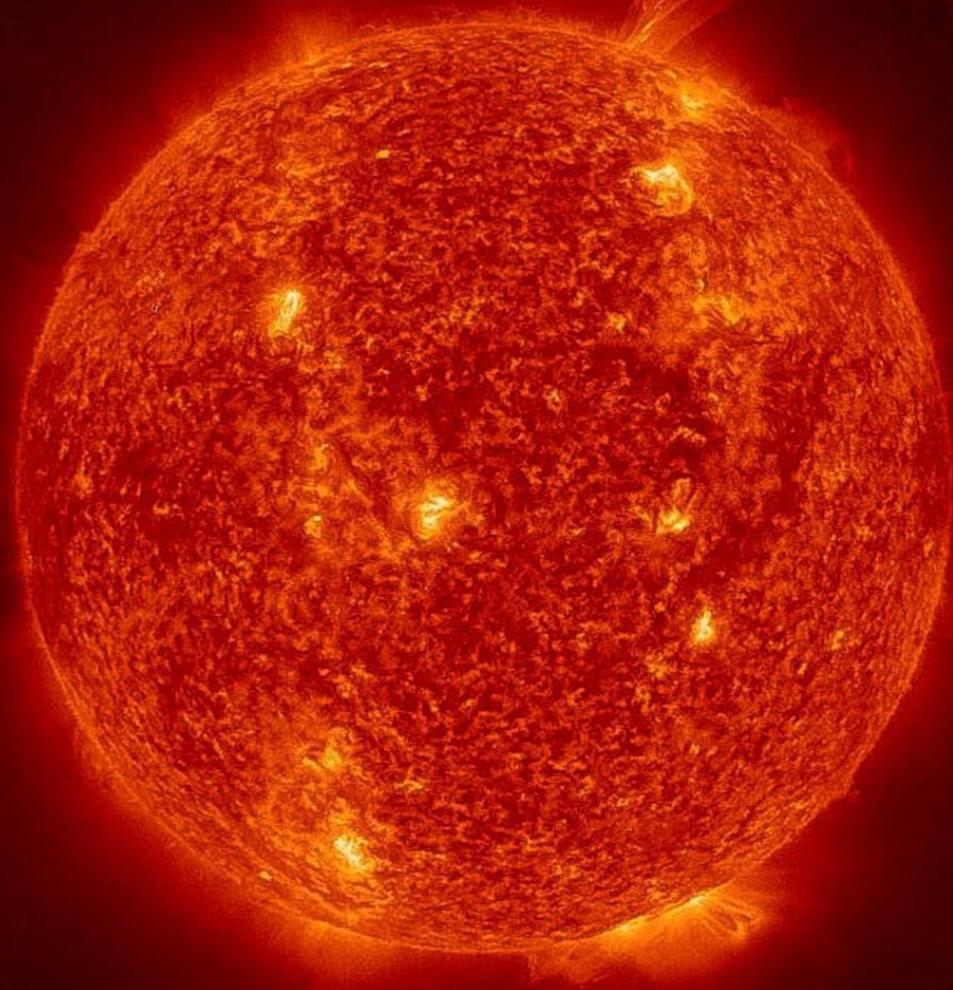
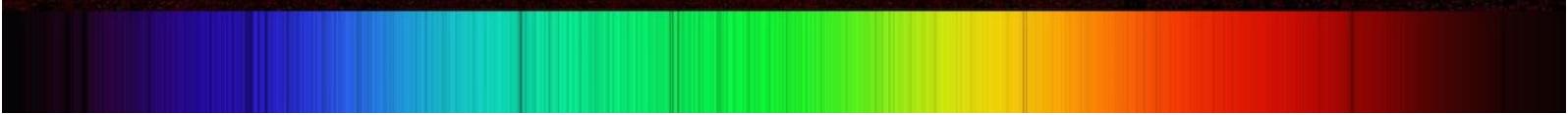


# Strategie zur Entwicklung der Sonnenphysik in Deutschland



Juli 2024



Erarbeitet und herausgegeben von:

Prof. Dr. Carsten Denker  
Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam, An der Sternwarte 16, 14482 Potsdam  
cdenker@aip.de

PD Dr. Horst Fichtner  
Institute für Theoretische Physik I und IV, Uni. Bochum  
hf@tp4.rub.de

Prof. Dr. Hardi Peter  
Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, Justus-von-Liebig-Weg 3, 37077 Göttingen  
peter@mps.mpg.de

Prof. Dr. Markus Roth  
Thüringer Landessternwarte Tautenburg, Sternwarte 5, 07778 Tautenburg  
mroth@tls-tautenburg.de

Dr. Rolf Schlichenmaier  
Institut für Sonnenphysik, Schöneckstr. 6, 79104 Freiburg  
rolf.schlichenmaier@leibniz-kis.de

Prof. Dr. Sami Solanki  
Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, Justus-von-Liebig-Weg 3, 37077 Göttingen  
solanki@mps.mpg.de

Prof. Dr. Robert Wimmer-Schweingruber  
Institut für Experimentelle und Angewandte Physik Universität Kiel, Olshausenstr. 40, 24098 Kiel  
wimmer@physik.uni-kiel.de

Diese Strategie zur Entwicklung der Sonnenphysik in Deutschland wurde in Rücksprache mit dem Rat deutscher Sternwarten (RDS) entwickelt und wird von diesem unterstützt.

**Titelbild:** Die Sonne aufgenommen am 15. Februar 2022 bei einer Wellenlänge von 30.4 nm (Norden ist rechts) mit dem *Extreme UV Imager* auf dem Weltraumobservatorium *Solar Orbiter* von ESA und NASA. Diese Mission wurde von Wissenschaftlern aus Deutschland vorgeschlagen. Deutsche Institute waren am Bau aller Instrumente beteiligt, an der Hälfte davon auch führend. Zum Zeitpunkt der Aufnahme wird gerade Material infolge einer Sonneneruption ins All geschleudert. Zum Größenvergleich sind rechts die Planeten im Sonnensystem wiedergegeben (Erde:  $\delta$ ). Unten wird ein Spektrum der Sonne im sichtbareren Spektralbereich gezeigt.

# Inhalt

<b>Zusammenfassung</b>	<b>4</b>
<b>Executive Summary</b>	<b>5</b>
<b>Die Bedeutung der Erforschung von Sonne und Heliosphäre</b>	<b>6</b>
Relevanz für unsere Gesellschaft	6
<i>Der Einfluss der Sonne auf das Klima</i>	
<i>Weltraumwetter</i>	
Die Sonne als Stein von Rosetta in der Astrophysik	7
<i>Von der Sonne über Sterne bis zu Galaxien</i>	
<i>Verständnis der Aktivität von Sternen notwendig bei der Suche nach Exoplaneten</i>	
<i>Habitabilität von Planeten</i>	
Grundlegende physikalische Prozesse: Sonne und Heliosphäre als Plasmalabor	8
<i>Plasma in Parameterbereichen, die im Labor nicht zugänglich sind</i>	
<i>Erzeugung von Magnetfeld: Ein grundlegender Prozess im Universum</i>	
<i>Plasmaheizung: Von der Korona zur Plasmaphysik</i>	
<b>Status der Erforschung der Sonne in Deutschland</b>	<b>9</b>
Sonnenforschung in Deutschland und im internationalen Kontext	9
Forschungsinfrastruktur zur Sonne in Deutschland	10
<i>Bodengebundene Observatorien</i>	
<i>Weltraumgestützte Observatorien</i>	
Internationale Einbettung der deutschen Forschungsinfrastruktur	11
<b>Strategie zur Entwicklung der Sonnenforschung in Deutschland</b>	<b>12</b>
Herausforderungen zur Physik der Sonne und Heliosphäre in der nächsten Dekade	12
Nachhaltige Sicherung der Sonnenphysik in Deutschland	13
Nationales Sonnenobservatorium von internationaler Bedeutung	14
Perspektiven für bodengebundene Beobachtungen	15
Perspektiven für weltraumgestützte Beobachtungen	16
Verknüpfung zur Physik des Weltraumwetters und zur Klimaforschung	17
Enge Anbindung der Sonnenforschung an die stellare Astrophysik	17
<b>Handlungsempfehlungen</b>	<b>18</b>
Abkürzungsverzeichnis und Glossar	19
Bildnachweise	20

## Zusammenfassung

Die Sonne ist unser nächster Stern. Sie ist Quell des Lebens hier auf der Erde und liefert fast die gesamte Energie für das Klimasystem. Dazu versorgt uns die Sonne durch ihre Strahlung direkt oder indirekt mit Energie, die wir z.B. aus Photovoltaik, Wind oder Biomasse gewinnen können. Gleichzeitig können Eruptionen und Strahlungsausbrüche auf der Sonne negative Auswirkungen auf unsere moderne Infrastruktur haben, von der Sicherheit von Satelliten über die Navigation bis hin zu Energienetzen.

Um die vielfältigen Auswirkungen der Sonne auf die Erde zu verstehen, ist es notwendig, ein klares Bild von unserer kosmischen Heimat zu haben. Dazu müssen wir die Prozesse in der Sonne und in ihrer Atmosphäre untersuchen. Gleiches gilt für die Heliosphäre, also den Bereich zwischen und jenseits der Planeten, der von dem Gas dominiert wird, das von der Sonne abströmt. Zudem ist die Sonne der einzige Stern, den wir aus nächster Nähe und damit im Detail untersuchen können. Das Verständnis unserer Sonne ist daher eine Referenz für unser Verständnis anderer Sterne und des Kosmos.

Die Sonnenphysik in Deutschland nimmt weltweit eine führende Stellung bei Instrumentierung, Datenanalyse und Modellierung ein. Dabei werden alle Bereiche vom Sonneninneren bis in die Heliosphäre sowie der Einfluss der Sonne auf die Erde und solar-stellare Beziehungen abgedeckt. Die Erfolge spiegeln sich z.B. in zahlreichen European Research Council Grants (ERC-Grants) und anderen internationalen Auszeichnungen wider, mit denen Forschende aus Deutschland geehrt wurden.

Derzeit befindet sich dieses Forschungsfeld in Deutschland jedoch an einer Wegscheide. Mit dem Ausscheiden des Freiburger Instituts für Sonnenphysik (KIS) aus der Leibniz-Gemeinschaft zum Jahresende 2023 steht die Sonnenphysik vor großen Herausforderungen. Es droht der Verlust von wissenschaftlichem Know-how und langjährig aufgebauter technischer Expertise, die im Bereich der Spitzeninstrumentierung nicht zeitnah wieder aufgebaut werden könnte. Dies betrifft auch und insbesondere die von Deutschland finanzierten Sontenteleskope auf Teneriffa, die bisher unter Leitung des KIS betrieben wurden. Ohne das Observatorium Teneriffa fiele die durchgehende Beobachtung der Sonne und so auch unsere Kompetenz z.B. zum Weltraumwetter weg.

