden, indem die Ausschreibungen für zu besetzende Professuren und Juniorprofessuren auch explizit für Sonnen- und Heliosphärenphysik geöffnet werden, so dass qualifizierte Bewerber/innen aus diesen Bereichen in den Wettbewerb mit solchen aus anderen Disziplinen treten können. Darüber hinaus wäre die Förderung von dedizierten Nachwuchsgruppen und Graduiertenkollegs eine zukunftsweisende Maßnahme und ein Signal für Studierende und den wissenschaftlichen Nachwuchs. Weitere sinnvolle und wirksame Sofortmaßnahmen sind eine verstärkte Förderung von Einzelprojekten und die Einrichtung eines DFG-Schwerpunktprogramms.

Entsprechende Förderungsmaßnahmen sind auch deshalb von Bedeutung, weil sich die Sonnen- und Heliosphärenphysik in vielfältiger Weise für eine allgemeine und umfassende Ausbildung in theoretischer und experimenteller Physik eignet. Studierende können hinsichtlich Experiment, Beobachtung, Datenanalyse, Modellierung, Numerik und Theorie in einem internationalen und interdisziplinären Umfeld ausgebildet werden, ohne sie frühzeitig auf einen bestimmten Anwendungsbereich einzuschränken. Diese Interdisziplinarität des Forschungsgebietes zeigt sich in zahlreichen Kooperationen mit Gruppen aus anderen Bereichen (wie z.B. der Astrophysik, Planetenphysik, Plasmaphysik, Geophysik, Umweltphysik, wie auch den Ingenieurwissenschaften und Computational Physics) und hat ihre Nützlichkeit für Lehre, Forschung und Industrie angesichts des breiten Beschäftigungsspektrum der Absolventen erwiesen.

Seitens der außeruniversitären Institute besteht großes Interesse an einer weiteren Intensivierung der Zusammenarbeit mit den universitären Einrichtungen. Dies könnte insbesondere die Forschungsmöglichkeiten durch Mitarbeit an der Instrumenten- und Softwareentwicklung, durch die Teilhabe an Datenrechten sowie durch gegenseitige Forschungsaufenthalte wesentlich verbessern.

#### **Vorschläge zur Stärkung der universitären Forschung und Ausbildung im Bereich Sonnen- und Heliosphärenphysik**

- Ausschreibungen für Professuren und Juniorprofessuren auch für den Bereich Sonnen- und Heliosphärenphysik
- Förderung von zeitlich befristeten Nachwuchsgruppen und Graduiertenkollegs
- Einrichtung eines DFG-Schwerpunktprogramms
- Förderung wechselseitiger Aufenthalte von Wissenschaftlern an außeruniversitären Instituten und Universitätseinrichtungen

### **6.3 Etablierung des Forschungsgebietes Helioseismologie**

Die Helioseismologie hat sich in den letzten beiden Jahrzehnten zu einem zentralen Forschungszweig der Sonnenphysik entwickelt, der ein großes Entwicklungspotential besitzt. Neben der globalen Helioseismologie gilt dies in zunehmendem Maße auch für die lokale Helioseismologie, mit deren Hilfe ein detailliertes dreidimensionales Bild von Ausschnitten des Sonneninneren erstellt werden kann. Von besonderem Interesse ist die helioseismologische Bestimmung des Magnetfeldes und der Plasmaströmungen im Sonneninneren. Dies rückt die lokale Helioseismologie in den Brennpunkt der Forschungsaktivitäten, die sich mit dem Ursprung des Magnetfeldes im Dynamoprozess und seinen vielfältigen Auswirkungen auf die Sonnenatmosphäre und die Heliosphäre befassen.