Eine Neuorganisation bietet aber auch Chancen, die Sonnenphysik neu aufzustellen und die bisherige deutsche Führungsrolle für das nächste Jahrzehnt zu sichern. So kann eine technologische Souveränität in den gesellschaftspolitischen Fragestellungen zu Klima und Weltraumwetter erhalten werden. Mit den folgenden Maßnahmen werden die Grundlagen für eine entsprechende Neuaufstellung gelegt:

- Höchste Priorität hat die Gründung eines nationalen bodengebundenen Sonnenobservatoriums von internationaler Bedeutung mit einer Lastenverteilung auf mehrere Institute in Deutschland. Die Sontenteleskope auf Teneriffa werden in dieser Dachorganisation eine neue Heimat finden.
- Ähnliche Relevanz hat der Erhalt der Alleinstellungsmerkmale und der herausstechenden Kompetenzen zur Sonnenforschung in Freiburg und die Überführung des KIS in eine neue Förderstruktur.
- Äußerst wichtig ist zudem der Zugang zu neuer Instrumentierung, insbesondere eine führende Rolle bei der Entwicklung eines Netzwerkes zur Überwachung der Sonne (SPRING) und eine starke Beteiligung an einem neuen europäischen Teleskop für höchstaufgelöste Sonnenbeobachtungen (EST).
- Weiterhin ist eine weithin sichtbare deutsche Beteiligung an zukünftigen Missionen für weltraumgestützte Sonnenbeobachtungen und Messungen in der Heliosphäre zu sichern.



## Executive Summary

The Sun is our nearest star. It is the main source of life on Earth and provides almost all the energy for the climate system. The Sun also supplies us directly or indirectly with energy through its radiation, which we can obtain from photovoltaics, wind power or biomass, for example. At the same time, eruptions and flares of intense radiation on the Sun can have a negative impact on our modern infrastructure, from satellite safety to navigation and power grids.

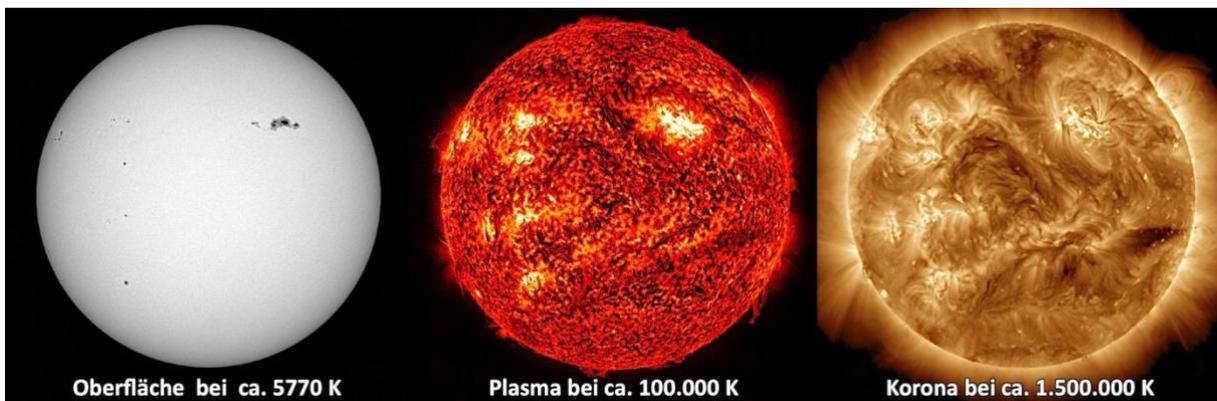
To understand the diverse effects of the Sun on Earth, it is necessary to have a clear picture of our cosmic home. To do this, we need to study the processes in the Sun and its atmosphere. The same applies to the heliosphere, i.e., the area between and beyond the planets, which is dominated by the gas flowing from the sun and forming the solar wind. In addition, the Sun is the only star that we can study at close range and in detail. Understanding our Sun is therefore a reference for our understanding of other stars and the cosmos.

Solar physics in Germany holds a leading position worldwide in instrumentation, data analysis and modeling. All areas from the interior of the Sun to the heliosphere as well as the influence of the Sun on the Earth and solar-stellar relationships are covered. This success is reflected, for example, in the numerous ERC grants and other international awards with which researchers from Germany have been honored.

However, this field of research in Germany is currently at a crossroads. The Freiburg Institute for Solar Physics (KIS) left the Leibniz Association at the end of 2023, therefore solar physics is facing major challenges. There is a threat that scientific know-how and technical expertise built up over many years will be lost, which could not be rebuilt in a timely manner in the field of cutting-edge instrumentation. In particular, this also applies to the solar telescopes on Tenerife funded by Germany, and so far operated under the leadership of the KIS. Without the Tenerife Observatory, the continuous observation of the Sun and thus our expertise, e.g., in space weather, would be lost.

However, this change also offers opportunities to reorganize solar physics in Germany and to secure Germany's current leading role for the next decade. In this way, technological sovereignty can be maintained in the socio-political framework of climate and space weather. The following measures will lay the foundations to keep German solar physics world-class:

- The highest priority is to establish a ground-based national solar observatory of international importance, with a work distribution shared between several institutes in Germany. This way, the solar telescopes on Tenerife will find a new home under this umbrella organization.
- Of similar relevance is the preservation of the unique capabilities and outstanding expertise in solar research in Freiburg and the transfer of the KIS to a new funding structure.
- Access to new instrumentation is also extremely important, in particular a leading role in the development of a network for monitoring the Sun (SPRING) and a strong participation in a new European telescope for ultra-high-resolution solar observations (EST).
- Furthermore, a highly visible German participation in future missions for space-based solar observations and measurements in the heliosphere must be secured.



## Die Bedeutung der Erforschung von Sonne und Heliosphäre

Die Sonnenphysik als eine gut etablierte Forschungsdisziplin erlebt derzeit weltweit ein beachtliches Wachstum. Ein Indikator hierfür ist die Verdopplung der jährlichen Zahl der wissenschaftlichen Publikationen zur Sonnenphysik zwischen 2013 und 2023. Ein weltumspannendes Netzwerk zum Monitoring der Sonne ist in Vorbereitung, ein europäisches Großteleskop in Planung und mehrere neue Weltraumobservatorien mit deutscher Beteiligung werden noch in diesem Jahrzehnt gestartet. Dazu wurden über zwei Duzend ERC-Grants für die Sonnenforschung vergeben. All dies ist einerseits auf die Faszination der Sonne als Forschungsobjekt zurückzuführen, deren Vielfalt und Komplexität erst durch modernste Instrumente und Methoden sichtbar wird, andererseits aber auch auf die Relevanz der Sonne für unsere Gesellschaft.

### Relevanz für unsere Gesellschaft

#### Der Einfluss der Sonne auf das Klima

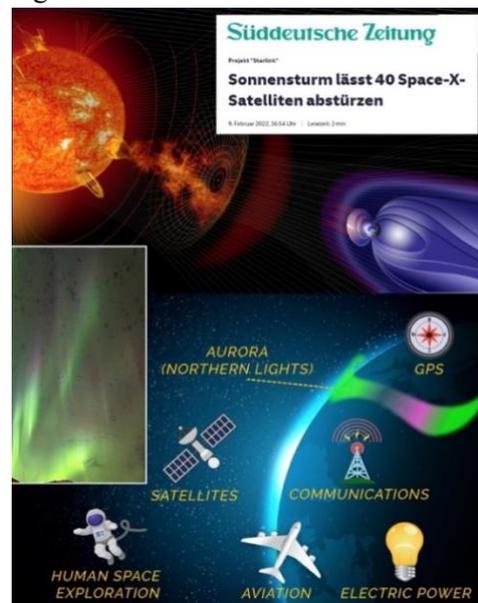
Etwa 99,96 Prozent des gesamten Energieeintrags in das Klimasystem der Erde erfolgt in Form von Sonnenstrahlung. Diese Energie ermöglicht das Überleben höherer Lebensformen. Schwankungen in diesem Energieeintrag haben naturgemäß einen Einfluss auf das Klimageschehen auf der Erde. Die Helligkeit der Sonne schwankt auf Zeiträumen von Tagen bis Jahrmilliarden. Solche Schwankungen der Gesamthelligkeit oder der kurzwelligen (ultravioletten) Strahlung können das Klima beeinflussen.

Tatsächlich gibt es überzeugende Belege dafür, dass Klimaschwankungen seit dem Ende der letzten Eiszeit mit der Helligkeit der Sonne zusammenhängen. Auch wenn der Temperaturverlauf der Erde in den letzten 50 Jahren vor allem auf den Einfluss des Menschen zurückzuführen ist, sind verlässliche Vorhersagen über die Entwicklung der Sonneneinstrahlung für die Vorhersage der Klimaentwicklung von großer Bedeutung. Forschende an deutschen Instituten sind auf diesem Gebiet führend.

#### Weltraumwetter

Unsere moderne Gesellschaft ist zunehmend auf weltraumgestützte Dienste wie Navigation, Kommunikation oder Wettervorhersagen angewiesen. Störende Einflüsse der Sonne, von erhöhter energiereicher Strahlung und Teilchen bis hin zu koronalen Masseauswürfen, können Satelliten, aber auch irdische Infrastrukturen beschädigen (siehe Box Weltraumwetter). Die volkswirtschaftlichen Auswirkungen sind schwer zu beziffern, aber eine ESA-Studie geht davon aus, dass ein Extremereignis auf der Sonne allein in Europa Kosten von bis zu 15 Milliarden Euro verursachen könnte.

Noch sind Vorhersagen solcher Ereignisse, die zusammen mit ihren Auswirkungen als Weltraumwetter bezeichnet werden, von begrenzter Aussagekraft. Die Physik des Weltraumwetters ist zwar in ihren Grundzügen verstanden. Für eine verbesserte Vorhersage sind, neben einer besseren Überwachung der Sonne und des interplanetaren Raums, Fortschritte im Verständnis grundlegender Prozesse erforderlich, wie das Auslösen von Eruptionen in der Sonnenatmosphäre oder die Ausbreitung der Masseauswürfe und energiereicher Teilchenstrahlung in der Heliosphäre.



#### Beispiele für den Einfluss des Weltraumwetters

Satellitengestützte Infrastruktur:

- Navigation, z.B. Galileo & GPS mit Einfluss z.B. auf Transportgewerbe.
- Zuverlässigkeit & Lebensdauer von Satelliten, z.B. für Wetterdienste.
- Telekommunikation, TV, Radio, Internet.

Infrastruktur am Boden und in der Luft:

- Energieversorgungsnetze.
- Kommunikationsnetze, vor allem in hohen Breiten.
- Strahlenbelastung für Besatzung und Elektronik in Flugzeugen.

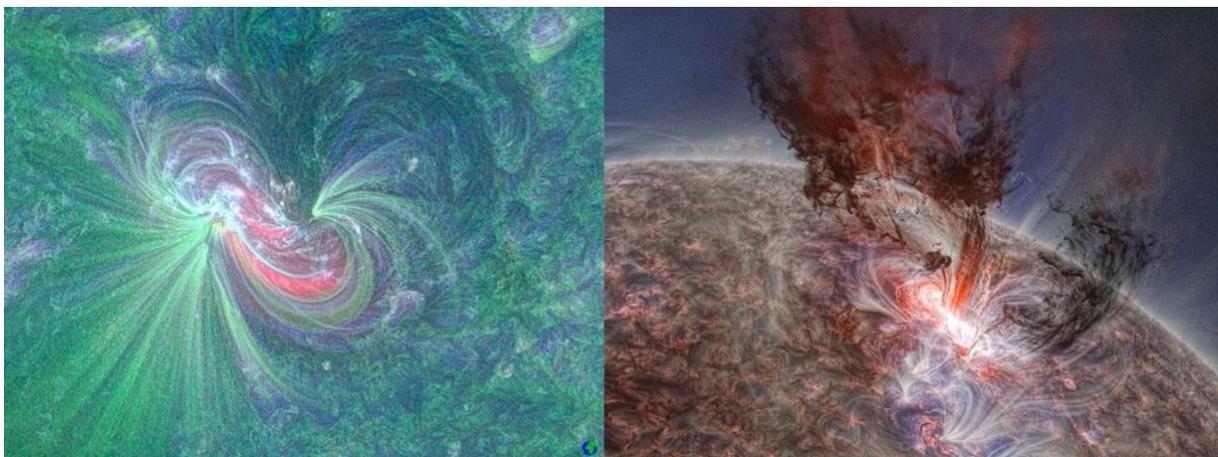
## Die Sonne als Stein von Rosetta in der Astrophysik

### Von der Sonne über Sterne bis zu Galaxien

Die Sonne ist der Stern, der der Erde bei weitem am nächsten ist. Dies ermöglicht es uns, Prozesse in einem Detailreichtum zu untersuchen und zu verstehen, wie es bei keinem anderen Stern möglich ist. Die Sonne ist somit der „Stein von Rosetta“ für das Verständnis astrophysikalischer Prozesse. Vom Kern bis zur äußeren Atmosphäre erlaubt uns die Sonne wichtige Einblicke in die grundlegenden Funktionsweisen des Kosmos: Im Zentralbereich der Sonne finden die Kernfusionsprozesse statt, bei denen Wasserstoffatome zu Helium verschmelzen und dabei sehr große Mengen an Energie und Neutrinos freisetzen. Die dadurch angetriebene Konvektion des Plasmas im Sonneninneren erzeugt im Zusammenspiel mit der Sonnenrotation das solare Magnetfeld und ist damit ein Prototyp für die Magnetfelderzeugung in anderen Sternen, aber auch in Planeten und Galaxien. Damit steht die Sonne am Anfang einer Erkenntniskette, die letztlich bis hin zum Magnetfeld und zum heißen Plasma in Galaxien und Galaxienhaufen führt.

### Verständnis der Aktivität von Sternen notwendig bei der Suche nach Exoplaneten

Die Sonnenoberfläche ist durch ihre Dynamik, ihr komplexes Magnetfeld und ein Auf und Ab der Sonnenaktivität gekennzeichnet. Letztere ist charakterisiert durch Sonnenflecken, kurzzeitige Strahlungsausbrüche und koronale Masseauswürfe, die durch das Magnetfeld angetriebene Phänomene sind. All diese treten bei einem Großteil der Sterne auf, können dort aber aufgrund ihrer räumlichen Kleinskaligkeit nur schlecht untersucht werden. Dabei ist ein Verständnis der magnetischen Aktivität von Sternen ein Schlüssel für die weitere Verbesserung der Suche nach Planeten außerhalb unseres Sonnensystems (sog. Exoplaneten) und insbesondere der Charakterisierung ihrer Atmosphären. Nach den enormen Fortschritten bei der Untersuchung von Exoplaneten wird die erforderliche Genauigkeit z.B. der Geschwindigkeitsmessungen nun begrenzt durch die von der magnetischen Aktivität verursachte Variabilität. So überdeckt die stellare Aktivität die schwachen Hinweise auf die Eigenschaften dieser Planeten. Ein besseres Verständnis der Sonnenaktivität ist daher unerlässlich, um unser Wissen über Exoplaneten zu verbessern.



**Strahlungsausbruch (Flare) und Masseauswurf.** Das Bild links zeigt in Falschfarben auf 10 Millionen Grad aufgeheiztes Plasma (in rot) zusammen mit 10-mal kälterem Material in grün und blau. Das kühle Material zeigt den Verlauf von Magnetfeldlinien an. Im rechten Bild ist ein Masseauswurf zu sehen, bei dem Material nach oben geschleudert wird (und in diesem Fall wieder auf die Sonne zurückfällt).

### Habitabilität von Planeten

Neben ihrer Rolle bei der Entschlüsselung kosmischer Phänomene hat die Sonne einen tiefgreifenden Einfluss auf unseren eigenen Planeten. Die Sonne prägt die Bedingungen, unter denen Leben gedeihen kann. Die Sonne hat auf die Erde und das Sonnensystem direkte Auswirkungen z.B. durch starke Strahlungsausbrüche, Masseauswürfe oder Röntgenstrahlung. Eine bessere Kenntnis der Sonne hilft so, die Bedingungen für Leben auch im größeren Kontext der Sterne und ihrer Planeten zu verstehen.

## Grundlegende physikalische Prozesse: Sonne und Heliosphäre als Plasmalabor

### Plasma in Parameterbereichen, die im Labor nicht zugänglich sind

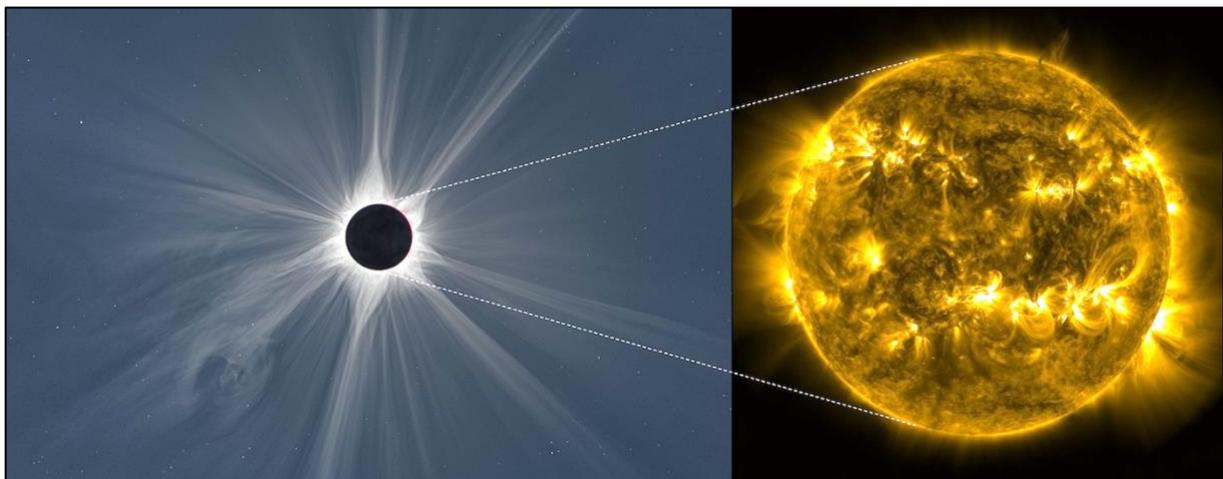
Das gekoppelte System Sonne–Heliosphäre deckt einen sehr weiten Bereich von Parametern ab. Beispielsweise ist die Dichte im Zentrum der Sonne zehnmal höher als die von Gold. Im Sonnenwind, d.h., dem Gas, das kontinuierlich von der Sonne abströmt und den interplanetaren Raum füllt, fällt die Dichte auf wenige Protonen pro Kubikzentimeter ab: dort herrscht ein fast perfektes Vakuum. Die Sonne ermöglicht es, Plasma in einer Temperatur-Dichte-Kombination und auf Skalen zu untersuchen, die im Labor nicht erreichbar sind. In der Sonnenatmosphäre herrschen Bedingungen, bei denen Nicht-Gleichgewichtsprozesse dominieren und die Kopplung von elektromagnetischer Strahlung, Plasma und Magnetfeld zu hochinteressanten fundamentalen physikalischen Fragen führt. Ähnliches gilt für die komplexen Vorgänge in der Heliosphäre, dem vom Sonnenwind dominierten Bereich zwischen den Planeten. Turbulenz, Stoßwellen und Teilchenbeschleunigung in diesem weitgehend stoßfreien Plasma gehören zu den am schwierigsten zu verstehenden Phänomenen der Plasmaphysik.

### Erzeugung von Magnetfeld: Ein grundlegender Prozess im Universum

Magnetfelder gibt es überall im Universum: Im Kleinen schützen uns die Magnetfelder von Erde und Sonne vor energiereichen Teilchen aus den Tiefen des Alls, im Großen spielt das Magnetfeld eine wichtige Rolle bei der Entstehung von Strukturen im Universum. Doch woher kommt das Magnetfeld und wie wird es erzeugt? Hier nimmt die Sonne eine zentrale Stellung ein, da wir detaillierte direkte Beobachtungen ihres Magnetfeldes haben und zudem mit Hilfe der Helioseismologie tief in das Sonneninnere blicken können, wo das Magnetfeld entsteht. Bei der Helioseismologie werden Methoden der Seismologie verwendet, um aus den Schwingungen an der Oberfläche der Sonne Rückschlüsse auf z.B. Temperatur und Strömungen in ihrem Inneren zu ziehen.

### Plasmaheizung: Von der Korona zur Plasmaphysik

Eines der faszinierendsten astronomischen Schauspiele ist eine totale Sonnenfinsternis. Wenn der Mond die Sonnenscheibe bedeckt, wird die äußere Atmosphäre der Sonne, die Korona, sichtbar. Sie besteht aus einem mehrere Millionen Grad heißen Plasma. Die noch nicht entschlüsselten Prozesse, die die Korona aufheizen, sind eng verwandt mit Problemen, die sich aus der Physik des magnetischen Einschlusses von Plasmen in Fusionsreaktoren ergeben. Dementsprechend gibt es in Deutschland und international eine lange Tradition der Zusammenarbeit zwischen Sonnen- und Laborplasmaphysik.



**Die Korona der Sonne.** Links eine Aufnahme bei einer Sonnenfinsternis (20. April 2023), bei der der Mond die Sonnenscheibe verdeckt und so die äußere Atmosphäre sichtbar macht. Rechts eine Aufnahme am gleichen Tag vom Weltraum aus im extremen UV, die das Millionen Grad Celsius heiße Plasma auch vor der Sonnenscheibe zeigt.

## Status der Erforschung der Sonne in Deutschland

Die Sonnenphysik in Deutschland ist äußerst erfolgreich und in verschiedenen Bereichen international führend. Dabei wird in Deutschland der gesamte Bereich vom Sonnenkern bis zur Heliosphäre abgedeckt. Auch die Auswirkungen der Sonne auf die Erde sowie die Beziehung zwischen der Sonne und anderen Sternen werden in Deutschland intensiv untersucht. Beobachtungen und die Instrumentenentwicklung spielen ebenso eine hervorgehobene Rolle wie Theorie und Modellierung. Dabei sind die von den Instituten abgedeckten Forschungsfelder komplementär und von einer starken Zusammenarbeit untereinander geprägt. Zum Beispiel sind derzeit die Arbeiten zu bodengebundenen Beobachtungen vom KIS geführt, mit starken Beteiligungen von AIP, MPS und TLS. In der Weltraummission Solar Orbiter hat das MPS die stärkste Rolle inne, mit signifikanten Beiträgen von AIP, KIS und der Universität Kiel.