In Kombination mit den bestehenden Forschungsrichtungen an verschiedenen Instituten in Deutschland würde es die lokale Helioseismologie erstmals erlauben, eine magnetische Störung von ihren Ursprüngen im Sonneninneren bis zu ihrer Auswirkung auf die Erde zu verfolgen. Um das junge Gebiet der lokalen Helioseismologie zur Reife zu bringen, sind neben den instrumentellen und messtechnischen Entwicklungen auch intensive theoretische Untersuchungen notwendig. Da keine prinzipiellen Probleme erkennbar sind, ist in den nächsten Jahren mit weiteren Durchbrüchen auf diesem Gebiet zu rechnen.

Eine weitere Stärkung erhält das Gebiet durch den aus der Helioseismologie entstandenen neuen Zweig der Astronomie, der *Asteroseismologie*. Jüngst wurden erstmals die akustischen Eigenschwingungen eines sonnenähnlichen Sterns gemes-

sen. Mit den für die kommenden Jahre geplanten Starts der Weltraummissionen COROT und *Eddington* wird dieses Gebiet einen großen Aufschwung erfahren.

**Es ist die einhellige Meinung der auf dem Gebiet der Sonnen- und Heliosphärenphysik tätigen Wissenschaftler, dass eine nachhaltige Etablierung und Stärkung des Arbeitsfeldes Helioseismologie in Deutschland notwendig ist, um eine empfindliche Lücke in der hiesigen Forschungslandschaft zu schließen.** Geschehen könnte dies durch eine entsprechend ausgerichteteten Professur an einer Universität oder durch die Einrichtung einer gut ausgestatteten Arbeitsgruppe an einem der außeruniversitären Institute, die im Bereich Sonnenphysik tätig sind.

**Zusammenfassung der notwendigen Maßnahmen, um die internationale Position der deutschen Forschung in der Sonnen- und Heliosphärenphysik zu sichern und auszubauen**

- Förderung der angestrebten Projekte mit Priorität bei *Solar Orbiter* und *Sunrise*, sowie *ATST* im bodengebundenen Bereich
- Nachhaltige Stärkung der universitären Ausbildung und Forschung im Bereich Sonnen- und Heliosphärenphysik
- Etablierung des Forschungsgebietes Helioseismologie

# Anhang

## A1 Forschungsinstitute

*Auflistung der Institute in Deutschland, an denen Sonnen- und Heliosphärenphysik betrieben wird:*

- Theoretische Physik IV, Ruhr-Universität Bochum, Abt. Weltraumphysik und Astrophysik
- Institut für Astrophysik und extraterrestrische Forschung, Universität Bonn, Abt. Extraterrestrik
- Internationale Universität Bremen, School of Science and Engineering, Astro- and Space Physics
- Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik (KIS), Freiburg
- Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, Garching, Abt. Erdnaher Weltraum
- Universitäts-Sternwarte Göttingen (USG), Abt. Sonnenphysik
- Institut für theoretische Astrophysik, Universität Heidelberg
- Max-Planck-Institut für Aeronomie (MPAe), Katlenburg-Lindau, Abt. Sonne und Heliosphäre
- Institut für experimentelle und angewandte Physik, Universität Kiel. AG Extraterrestrik
- Institut für Geophysik und Meteorologie, Universität Köln, Abt. Weltraumforschung
- Institut für theoretische Physik und Astrophysik, Universität Kiel, Abt. Sonne und sonnenähnliche Sterne
- Fachbereich Physik, Universität Osnabrück, Abt. Extraterrestrik
- Astrophysikalisches Institut Potsdam (AIP), Bereich Kosmische Magnetfelder, Abteilungen: Sonnenphysik, Magnetohydrodynamik, Sternphysik
- Fachbereich Physik, Universität Siegen. Arbeitsgruppe Astroteilchenphysik

## A2 Kurzbeschreibung der Kerninstitute

### **Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik (KIS), Freiburg, WGL-Institut**

*Forschungsgebiete:*

Theoretische und experimentelle Fragestellungen zu

- Konvektion, Rotation und Dynamo der Sonne
- Physik der Sonnenflecken
- Feinstruktur der Photosphäre
- Chromosphäre und Korona