<b>Sonnenforschung an deutschen Forschungsinstituten und Universitäten</b>			
Gelistet sind Standorte, die einen direkten Bezug zur Physik der Sonne haben. Institute, die einen indirekten Bezug zur Sonne haben, wie in der Klimaforschung oder zur Untersuchung von Weltraumwetterfolgen, sind hier nicht genannt. Neben den genannten Alleinstellungsmerkmalen im Bereich Sonne (rechte Spalte) arbeiten die Einrichtungen auch an anderen Problemen, die dann unter den Instituten stark verzahnt sind. Dabei ist oft die Verschränkung von Messung und Beobachtung mit Theorie und Modellierung ein wichtiges Element.			
KIS	Institut für Sonnenphysik	Freiburg	Instrumentierung für bodengebundene Teleskope, Observatoriumsbetrieb, Science Data Center
MPS	Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung	Göttingen	Instrumentierung für weltraumgestützte Teleskope, Physik des Sonneninneren, 3D-MHD-Modelle
AIP	Leibniz-Institut für Astrophysik	Potsdam	Hochenergetische elektromagnetische Strahlung, Kosmische Magnetfelder auf der Sonne
TLS	Thüringer Landessternwarte Tautenburg und Universität Jena	Tautenburg /Jena	Instrumentierung für kontinuierliches Monitoring der Sonne, solar-stellare Beziehungen
	Universität Kiel, Institut für Experimentelle und Angewandte Physik	Kiel	Instrumentierung für Messungen von Teilchen und Feldern direkt in Sonnenwind und der Heliosphäre
	Universität Bochum, Institute für Theoretische Physik I und IV	Bochum	Theorie und Modellierung von Sonnenwind und Heliosphäre
IAG	Institut für Astrophysik & Geophysik, Universität Göttingen	Göttingen	Weltraumwetter, solar-stellare Beziehungen

## Sonnenforschung in Deutschland und im internationalen Kontext

Im europäischen Kontext kann die starke Rolle Deutschlands z.B. im Rahmen der ERC Grants verdeutlicht werden. So gingen von den insgesamt 29 ERC Grants im Bereich der Sonnenforschung 10 Auszeichnungen nach Deutschland. Im Bereich der großen Verbundnetzwerke, die über das EU-Forschungsrahmenprogramm gefördert werden, haben sich deutsche Forschende als Koordinatoren mehrerer Projekte hervorgetan. Jüngstes Beispiel ist SOLARNET (von 2019 bis 2023) mit einer Fördersumme von 10 Millionen Euro verteilt auf 16 Länder.

Die Sonnenforschung in Deutschland spielt auch im weiteren internationalen Kontext eine weitaus größere Rolle als die reine Zahl der Forschenden oder die finanzielle Förderung vermuten lassen. Dies zeigt sich beispielsweise daran, dass seit 2010 vier von 13 vergebenen George Ellery Hale Awards der American Astronomical Society, der höchsten Auszeichnung im Bereich der Sonnenphysik, nach Deutschland gingen.

Zum guten Ruf der deutschen Sonnenphysik gehört auch die exzellente Ausbildung junger Menschen, die in der Forschung die neuesten Techniken des Instrumentenbaus und der Datenanalyse erlernen und später in der Hightech-Industrie anwenden können, aber zum Teil auch weltweit Professuren erhalten. Insbesondere die USA mit ihrer exzellenten Finanzierung der Sonnen- und Heliosphärenforschung (allein NASA Heliophysics hat ein Jahresbudget von 800 Millionen US-Dollar pro Jahr) zieht viele junge Sonnenforschende aus Deutschland an, die dort oft eine wichtige Rolle spielen. So wurden fünf der führenden Experten für den Bau des weltweit größten Sonnenteleskops, des Daniel K. Inouye Solar

Telescope (DKIST), am KIS in Freiburg ausgebildet. Ein solcher Brain Drain durch Abwanderung exzellenter Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler sollte durch die Schaffung von Entwicklungsmöglichkeiten insbesondere an den Universitäten zukünftig verhindert werden.

Durch die jüngsten Entwicklungen am Standort Freiburg besteht die Gefahr, dass die führende Rolle Deutschlands in der Sonnenphysik teilweise verloren geht. Die hier vorgestellten Überlegungen zu einer Strategie der Sonnenphysik in Deutschland sollen dem entgegenwirken.

## Forschungsinfrastruktur zur Sonne in Deutschland

Die führende Rolle Deutschlands in der Sonnenphysik beruht auf dem privilegierten Zugang zu Daten der großen Observatorien und Weltraummissionen. Dies wird durch Beiträge zur Instrumentierung erreicht, genauso wie durch die wissenschaftliche Exzellenz der Forschenden. Eine entscheidende Rolle spielt auch die starke Position der deutschen Hightech-Industrie, die sich immer wieder durch Entwicklungsarbeiten für die Sonnenphysik zukunftsweisend positionieren konnte. Beispiele für einen Technologietransfer in andere Gebiete sind die Entwicklung von Mikrolinsen-Arrays oder Lithium-Niobat-Etalons (planparallelen LiNbO<sub>3</sub>-Platten) und die Anwendung von Methoden der adaptiven Optik in der Augenmedizin.

Infrastrukturprojekte wurden und werden vor allem durch zusätzliche Förderung durch Bund und Länder ermöglicht. Dabei fördern das BMBF und Ministerien der Länder vorwiegend Vorhaben zur bodengebundenen Infrastruktur und das BMWK (über das DLR) vorwiegend weltraumgestützte Missionen.

### Bodengebundene Observatorien

Das größte Sonnenteloskop Europas, Gregor, bildet zusammen mit dem kleineren Vakuum-Turm-Teleskop (VTT) das Deutsche Sonnenobservatorium auf Teneriffa, betrieben führend vom KIS mit Unterstützung von AIP und MPS. Beide wurden mit Bundes- und Landesmitteln gebaut. Großteleskope können ihre Leistungsfähigkeit nur entfalten, wenn Maßnahmen zur Beseitigung der Bildunruhe (adaptive Optik) und zur Bildrekonstruktion ergriffen werden. In beiden Bereichen sind deutsche Institute führend, so dass auch die beiden großen US-amerikanischen Sonnentelkope deutsches Know-how nutzen.



**DKIST auf Hawaii** ist mit 4 Metern Öffnung das weltweit größte Sonnenteloskop. Eines der wichtigsten Instrumente am DKIST ist das in Deutschland gebaute Visible Tunable Filter (VTF), ein bildgebender Spektrograph und Polarimeter, der Zugang zu höchst aufgelösten Messungen von Strukturen und Magnetfeld geben wird. Es ist das einzige DKIST-Instrument, das von außerhalb der USA beigestellt wird. Das kleine Bild zeigt das Herzstück des VTF, das größte je hergestellte Fabry-Perot-Interferometer.

Ein Teleskop ist immer nur so gut wie die Instrumente, die das Sonnenlicht analysieren, und damit Größen wie Temperatur, Geschwindigkeit oder Magnetfeld zugänglich machen. Auch bei diesen Entwicklungen sind deutsche Einrichtungen führend. So ist das Visible Tunable Filter (VTF) das einzige nicht-amerikanische Instrument am DKIST, entwickelt unter Federführung des KIS mit Beiträgen des MPS. Das VTF ist ein hochpräzises abbildendes Spektro-Polarimeter mit Anforderungen an Oberflächengüte und Regeltechnik an der Grenze des derzeit technisch-physikalisch Machbaren. Damit erhält Deutschland auch garantierte Beobachtungszeit am derzeit größten Sonnenteloskop der Welt. Darüber hinaus wurde in Deutschland ein neuartiges Instrument entwickelt, das mit Hilfe eines neu entwickelten Mikrolinsen-Arrays das polarisierte Spektrum an jedem Punkt eines 2D-Bereichs bestimmt. Mit diesen Entwicklungen ist deutsche Expertise weltweit gefragt und die hier neu entwickelten Instrumente stehen ganz oben auf der Liste der geplanten Instrumente der zweiten Generation für das DKIST und für das geplante große European Solar Telescope (EST).

Radiobeobachtungen ergänzen die Daten im optischen und UV-Bereich, indem sie z.B. Informationen über die Ausbreitung von Sonneneruptionen von ihrer Quelle durch die Sonnenkorona in den interplanetaren Raum hinein liefern. Hier haben deutsche Institute eine lange Tradition. So werden die deutschen Stationen des Low Frequency Array (LOFAR), ein Europa überspannendes internationales Netzwerk von Radioteleskopen, auch intensiv genutzt, um Fortschritte beim Verständnis der Grundlagen der Sonne im Allgemeinen und des Weltraumwetters im Besonderen zu erzielen. Dabei wird das deutsche LOFAR-Konsortium von der TLS geleitet.

### Weltraumgestützte Observatorien

Die Erforschung der Sonne und der Heliosphäre aus dem Weltraum hat in Deutschland eine lange Tradition. Die erste große Mission bestand aus den beiden Helios-Raumsonden, die in den 1970er-Jahren gemeinsam mit der NASA gestartet wurden und einzigartige Messungen von Teilchen und Magnetfeld im Sonnenwind lieferten. In den 1990er-Jahren entwickelten, bauten und betrieben deutsche Einrichtungen zentrale Instrumente für die Missionen Ulysses und SOHO, beides Ecksteine der Sonnen- und Heliosphärenforschung für ESA und NASA. Ulysses ermöglichte erstmals Untersuchungen des Sonnenwindes in hohen heliographischen Breiten, SOHO war mit Abstand das umfassendste Sonnenobservatorium im Weltraum. Heute ist Solar Orbiter das europäische Flaggschiff der Sonnen- und Heliosphärenforschung (siehe Box Solar Orbiter). Er wurde von deutschen Forschenden initiiert, und vereint Vorteile der oben genannten Missionen: Er kommt der Sonne so nahe wie Helios, erreicht hohe Breiten ähnlich wie Ulysses und ist ein vollwertiges Observatorium wie SOHO.

Deutsche Forschungsinstitute, Universitäten und auch Industrieunternehmen verfügen über eine hervorragende Expertise für eine breite Palette von Instrumenten zur Erforschung der Sonne und der Heliosphäre. Sowohl für die Messung der Teilcheneigenschaften als auch für die vielfältigen Analysen der Strahlung im UV- und sichtbaren Bereich wurden über die Jahrzehnte die Empfindlichkeit und die Messgenauigkeit der Instrumente bei gleichzeitiger Verkleinerung und Verringerung des Energiebedarfs stark verbessert. Dies ermöglicht

einen flexiblen Einsatz auch bei geringer Startmasse oder Energie. Darüber hinaus hat das unter deutscher Leitung gebaute und an einem Stratosphärenballon mehrfach geflogene Sonnenobservatorium Sunrise neue Maßstäbe für solare und auch astronomische Ballonmissionen gesetzt.



**Solar Orbiter** ist das Flaggschiff von ESA und NASA zur Erforschung der Sonne und der Heliosphäre. Es wurde federführend von deutschen Forschenden vorgeschlagen und befindet sich seit Januar 2022 in der wissenschaftlichen Datenphase. Deutsche Institute sind federführend an 5 von 10 Instrumenten beteiligt (als PI und Co-PI):

- PHI Magnetfeld in der Photosphäre
- EUI Extrem-UV Bilder der Korona
- SPICE Extrem-UV Spektroskopie
- Metis Koronographie
- EPD Energetische Teilchen im Sonnenwind

Weitere Beteiligungen (Co-I) gibt es an:

- STIX Röntgenbilder der Korona
- RPW Plasmawellen im Sonnenwind
- SWA Sonnenwind-Strömung
- MAG Magnetfelder im Sonnenwind
- SoloHI Korona auf großen Skalen

### Internationale Einbettung der deutschen Forschungsinfrastruktur

In der Sonnenforschung sind die meisten bodengebundenen und fast alle weltraumgestützten Programme das Ergebnis internationaler Zusammenarbeit. Die Gemeinschaft der Sonnen- und Heliosphärenphysik in Deutschland ist nach wie vor eine treibende Kraft bei internationalen Infrastrukturprojekten sowie bei der Entwicklung und dem Bau von Instrumenten. Die exzellente deutsche Expertise ist dabei weltweit gefragt und Garant für die tiefe Verankerung der hiesigen Sonnenforschung im internationalen Konzert. Mit Hilfe nationaler Förderer ist es deutschen Instituten immer wieder gelungen, in internationalen Konsortien eine Führungsrolle zu übernehmen und Pionierleistungen bei Neuentwicklungen zu erzielen.

Sowohl bei der bodengebundenen Sonnenbeobachtung als auch bei den Instrumenten im Weltraum profitiert die deutsche Gemeinschaft von ihrem exzellenten Ruf und ihrem einzigartigen Know-how. Dies zeigt sich z.B. in der Möglichkeit, mit dem VTF ein zentrales Instrument des weltgrößten Sonnenteleskops zu bauen, eine führende Rolle beim Solar Orbiter zu übernehmen, das Schlüsselinstrument der Weltraumwettermission Vigil beizusteuern oder sich an Missionen wie Solar-C (Japan), Aditya (Indien), Parker Solar Probe, MUSE, PUNCH oder IBEX (alle USA) zu beteiligen.

Darüber hinaus ist das von Deutschland betriebene Sonnenobservatorium auf Teneriffa die Betriebsstätte für eine Vielzahl von Instrumenten, die in Deutschland und Europa entwickelt wurden, z.B. vom spanischen Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC). All dies unterstreicht auch das hervorragende Niveau der Ingenieurskunst und der technischen Fähigkeiten, die über Jahrzehnte aufgebaut werden konnten. Diese Fähigkeiten, die nicht kurzfristig erworben werden können, sind wesentliche Errungenschaften der Forschungstradition in Deutschland.

## Strategie zur Entwicklung der Sonnenforschung in Deutschland

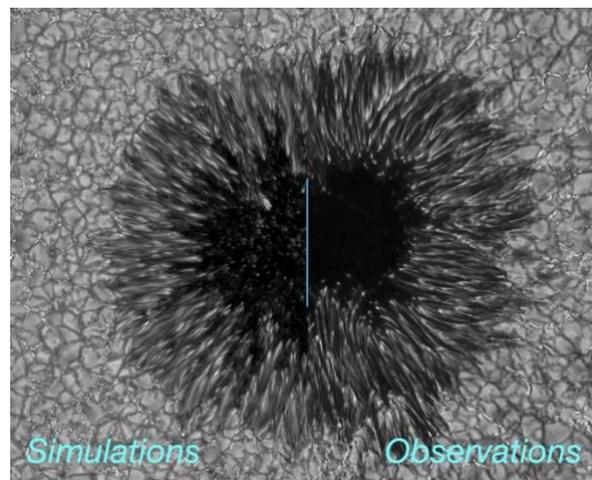
### Herausforderungen zur Physik der Sonne und Heliosphäre in der nächsten Dekade

Die Sonnen- und Heliosphärenphysik ist ein Gebiet an der Schnittstelle zwischen astronomischer und physikalischer Grundlagenforschung und der Untersuchungen der vielfältigen Auswirkungen der Sonne auf unser Leben hier auf der Erde. Zentrale Fragen in diesem Bereich, an denen auch hier in Deutschland intensiv gearbeitet wird, sind:

- Wie erzeugt die Sonne ihr Magnetfeld und damit die Struktur und Dynamik in ihrer Atmosphäre?
- Wie bestimmt dies die Variabilität der solaren Helligkeit und den Einfluss der Sonne auf das Klima?
- Wie treibt dies den Sonnenwind, Sonneneruptionen und damit das Weltraumwetter an?
- Wie kann die Sonne zur Erforschung anderer Sterne und Exoplaneten dienen?

Obwohl bekannt ist, dass das Magnetfeld der Sonne, das für ihre Variabilität und Aktivität verantwortlich ist, durch einen Dynamoprozess im Sonneninneren erzeugt wird, sind wichtige Probleme noch ungeklärt. So ist die grundsätzliche Frage offen, ob es im Sonneninnern nur einen Dynamo gibt oder ob mehrere Dynamos parallel arbeiten. Außerdem sind grundlegende Fragen zur Hydrodynamik magnetisierter Flüssigkeiten nur teilweise geklärt. Um den Dynamo besser zu verstehen, ist es wichtig, das Sonneninnere besser zu erforschen. Dies erfordert die Weiterentwicklung der Helioseismologie sowie Langzeitbeobachtungen des Magnetfelds auf der Sonnenoberfläche, auch und insbesondere an den Polen der Sonne.

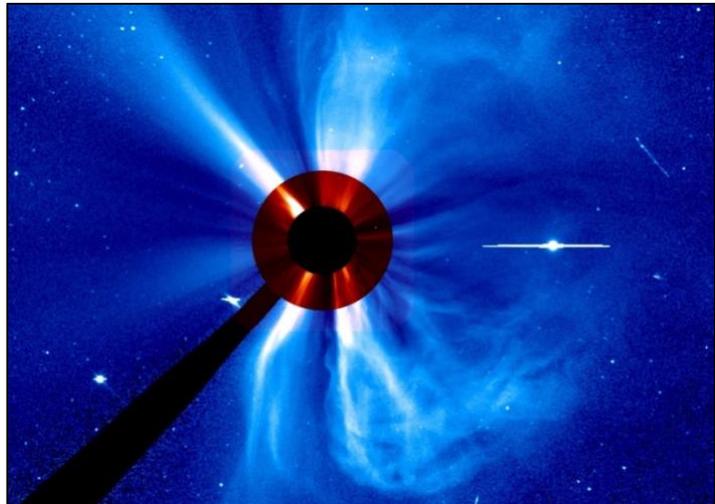
Das im Inneren erzeugte Magnetfeld zeigt sich an der Oberfläche in einer Mischung aus großen dunklen Sonnenflecken und kleinen hellen Elementen, den Fackeln. Zusammen bestimmen sie die Variation der Helligkeit der Sonne und damit den variablen klimarelevanten Energieeintrag in die Erdatmosphäre. Eine wesentliche Herausforderung besteht darin, die Variabilität bei verschiedenen Wellenlängen, insbesondere im UV, zu messen und



**Sonnenflecken** sind die beeindruckende Manifestation des im Inneren der Sonne erzeugten Magnetfeldes. Aufgrund des starken Magnetfeldes ist das Plasma hier kühler. Dieses Bild zeigt zugleich die hervorragende Qualität, mit der moderne 3D-Modelle die Struktur eines Sonnenflecks reproduzieren können: die linke Bildhälfte zeigt eine Simulation, die rechte eine Beobachtung. Zum Vergleich: Die Erde würde leicht in den dunklen mittleren Bereich hineinpassen.

zu verstehen. Dazu sind komplexe Modelle des Strahlungstransports, gekoppelt mit Beobachtungen der magnetischen Strukturen in höchster räumlicher Auflösung notwendig. Solche Modelle und Beobachtungen sind auch ein Schlüssel zur besseren Charakterisierung von Exoplaneten. Diese Modelle können als Referenz dienen, um z.B. das Licht, das von einem Exoplaneten um den Stern herum absorbiert wird, richtig zu interpretieren. Nur ein Vergleich der Modelle mit der Sonne, wo einzelne Strukturen in der Atmosphäre aufgelöst werden können, kann sie mit der nötigen Zuverlässigkeit validieren.

In der oberen Atmosphäre der Sonne führen die räumliche Struktur und die zeitliche Veränderung des Magnetfeldes einerseits zu einer starken Aufheizung des Gases. Andererseits führt die Speicherung und Freisetzung von magnetischer Energie zu eruptiven Ereignissen, bei denen Material und Magnetfelder ausgeworfen werden, die das Weltraumwetter maßgeblich bestimmen. Eine wesentliche Herausforderung ist dabei das Verständnis der magnetischen Kopplung von der Oberfläche bis in die Heliosphäre, welches ein typisches Problem bei der Verknüpfung von kleinen und großen Skalen ist. Um diese Probleme zu lösen und damit die Grundlage für das Verständnis des Weltraumwetters zu schaffen, ist eine enge Verknüpfung von komplexen Modellen mit Beobachtungsdaten notwendig, ähnlich wie dies heute bereits bei der Wettervorhersage der Fall ist. Methoden der künstlichen Intelligenz können dann die Vorhersagen effizienter machen und verbessern.



**Koronaler Masseauswurf (CME)**, bei dem Material von der Sonne in den interplanetaren Raum geschleudert wird. Hier ein Bild zusammengesetzt aus zwei Aufnahmen von Koronographen im Weltraum (LASCO/SOHO) mit unterschiedlichem Gesichtsfeld (rot/blau), die einen schalenartigen Auswurf in die rechte Bildhälfte hinein zeigen. Die kleinen Punkte sind Sterne, der große Strich eine Überbelichtung durch einen Planeten. Die Sonne ist hinter der schwarzen Scheibe.

Für die anstehenden Herausforderungen ist die Sonnenphysik in Deutschland grundsätzlich sehr gut aufgestellt. Auf der Seite der Modellierung wurden hier numerische Methoden entwickelt, um z.B. die Variabilität der Sonnenhelligkeit zu beschreiben, die komplexen Wechselwirkungen von Gas, Magnetfeld und Strahlung in einem Plasma zu untersuchen (3D-Strahlungs-Magnetohydrodynamik), oder die Struktur und Entwicklung der Heliosphäre zu verstehen. In all diesen Bereichen sind deutsche Einrichtungen führend, was auch auf den Zugang zu exzellenten Höchstleistungsrechnern in Deutschland zurückzuführen ist. Analog zur Wettervorhersage, die mit der Qualität der Beobachtungen steht oder fällt, ist es von entscheidender Bedeutung, dass die in Deutschland tätigen Forschenden auch weiterhin Zugang zu einer vergleichbar exzellenten Forschungsinfrastruktur im Bereich der Instrumentierung und Beobachtung haben. Insofern konzentriert sich die folgende Strategiediskussion auf die entsprechenden Einrichtungen.

## Nachhaltige Sicherung der Sonnenphysik in Deutschland

Es ist von übergeordnetem Interesse, die Erforschung von Sonne und Heliosphäre in Deutschland zu sichern, so dass dieses Gebiet seine traditionell sehr starke internationale Rolle behaupten kann. Dies ist begründet durch die Relevanz dieses Forschungsfeldes für unsere Gesellschaft: bei der Erforschung der Rolle der Sonne für das Klima über längere Zeiträume und für ein Verständnis und die Vorhersage des Weltraumwetters.