*Forschungseinrichtungen:*

- Betrieb der deutschen Sonnenteleskope auf Teneriffa

*Besondere Lehreinrichtungen:*

- DFG-Graduiertenkolleg: „Nichtlineare Differentialgleichungen: Modellierung, Theorie, Numerik, Visualisierung“

*Projekte:*

GREGOR (Projektsteuerung, adaptive Optik, POLIS); ChroTel; SUNRISE; SOLAR ORBITER; ATST

## **Universitäts-Sternwarte Göttingen (USG), Abteilung Sonnenphysik**

### *Forschungsgebiete:*

- Dynamik der Sonnenatmosphäre außerhalb von Aktivität (Konvektion, Wellen)
- Hochauflösende Spektropolarimetrie in Aktivitätserscheinungen (Sonnenflecken, Fackeln, Protuberanzen)
- Langzeitvariationen (Fleckenzyklus, Sonnendurchmesser, globale Eigenschaften)

### *Forschungseinrichtungen:*

- Beteiligung an den deutschen Sonnenteleskopen auf Teneriffa

### *Besondere Lehreinrichtungen:*

- Internationale Max-Planck-Research-School an den Universitäten Braunschweig und Göttingen: „Physical Processes in the Solar System and beyond“
- DFG-Graduiertenkolleg: „Strömungsinstabilitäten und Turbulenz“

### *Projekte:*

- GREGOR (Spektrograph, Fabry-Perot-Spektrometer, und Teleskopbeiträge); ATST

## **Max-Planck-Institut für Aeronomie (MPAe), Katlenburg-Lindau, Abteilung Sonne und Heliosphäre**

### *Forschungsgebiete:*

- Experimentelle Sonnen- und Heliosphärenphysik: Physik der Photosphäre, Chromosphäre, Korona und des Sonnenwindes, insbesondere des Magnetfeldes und seiner Auswirkungen
- Theorie und Modelle: Dynamo, Magnetokonvektion, Rekonnektion, Plasmaphysik und Heizung der Korona, Turbulenz und nichtlineare Wellenprozesse, koronale Massenauswürfe
- Sonne-Erde-Beziehungen: Wirkung auf das Erdklima und Weltraumwetter

### *Forschungseinrichtungen:*

- Beteiligung an den deutschen Sonnenteleskopen auf Teneriffa
- Beteiligung an: SOHO (SUMER, LASCO, CELIAS), ULYSSES
- Infrastruktur zur Entwicklung größerer Weltraumexperimente
- Sonnenteleskope HASTA und MICA in Argentinien

### *Besondere Lehreinrichtungen:*

- Internationale Max-Planck-Research-School an den Universitäten Braunschweig und Göttingen: „Physical Processes in the Solar System and beyond“

### *Projekte:*

- GREGOR (IR-Polarimeter); SUNRISE; SDO; STEREO; SOLAR ORBITER; EDDINGTON

**Institut für experimentelle und angewandte Physik (IEAP), Universität Kiel,  
AG Extraterrestrick**

*Forschungsgebiete:*

- Erforschung der Teilchenpopulationen in der Heliosphäre (Raumsonden, Satelliten, Flugzeuge, Bodeninstrumente, Theorie)
- energetische Teilchen, Sonnenwind, kosmische Strahlung, suprathemal Teilchen, Dosimetrie
- Entwicklung, Bau und Kalibration von Detektoren und Instrumentenkomponenten

*Forschungseinrichtungen:*

- Infrastruktur zur Entwicklung von Weltraumexperimenten
- Kieler Neutronenmonitor
- Beteiligungen an: HELIOS, SOHO, ULYSSES, WIND, ACE