Ein wichtiger Aspekt hierbei betrifft das Institut für Sonnenphysik (KIS) in Freiburg. Aufgrund einer negativen Förderentscheidung im Jahr 2023 ist das Institut zum Ende des Jahres 2023 aus der Leibniz-

Gemeinschaft ausgeschieden. Damit ist der Fortbestand des Standortes Freiburg akut gefährdet. Dies hat negative Auswirkungen auf die gesamte deutsche, aber auch auf die internationale Sonnenphysik, da das KIS federführend die deutschen Teleskope Gregor und VTT auf Teneriffa betreibt, wichtige Instrumente am Boden (z.B. für DKIST) und im Weltraum (für Solar Orbiter/PHI) beisteuert, bzw. beigesteuert hat und zentrale Entwicklungsarbeiten für ein nachhaltiges Datenmanagement leistet. Zudem stehen mit dem Institutsneubau nun noch bessere Werkstätten für eine weitere Professionalisierung der Entwicklungsarbeiten zur Verfügung. **Hier gilt es, die in Freiburg aufgebaute Expertise in Deutschland zu halten und durch die Entwicklung einer neuen nationalen Strategie die Aktivitäten des Freiburger Instituts in neuen Formen auch, aber nicht unbedingt ausschließlich, am Standort Freiburg zu stärken.**

Ein entscheidender Faktor für den herausragenden Erfolg der astronomischen Forschung in Deutschland ist die enge Verzahnung von Forschungseinrichtungen (Max-Planck-Gesellschaft und Leibniz-Gemeinschaft) und astronomischen Instituten an den Universitäten. Im Bereich Sonne und Heliosphäre ist diese Vielfalt in Deutschland bisher weniger ausgeprägt, womit sich hier Potential zu weiteren Verbesserungen bietet. Die Forschung zur Sonne selbst ist vor allem an Forschungseinrichtungen verankert (KIS, AIP, MPS, TLS), die Physik der Heliosphäre wird vor allem an Universitäten bearbeitet (Universitäten Kiel und Bochum). **Eine Stärkung der universitären Sonnenforschung wäre von großer Bedeutung, um einerseits die universitären Partner zu stärken und andererseits eine breite Nutzung der Forschungsinfrastruktur in Forschung und Ausbildung zu gewährleisten.**

### Nationales Sonnenobservatorium von internationaler Bedeutung

**Die Schaffung eines nationalen Sonnenobservatoriums als Dachorganisation ist ein wichtiger Schritt, um die Sonnenphysik in Deutschland für zukünftige Herausforderungen zu sichern.** Es wird die wichtigsten existierenden bodengebundenen Einrichtungen zur Sonnenbeobachtung zusammenfassen und die Vorbereitungen für neue Infrastruktur koordinieren.

Eine solche Einrichtung wird die Sonnenbeobachtung unabhängiger von lokalen Entscheidungen machen. Ein Beispiel hierfür ist die negative Förderentscheidung für das KIS in Freiburg, welche weitreichende negative Folgen auch für andere Sonnenforschungseinrichtungen in Deutschland und darüber hinaus hat, vor allem weil das KIS das Sonnenobservatorium auf Teneriffa betreibt.

Deutsche und internationale Partner betreiben am Gregor-Teleskop und am VTT wichtige Instrumente für die Sonnenforschung, die nicht mehr zur Verfügung stünden, sollte das Observatorium durch die negative Förderentscheidung in Mitleidenschaft gezogen werden. Erhebliche Investitionen und jahrelange Entwicklungsarbeit werden damit von einem Tag auf den anderen entwertet. Ebenso werden Entwicklungsarbeiten für das European Solar Telescope (EST), die in den optischen Labors dieser Teleskope durchgeführt wurden und werden, nicht mehr möglich sein und ein deutscher Knoten für das weltumspannende Monitoring-Netzwerk SPRING würde seine mögliche Heimat am Observatorium Teneriffa verlieren.

Für ein nationales Sonnenobservatorium wird eine breite Trägerschaft benötigt, die finanziell nachhaltig aufgestellt ist und langfristige Perspektiven sichert. Schließlich haben viele Projekte zur Instrumentierung lange Laufzeiten. Die Rollenver-



#### Deutsche Sonnentelkope auf Teneriffa.

Gregor (links) und VTT (rechts). Sie befinden sich auf knapp 2400 m Höhe. Das kleine Bild zeigt die kompakte Teleskopstruktur von Gregor. Beide Teleskope sind der erste Schritt zu einem nationalen Sonnenobservatorium als Dachorganisation für bodengebundene solare Forschungsinfrastruktur in Deutschland.

teilung der bisherigen Partner der deutschen Sonnenteleskope wird überdacht. Darüber hinaus sollen neue Partner für den Betrieb des nationalen Sonnenobservatoriums gewonnen werden, die bisher noch nicht am Observatorium Teneriffa beteiligt sind, zum Beispiel die Thüringer Landessternwarte. Eine breitere Lastenverteilung und eine zusätzliche Finanzierung über die beteiligten Institute hinaus werden die Trägerschaft des nationalen Sonnenobservatoriums unabhängiger von Entscheidungen an oder über einzelne Institute gestalten.

Ein erster Teil des nationalen Sonnenobservatoriums wird aus den bestehenden Einrichtungen auf Teneriffa bestehen, sowie der Nutzung der LOFAR-Knoten in Deutschland zur Sonnen- und Heliosphärenbeobachtung. Wie in der astronomischen Forschungslandschaft üblich, sollen alle Partner (auch weiterhin) Instrumentierung entwickeln und bereitstellen. Ein so betriebenes nationales Sonnenobservatorium könnte seine internationale Bedeutung auch langfristig sichern.

### Perspektiven für bodengebundene Beobachtungen

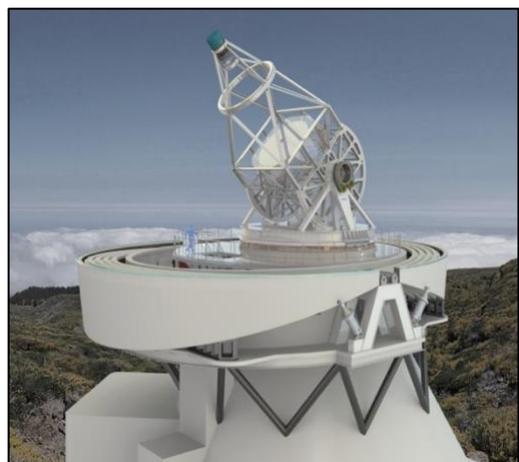
Um mittel- und langfristig die technologische Souveränität im Bereich der bodengebundenen Sonnenbeobachtung zu erhalten, müssen verschiedene Wege für neue Instrumentierungsprojekte besprochen werden. Dazu gehören ein kontinuierliches Monitoring der Sonne durch SPRING und ein neues großes europäisches Sonnenteleskop (EST) für die Beobachtung der Sonne bei höchster räumlicher Auflösung.

Das kontinuierliche Monitoring der Sonne ist von großer Bedeutung, insbesondere für grundlegende Prozesse, die auch für das Weltraumwetter wichtig sind. **Eine hochmoderne Infrastruktur hierfür entsteht derzeit an der TLS in Tautenburg als Prototyp für das weltumspannende SPRING-Netzwerk, das eine kontinuierliche Beobachtung der ganzen Sonnenscheibe gewährleisten wird.** SPRING wird bei der weiteren Entwicklung durch Ingenieurs- und Werkstattunterstützung von den Erfahrungen des KIS profitieren. Ein SPRING-Beobachtungsknoten wird in ein nationales Sonnenobservatorium integriert werden. Hierbei wird das deutsche Sonnenobservatorium auf Teneriffa eine zentrale Rolle spielen, da es einen hervorragenden Beobachtungsstandort am VTT zur Verfügung stellt und die zum Betrieb nötige Infrastruktur wie z.B. Datenanbindung und Vor-Ort-Betreuung bereitstellt.

**Um im Bereich der höchstauflösenden Sonnenphysik nicht hinter Entwicklungen in den USA oder China zurückzufallen, ist es notwendig, ein großes European Solar Telescope (EST) voranzutreiben.** Deutschland hat sich intensiv an der Konzeptentwicklung und dem Design von EST beteiligt und dazu beigetragen, dass EST seit 2016 als Projekt in der ESFRI Roadmap gelistet ist. Als nächster Schritt ist die Gründung eines European Research Infrastructure Consortium (ERIC) geplant. Mit entsprechender finanzieller Unterstützung kann dann ein nationales Sonnenobservatorium die deutschen Interessen in diesem europäischen Projekt mit Nachdruck vertreten. Die Entwicklung neuartiger Instrumente und die Grund-

#### Aufbau eines Nationalen Sonnenobservatoriums

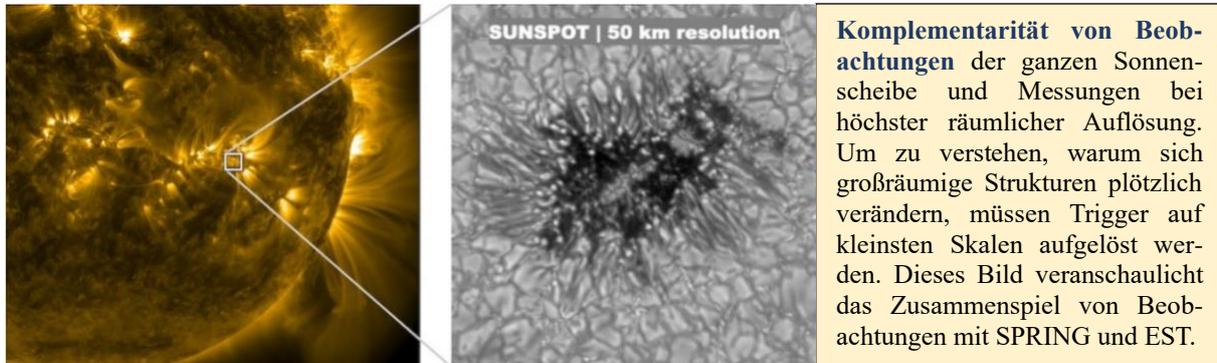
1. Erster Schritt ist die Einbindung der Sonnenteleskope auf Teneriffa (Gregor und VTT).
2. Parallel wird die Koordinierung von Sonnenbeobachtungen mit LOFAR-Radioteleskopen etabliert.
3. Kurzfristig wird ein Knoten des weltumspannenden Netzwerkes SPRING, der an das VTT angegliedert wird, mit eingebunden.
4. Mittelfristig werden vorbereitende Arbeiten zu einem neuen European Solar Telescope (EST) für Beobachtungen bei höchster Auflösung aufgenommen. Diese werden vor allem an Gregor durchgeführt.
5. Langfristig wird der deutsche Beitrag zum Aufbau und Betrieb von EST zentraler Teil des Nationalen Sonnenobservatoriums sein.



**Das European Solar Telescope (EST)** wird mit 4 Metern Öffnung dem derzeit größten Sonnenteleskop, DKIST in den USA ebenbürtig sein. Es ist auf die Bedürfnisse von europäischen Forschenden maßgeschneidert und stellt langfristig die technologische Souveränität Deutschlands und Europas im Bereich der Sonnenforschung sicher.

lagenforschung zur Sonne könnten so langfristig und unabhängig gesichert werden.

Beobachtungen der ganzen Sonnenscheibe (bei vergleichsweise niedriger Auflösung mit SPRING) und höchstauflösende Beobachtungen, die nur einen kleinen Teil der Sonne abdecken (mit EST), sind hochgradig komplementär. Erstere erlauben die Untersuchung von globalen Vorgängen auf der Sonne, die z.B. für die Vorhersage des Weltraumwetters relevant sind. Letztere geben Einblick in die kleinräumigen Veränderungen und Prozesse, die für das Auslösen („Trigger“) großer Veränderungen wichtig sind. Dies stellt zwei Seiten einer Medaille dar, die erst gemeinsam ein komplettes Bild ergeben

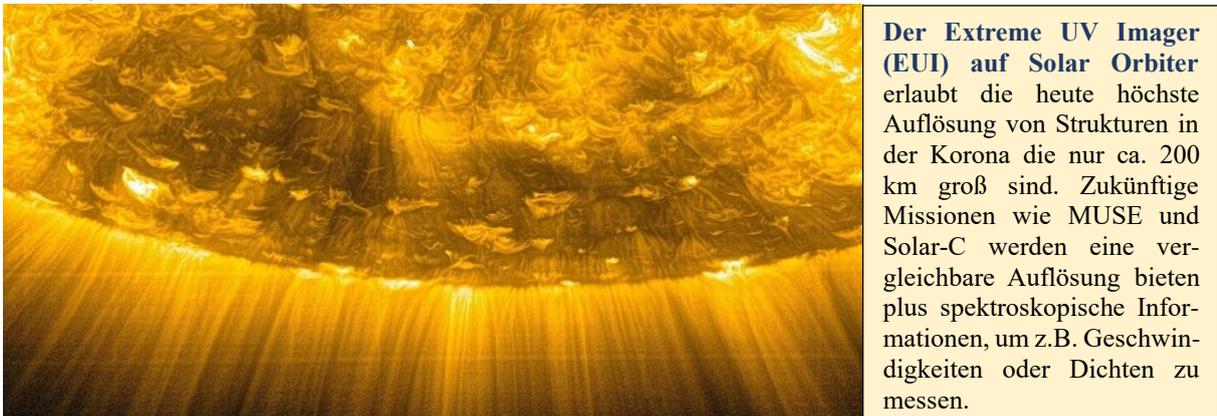


können.

## Perspektiven für weltraumgestützte Beobachtungen

Weltraumplattformen ermöglichen den Zugang zu einem auf der Erde nicht zugänglichen Wellenlängenbereich, Beobachtungen der erdabgewandten Seite und der Polarregionen der Sonne sowie direkte Messungen des Zustands des interplanetaren Raums. Entsprechende Missionen haben sehr lange Vorlaufzeiten, so dass ein Zyklus vom Missionsvorschlag bis zum Abschluss der Datenphase mehr als ein Forscherleben umfassen kann. Umso wichtiger ist eine langfristige Planung. **Deutsche Institute werden, finanziert durch die DLR-Raumfahrtagentur, bei den wichtigsten neuen Missionen zur Sonnenbeobachtung über die nächste Dekade namhafte Beiträge leisten. Hierzu muss der Erhalt des entsprechenden Know-hows in Deutschland sichergestellt werden.**

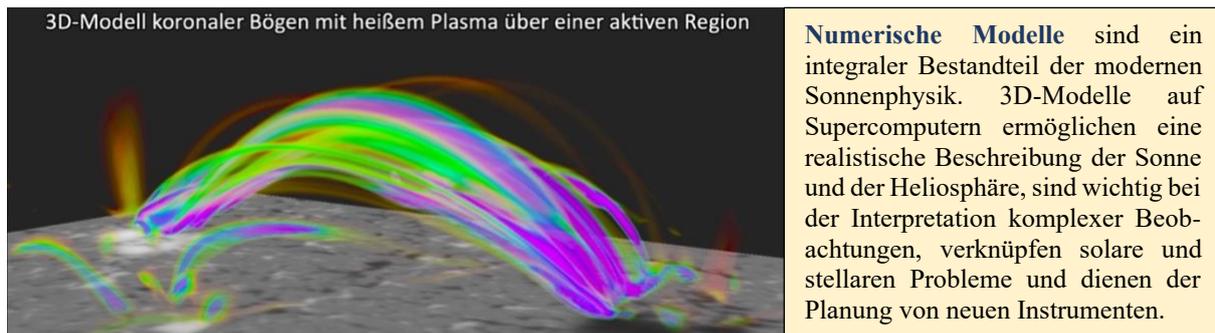
Die deutschen Beteiligungen an kommenden Weltraummissionen betreffen zum einen die japanisch-US-amerikanisch-europäische Spektrometrie-Mission Solar-C. Zum anderen ist Deutschland an der NASA-Mission MUSE beteiligt, mit der erstmals bildgebende Spektroskopie im extremen UV durchgeführt wird. Mit der Beistellung eines Instruments zur Beobachtung des Magnetfeldes an der Sonnenoberfläche leistet Deutschland einen wichtigen Beitrag zur ESA-Mission Vigil. Vigil wird sich auf die Verbesserung der Vorhersage des Weltraumwetters konzentrieren und hat damit eine direkte Relevanz für unsere technisierte Gesellschaft. Forschende in Deutschland sind auch eingeladen worden, Instrumente zu weiteren, ähnlichen Missionen beizutragen, die in anderen Teilen des Sonnensystems platziert werden sollen. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit und großes Interesse, in Deutschland entwickelte und gebaute Instrumente z.B. in die nächste Heliophysics-Flaggschiff-Mission der NASA zu integrieren. Dies könnte z.B. die Firefly-Mission sein, die mehrere Raumsonden beinhaltet.



## Verknüpfung zur Physik des Weltraumwetters und zur Klimaforschung

Bei der Erforschung des solaren Einflusses auf das Klima über lange Zeiträume gibt es heute verschiedene Ansätze, die in ihren Ergebnissen um eine Größenordnung auseinander liegen. Ein Beispiel ist die Sonnenhelligkeit während der Kleinen Eiszeit im 17. Jahrhundert, als die Sonne fast keine Sonnenflecken zeigte. Um die Frage zu beantworten, wie stark die Sonne das Klimageschehen seither beeinflusst hat, müssen historische Daten mit modernsten Aufnahmen weltraumgestützter Teleskope kombiniert werden. Dank der intensiven Digitalisierung historischer Daten unter Federführung von Sonnenforschenden aus Deutschland, wie auch der neuen Weltraummissionen Solar Orbiter und Aditya-L1, sind wir in der Lage, diese Fragen innerhalb der nächsten Dekade zu beantworten.

Auch bei der Verbesserung der Vorhersage von Weltraumwetterereignissen gibt es neue Ansätze, die im nächsten Jahrzehnt Früchte tragen werden. Die ESA-Mission Vigil wird das Sonne-Erde-System aus einem neuen Blickwinkel betrachten. Das Schlüsselinstrument dieser Mission, PMI, wird von Deutschland beigesteuert. Das bodengebundene weltumspannende Netzwerk SPRING, maßgeblich in Deutschland entwickelt, wird dynamische Prozesse und schnelle eruptive Ereignisse, die das Weltraumwetter bestimmen, über lange Zeiträume beobachten. Gerade vollzieht sich ein Wandel in der Modellierung des Weltraumwetters von empirisch-statistischen zu physikbasierten Modellen, die ein Verständnis der relevanten physikalischen Prozesse erfordern. Grundlage hierfür ist die Plasmaphysik der Heliosphäre, eine Schnittstelle zur Theorie astrophysikalischer Plasmen, zur Laborplasmaphysik und zur Geophysik. Eine breitere Vernetzung der bestehenden Kompetenz zu Theorie und High-Performance-Computing in Deutschland in diesen Bereichen wird neue Impulse setzen. Gemeinsam mit Methoden der künstlichen Intelligenz, die in der Sonnenphysik bereits vielfältig eingesetzt werden, wird dies die Effizienz und Qualität von Weltraumwettervorhersagen verbessern.



**Numerische Modelle** sind ein integraler Bestandteil der modernen Sonnenphysik. 3D-Modelle auf Supercomputern ermöglichen eine realistische Beschreibung der Sonne und der Heliosphäre, sind wichtig bei der Interpretation komplexer Beobachtungen, verknüpfen solare und stellare Probleme und dienen der Planung von neuen Instrumenten.

## Enge Anbindung der Sonnenforschung an die stellare Astrophysik

Die Sonne ist der erste Meilenstein auf dem Weg zum Verständnis der Strukturen des Universums. Fortschritte in der Beobachtung und Modellierung werden im kommenden Jahrzehnt eine intensive Befruchtung zwischen Sonnenphysik und stellarer Astrophysik ermöglichen, auch und insbesondere im Austausch mit dem im Aufbau befindlichen Deutschen Zentrum für Astrophysik (DZA).

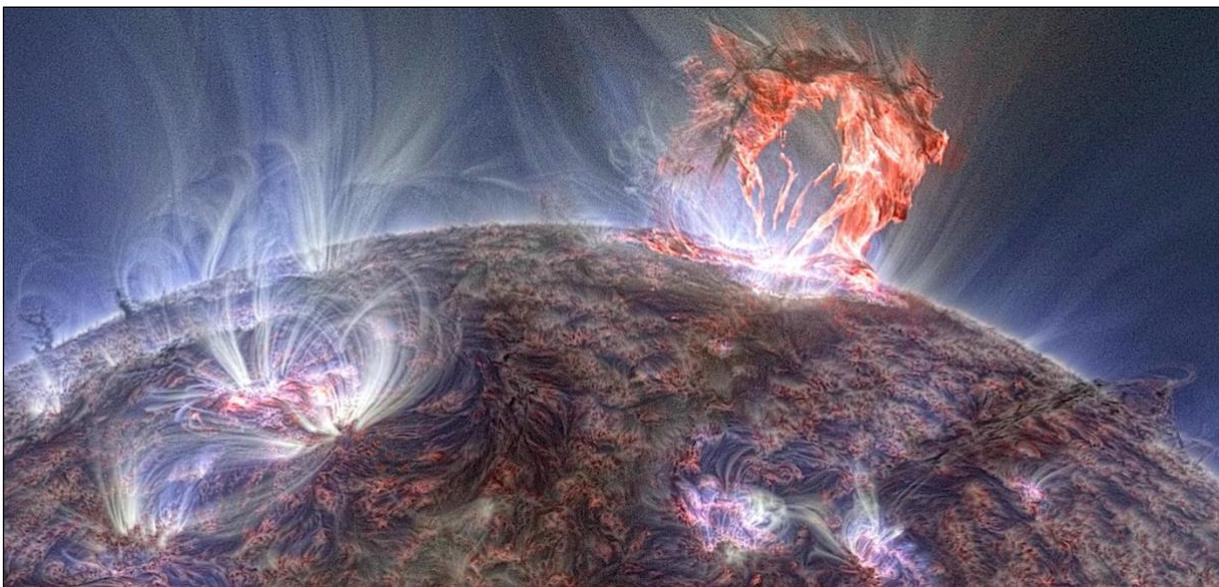
Ein wichtiger Meilenstein ist dabei die Beobachtung der Sonne und anderer Sterne mit identischen Instrumenten, z.B. PEPSI-SDI, was für direkte Vergleiche elementar ist. Auch neue dreidimensionale Modelle spielen eine zentrale Rolle. Diese können an räumlich hochaufgelösten Beobachtungen der Sonne validiert und dann auf andere Sterne übertragen werden. Deutsche Institute waren und sind führend bei der Entwicklung entsprechender Computercodes und Anwendungen, z.B. bei MURaM oder CO<sup>5</sup>BOLD. Umgekehrt werden die Anwendungen auf Sterne, die einen viel größeren Parameterbereich abdecken, wichtige neue Erkenntnisse zur Physik der Sonne liefern. Hier werden die unter deutscher Leitung entwickelte ESA-Mission PLATO und der unter führender deutscher Beteiligung in Entwicklung befindliche ANDES-Spektrograph eine wichtige Rolle spielen.

Diese Methodiken werden in eine Vielzahl neuer Erkenntnisse zu den solar-stellaren Beziehungen, bei der Suche nach Exoplaneten und der Interpretation der Spektren von Exoplaneten münden. Hier gibt es neue Initiativen, zu denen Forschende in Deutschland entscheidende Beiträge leisten, mit signifikanter finanzieller Unterstützung von nationalen (z.B. DLR) und internationalen (z.B. ERC) Geldgebern.