*Projekte:*

STEREO (SEPT, SECCHI, PLASTIC); SOLAR ORBITER

**Astrophysikalischen Institut Potsdam (AIP), WGL-Institut, Bereich Kosmische Magnetfelder, Abteilungen Sonnenphysik, Magnetohydrodynamik, Sternphysik**

*Forschungsgebiete:*

- Spektropolarimetrie und Magnetfeldstruktur
- Helioseismologie von Sonnenflecken u. a. Aktivitätsphänomenen
- Hochenergiephysik in der Sonnenkorona
- Dynamotheorie und Magnetokonvektion
- Solar-stellar connection

*Forschungseinrichtungen:*

- Beteiligung an den deutschen Sonnenteleskopen in Teneriffa
- Solares Radioobservatorium Tremsdorf
- Einstein-Turm (60cm Teleskop und Spektropolarimeter)
- Beteiligungen an SOHO, RHESSI und CORONAS-F (DIFOS-M).
- STELLA Observatorium Teneriffa („Stellar-Activity Observatory“)

*Besondere Lehreinrichtungen:*

- Helmholtz-Sommerschule

*Projekte (nur Sonnenphysik):*

GREGOR (Polarimetrie-Einheit, M2-M4-F2-Einheit); SOLAR ORBITER (EPD); FASR; LO-FAR(LOIS); ALMA; EDDINGTON

**Wissenschaftliches Personal an den Kerninstituten (Stand: 01.01.2003)**

Wissenschaftl. Personal der Kerninstitute am 01.01.2003		Professuren:				Wissenschaftl. Angestellte:		Doktoranden:	Diplomanden:
		C4	C3	C2	AP <sup>1</sup>	Planstellen	Drittmittel		
(a) Freiburg	KIS	1	1			16	6	6	2
(b) Göttingen	USG		1			3		7	1
(c) Lindau	MPAe	1	2			11	12	16	
(d) Kiel	IEAP	1	1 <sup>3</sup>			6	4	3	1
(e) Potsdam <sup>2</sup>	AIP				2	5	8,5	2	

<sup>1</sup>AP: Außerplanmäßiger Professor

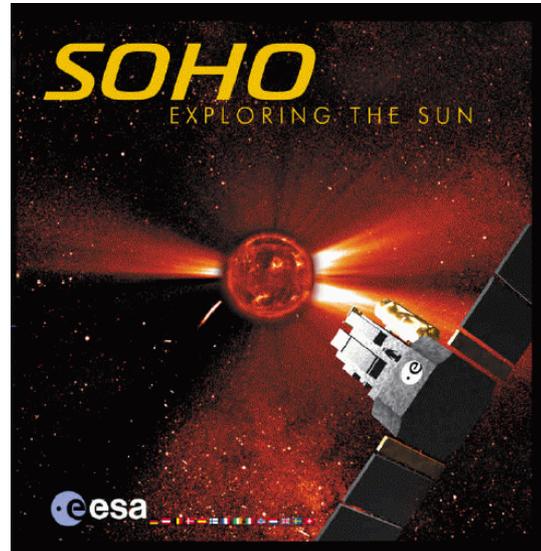
<sup>2</sup>Hier nur Abteilung Sonnenphysik

<sup>3</sup>ab 2004

### A3 Die wichtigsten Observatorien



Das Vakuum-Turm-Teleskop (VTT) in Teneriffa mit einer Öffnung von 70 cm ist das Hauptinstrument für die experimentelle Forschung der deutschen Sonnenphysik. Das Teleskop wird federführend vom KIS mit Beteiligungen des AIP, der USG und des MP Ae betrieben. Die Stärken des VTT sind die adaptive Optik, ein umfassendes Angebot an spektroskopischen und spektropolarimetrischen Fokalinstrumenten für Wellenlängen zwischen dem nahem Infrarot und dem nahem UV, sowie eine hohe Flexibilität beim Aufbau von Experimenten in Labors.