## Handlungsempfehlungen

Die Strategie zur Entwicklung der Sonnen- und Heliosphärenphysik in Deutschland bezieht sich auf die Herausforderungen in diesem Forschungsfeld in der kommenden Dekade. Einerseits soll die technologische Souveränität Deutschlands und Europas in Hinblick auf international wettbewerbsfähige Forschungsinfrastrukturen gesichert werden. Andererseits wird die Basis der Sonnenforschung in Deutschland verbreitert und damit eine nachhaltige Arbeit an gesellschaftlich relevanten Themen sichergestellt. Daraus ergeben sich eine Reihe konkreter Handlungsempfehlungen:

- Höchste Priorität hat die Einrichtung eines nationalen Sonnenobservatoriums von europäischer Tragweite mit einer breiteren Arbeitsteilung zwischen mehreren Instituten in Deutschland. Perspektivisch werden in dieser Dachorganisation Vorhaben zur bodengebundenen Beobachtung zusammengefasst, zunächst die jetzigen optischen Sonnentelkope auf Teneriffa, und die Durchführung von Sonnenbeobachtungen an Radioteleskopen, wie z.B. LOFAR.
- Ähnliche Relevanz hat der Erhalt des Standorts Freiburg als ein Zentrum für die Erforschung der Sonne in Deutschland. Mit den exzellenten Werkstätten im gerade bezogenen Institutsneubau und dem Alleinstellungsmerkmal im Instrumentenbau, z.B. des VTF, ginge andernfalls zentrale Expertise unwiederbringlich verloren und würde die Sonnenphysik in Deutschland und Europa nachhaltig geschädigt.
- Von sehr großer Wichtigkeit ist die Beibehaltung der Führungsrolle bei der Entwicklung der nächsten Generation eines weltumspannenden internationalen Netzwerks zum kontinuierlichen Monitoring der Sonne (SPRING), was von zentraler Bedeutung u.a. für ein Verständnis des Weltraumwetters ist. Der deutsche Knoten am Standort Teneriffa ist dann Teil des nationalen Sonnenobservatoriums.
- Ebenso wichtig ist eine starke deutsche Rolle bei der Entwicklung der nächsten Generation europäischer Sonnentelkope, insbesondere des hochauflösenden European Solar Telescope mit 4 Metern Öffnung, koordiniert durch das nationale Sonnenobservatorium.
- Weiterhin muss das Know-how bei der Entwicklung von Instrumenten zur weltraumgestützten Erforschung der Sonne und der Heliosphäre erhalten bleiben und eine sichtbare Beteiligung an entsprechenden Missionsvorschlägen sichergestellt werden.
- Schließlich ist eine Verbreiterung der Basis der Sonnenforschung an Forschungsinstituten und Universitäten anzustreben, um den zukünftigen wissenschaftlichen Herausforderungen gerecht zu werden und gleichzeitig exzellenten wissenschaftlichen Nachwuchs auszubilden.



**Strahlungsausbruch (Flare) und Koronaler Masseauswurf auf der Sonne.** Verschiedene Farben stellen Plasma bei verschiedenen Temperaturen von bis zu mehreren Millionen Grad Celsius dar.

## Abkürzungsverzeichnis und Glossar

AIA/SDO	<i>Atmospheric Imaging Assembly</i> auf dem Solar Dynamics Observatory der NASA.
Aditya	Sonnenobservatorium der indischen Raumfahrtagentur ISRO
ANDES	<i>Armazones high Dispersion Echelle Spectrograph</i> für das Extremely Large Telescope der ESO
AIP	Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
Chromosphäre	Bereich über der Photosphäre, der den Übergang in die Korona markiert.
CME	Koronaler Masseauswurf: explosionsartiges Auswerfen von Plasma und Magnetfeld von der Sonne in die Heliosphäre, das beim Treffen der Erde starke Störungen im Erdmagnetfeld auslösen kann. Oft gemeinsam mit Flares.
CO <sup>5</sup> BOLD	3D MHD-Code entwickelt u.a. am AIP und KIS
CO-I	Co-Investigator
CO-PI	Co-Principal Investigator
DKIST	Daniel K. Inouye Solar Telescope, größtes Sonnenteloskop mit 4 m Öffnung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DZA	Deutsches Zentrum für Astrophysik, Görlitz
EPD	Energetic Particle Detector auf Solar Orbiter
ERIC	European Research Infrastructure Consortium
ERC	European Research Council
ESA	European Space Agency
ESFRI	European Strategy Forum on Research Infrastructures
EST	<i>European Solar Telescope</i> . Projektiertes Sonnenteloskop mit 4 m Öffnung
EU	European Union
EUI	<i>Extreme Ultraviolet Imager</i> auf Solar Orbiter
Flare	Strahlungsausbruch der Sonne: Erhöhte Emission von energiereichen Teilchen und elektromagnetischer Strahlung über alle Wellenlängen infolge von explosionsartiger Freisetzung von magnetischer Energie. Oft gemeinsam mit CMEs.
Galileo	Weltweit nutzbares Navigations- und Zeitgebungssystem der EU
GPS	<i>Global Positioning System</i> des Verteidigungsministeriums der USA
GST	<i>Goode Solar Telescope</i> mit 1.5-Meter-Öffnung, Big Bear, Kalifornien
Gregor	Mit 1.5-Meter-Öffnung größtes Sonnenteloskop Europas auf Teneriffa
Helioseismologie	Mit Methoden der Seismologie werden aus den Schwingungen an der Sonnenoberfläche Rückschlüsse auf z.B. Temperatur und Strömungen im Inneren gezogen.
Heliosphäre	Der vom solaren Plasma und Magnetfeld eingenommene, das gesamte Sonnensystem umfassende Raum.
IAC	Instituto de Astrofísica de Canarias, La Laguna, Tenerife
IBEX	<i>Interstellar Boundary Explorer</i> , Small Explorer der NASA
KIS	Institut für Sonnenphysik, Freiburg (ehemals Kiepenheuer-Institut)
Korona	Äußere Atmosphäre der Sonne, Millionen Grad heiß.
LBT	Large Binocular Telescope, Doppelteleskop mit je 8.4 m Öffnung, Arizona, USA
Metis	Koronagraph auf Solar Orbiter
LOFAR	<i>Low Frequency Array</i> , Europäisches Radioteleskop-Netzwerk
MAG	Magnetometer zur Magnetfeldmessung im Sonnenwind auf Solar Orbiter
MHD	Magneto-Hydrodynamik: Wechselwirkung von Flüssigkeiten und Magnetfeld
MPS	Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, Göttingen.
MURaM	3D MHD-Code federführend entwickelt am MPS
MUSE	<i>Multi-Slit Solar Explorer</i> für solare UV-Spektroskopie der NASA
NASA	National Aeronautics and Space Administration der USA
Parker Solar Probe	Mission der NASA, die der Sonne sehr nahekommt
PEPSI	Potsdam Echelle Polarimetric and Spectroscopic Instrument für das LBT
PEPSI-SDI	<i>Solar Disk Integrated Telescope</i> für PEPSI

PHI	<i>Polarimetric and Helioseismic Imager</i> auf Solar Orbiter
Photosphäre	Im optischen sichtbarer Bereich der Atmosphäre, Oberfläche der Sonne.
PI	Principal Investigator
Plasma	Heißes ionisiertes Gas, das mit einem Magnetfeld wechselwirken kann
PLATO	ESA-Mission zu <i>PLANetary Transits and Oscillation of stars</i>
PMI	<i>Photospheric Magnetic field Imager</i> für die Vigil-Mission der ESA
RPW	<i>Radio and Plasma Waves Detector</i> auf Solar Orbiter
SOHO	<i>Solar and Heliospheric Observatory</i> von ESA und NASA, gestartet 1995
Solar-C	Mission zur UV-Spektroskopie der Sonne von Japan, USA und Europa
SOLARNET	Von der EU mit 10 Millionen Euro gefördertes Netzwerk zu Sonnenforschung
Solar Orbiter	Flaggschiffmission zur Untersuchung der Sonne von ESA und NASA
SoloHI	<i>Heliospheric Imager</i> auf Solar Orbiter
Sonnenaktivität	Alle Phänomene der Sonne, die durch das Magnetfeld hervorgerufen werden; z.B. Sonnenflecken, koronale Masseauswürfe, Änderungen der solaren Helligkeit oder die Aufheizung der Korona, die dann im Röntgenlicht strahlt
Sonnenwind	Kontinuierlicher Strom elektrisch geladener Teilchen, die die Sonne verlassen und so die Heliosphäre füllen
SPICE	<i>Spectral Imaging of the Coronal Environment</i> auf Solar Orbiter
SPRING	<i>Solar Physics Research Integrated Network Group</i> : Ein weltumspannendes Netzwerk zum lückenlosen Monitoring der Sonne
STIX	<i>Spectrometer Telescope for Imaging X-rays</i> auf Solar Orbiter
SWA	<i>Solar Wind Plasma Analyser</i> auf Solar Orbiter
TLS	Thüringer Landesternwarte Tautenburg
UV	Ultraviolett, kurzwelliger nicht-sichtbarer Spektralbereich
Vigil	ESA-Mission im Space Safety Programm zur Untersuchung des Weltraumwetters
VTF	<i>Visible Tunable Filter</i> , 2D-Spektrograph und Polarimeter für DKIST
VTT	<i>Vakuum-Turm-Teleskop</i> zur Sonnenbeobachtung auf Teneriffa mit 0.7 m Öffnung

### Bildnachweise

- Seite 4 Infographik auf Basis von [ESA-Material](#), H. Peter.
- Seite 5 Sonnenscheibe mit SDO (vlnr): Weißlicht, 30.4 nm, 171 nm. Erstellt mit [Helioviewer](#) der ESA, H. Peter.
- Seite 6 Zusammenstellung von Infographiken von [NOAA](#) und [ESA](#), H. Peter.
- Seite 7 Daten von AIA/SDO. Bearbeitung: links: L.P. Chitta, MPS, rechts: [M. Druckmüller](#).
- Seite 8 Sonnenfinsternisbild: [M. Druckmüller](#); UV-Bild bei 17.1 nm von SDO/NASA über [Helioviewer](#) der ESA.
- Seite 10 DKIST- Bild: [NSO-Webseite](#), Bild des VTF: KIS.
- Seite 11 Pressefoto der ESA.
- Seite 12 Simulation von M. Rempel, HAO/NCAR und Sonnenbild von F. Wöger, NSO, beide Boulder, USA.
- Seite 13 Koronographenaufnahme mit Lasco/C2/C3 auf SOHO, 5.5.2000, erstellt mit [Helioviewer](#) der ESA, H. Peter.
- Seite 14 Teleskopbilder: KIS, AIP.
- Seite 15 Konzeptzeichnung von EST, <https://www.est-east.eu/est-gallery>.
- Seite 16 (oben) Beispielbild von AIA/SDO und hochaufgelöste Aufnahme mit Gregor, KIS.
- Seite 16 (unten) Aufnahme von EU1 / Solar Orbiter bei 17.4 nm. Bildbearbeitung: L.P. Chitta, MPS.
- Seite 17 Koronasimulation von Chen, Peter, Bingert & Cheung (2015) Nature Phys. 11, 492, Bearbeitung: H. Peter.
- Seite 18 Aufnahme vom 16. 4. 2012 mit AIA/SDO, Kombination aus Bildern bei 17.1 nm, 21.1 nm und 30.4 nm. Bearbeitung: [M. Druckmüller](#), Institute of Mathematics, Brno University of Technology, Czech Republic.