Das Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) ist ein weltraumgestütztes Observatorium, das gemeinsam von ESA und NASA betrieben wird. SOHO beobachtet die Sonne im Licht des von der Erde aus nicht zugänglichen ultravioletten Spektralbereichs ohne Unterbrechung, 24 Stunden am Tag. Außerdem werden *in-situ*-Messungen des Sonnenwindes und helioseismologische Messungen durchgeführt. Deutsche Gruppen waren führend u.a. an der Entwicklung von UV-Spektrographen, eines Koronographen und von Teilchendetektoren beteiligt und sind intensiv mit der Auswertung der wissenschaftlichen Daten befasst.

## A4 Glossar

### *Allgemeines:*

AIP	Astrophysikalisches Institut Potsdam
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
ESA	European Space Agency
IEAP	Institut für experimentelle und angewandte Physik, Universität Kiel
KIS	Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik, Freiburg
MPAe	MPI für Aeronomie, Lindau-Katlenburg
MPI	Max-Planck-Institut
NASA	National Aeronautics and Space Administration
USG	Universitäts-Sternwarte Göttingen
UV	Ultraviolett
EUV	Extremes Ultraviolett
WGL	Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz

### *Messeinrichtungen:*

ACE	Advanced Composition Explorer
ALMA	Atacama Large Millimeter Array
ATST	Advanced Technology Solar Telescope
CELIAS	The Charge, Element, and Isotope Analysis System on SOHO
ChroTel	Chromosphärenteleskop zur Beobachtung der ganzen Sonnenscheibe in verschiedenen Spektrallinien. Wird im Gebäude vom VTT installiert.
CORONAS-F	Complex Orbital Near-Earth Observations of Solar Activity (internationale Mission unter russischer Leitung)
DIFOS-M	Experiment auf dem russischen Satelliten CORONAS-F zur Messung solarer Eigenschwingungen in sechs verschiedenen Wellenlängenkanälen
FASR	Frequency-Agile Solar Radiotelescope
GONG	Global Oscillation Network Group
GREGOR	Im Bau befindliches deutsches 1.5 m Sonnen-Teleskop auf Teneriffa.
IMPACT	In-situ Measurements of Particles And CME Transients, auf STEREO.
LASCO	Large Angle and Spectrometric Coronagraph on SOHO
LOFAR	Low Frequency Array
LOIS	LOFAR Outrigger in Scandinavia
PAMELA	Payload for Antimatter Exploration and Light-nuclei Astrophysics
PLASTIC	PLAsma and Supra-Thermal Ion Composition, auf STEREO.
POLIS	Polarimetric Littrow Spectrograph installed at the VTT.
RHESSI	Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager
SDO	Solar Dynamics Observatory
SECCHI	Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation, auf STEREO.
SOHO	Solar and Heliospheric Observatory
Solar Orbiter	In der Planung befindliche Raumsonde der ESA, die sich der Sonne bis auf 1/5 des Erdbahnradius nähern soll.
STELLA	Stellar Activity Observatory in Teneriffa.
STEREO	Zwei Raumsonden, die simultan aus verschiedenen Richtungen die Sonne beobachten sollen (NASA, im Bau).
SUMER	Solar Ultraviolet Measurements of Emitted Radiation. Instrument auf der Raumsonde SOHO.
Sunrise	In der Planung befindliches 1m-Ballonteleskop, das ab 2006 in 40 km Höhe die Sonne beobachten soll.
TRACE	Transition Region and Coronal Explorer

Ulysses	Raumsonde zur Erforschung der Heliosphäre, die als Gemeinschaftsprojekt der ESA und der NASA seit 1990 betrieben wird.
Wind	Raumfahrzeug zur Untersuchung des interplanetaren Raumes zwischen Erde und Sonne.
VTT	Vakuum-Turm-Teleskop in Teneriffa, Spanien.
Yohkoh	Japanischer Satellit, der die Röntgen- und Gammastrahlung der Sonne untersucht und seit 1991 fliegt.