

# Magnetisches Sonnensystem

Ulrich von Kusserow · Eckart Marsch

# Magnetisches Sonnensystem

Solare Eruptionen, Sonnenwinde und  
Weltraumwetter



Springer

Ulrich von Kusserow  
Bremen, Deutschland

Eckart Marsch  
Institut für Experimentelle und Angewandte  
Physik, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel,  
Kiel, Deutschland

ISBN 978-3-662-65400-2      ISBN 978-3-662-65401-9 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-65401-9>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2023

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Margit Maly, Christian Gass, Caroline Strunz, Gabriele Ruckelshausen  
Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

*Ulrich von Kusserow widmet dieses Buch seiner Ehefrau Angelika, seinen Kindern Mara und Jonas sowie den Enkelkindern Malia, Olivia und Milo.*

*Eckart Marsch widmet dieses Buch seinen Kindern Caroline, Kristofer und Konstantin sowie seinen Enkelkindern Justus und Merle.*

# Geleitwort

Die Sonne ist der Stern, der unser Leben bestimmt und über den wir meinen, ihn von allen Sternen im Universum am besten zu kennen. Wir nehmen seine Strahlung als Wärme wahr, kennen Sonnenflecken auf seiner Oberfläche, und mitunter, wenn der Mond die sichtbare Sonnenscheibe komplett bedeckt, sehen wir für kurze Zeit seine lichtschwache äußere Atmosphäre, die Korona der Sonne. Als prominenter Augenzeuge einer Sonnenfinsternis schrieb Adalbert Stifter: „Es gibt Dinge, die man fünfzig Jahre weiß, und im einundfünfzigsten erstaunt man über die Schwere und Furchtbarkeit ihres Inhaltes. So ist es mir mit der totalen Sonnenfinsternis ergangen, welche wir in Wien am 8. Juli 1842 in den frühesten Morgenstunden bei dem günstigsten Himmel erlebten.“ Sowohl Sonnenfinsternisse als auch Sonnenflecken sind uns Menschen seit Anbeginn des Lebens bekannt. Mit der gezielten Beobachtung der Flecken zu Beginn des 16. Jahrhunderts und wenig später auch ihrer systematischen Erfassung wurden Zusammenhänge mit kurzzeitigen Schwankungen des Erdmagnetfelds festgestellt, die häufig mit dem Auftreten von Polarlichtern verbunden waren. Dies führte zu ersten Vermutungen über mögliche Zusammenhänge zwischen Vorgängen auf der Sonne und der Erde.

Alexander von Humboldt berichtete 1808 über ein von ihm beobachtetes „magnetisches Ungewitter“ in den *Annalen der Physik*. Das extremste derzeit bekannte „magnetische Ungewitter“ stammt aus dem Jahr 1859. Richard C. Carrington beobachtete damals wenige Minuten lang intensive Lichtblitze in einer großen Sonnenfleckengruppe mit einem neu entwickelten Teleskop. Etwa 17 h später trat das stärkste bisher in der Geschichte wissenschaftlicher Aufzeichnungen registrierte magnetische Ungewitter auf, heute

als erdmagnetischer Sturm bezeichnet. Polarlichter waren damals sogar in südlichen Ländern wie Kuba und Panama sichtbar. Unter dem Motto „Eine Schwalbe macht noch keinen Sommer“ formulierte Carrington die möglichen Zusammenhänge zwischen Sonne und Erde damals mit entsprechender Behutsamkeit. Dieses sogenannte Carrington-Ereignis wird heute als Extremereignis herangezogen, um zu untersuchen, wie verletzlich unsere moderne technologische Welt gegenüber solaren Einflüssen und den Auswirkungen des Weltraumwetters ist.

Die als solar-terrestrische Beziehungen eingestuften Phänomene wurden durch das schnell wachsende Verständnis in der Physik, vom Elektromagnetismus und der Ausbreitung elektrischer Wellen, über die Atom-, Quanten- und Plasmaphysik oder experimentellen Anwendungen in der Spektroskopie, Ende des 18. und Anfang des 19. Jahrhunderts bereits zunehmend konkreter beschrieben. So schlugen George Francis Fitzgerald 1892 und Oliver Lodge 1900 vor, dass Sonnenflecken Ausgangsgebiete von elektrisch leitender Materie sein könnten, die die Anziehungskraft der Sonne überwinden, in wenigen Tagen die Erde erreichen und dann erdmagnetische Stürme und Polarlichter auslösen. Lange blieben die physikalischen Zusammenhänge weiterhin unklar, sodass der von Carrington beobachtete Lichtblitz als Hinweis dafür betrachtet wurde, dass diese solaren Flares die Ursache erdmagnetischer Stürme sind. Mit Beginn des Weltraumzeitalters und der Erforschung des erdnahen und interplanetaren Raums mit Satelliten und Raumsonden erfolgte dann mit dem Start von Sputnik 1 im Jahr 1957 ein gewaltiger wissenschaftlicher Sprung.

So konnten die Eigenschaften des magnetisierten Plasmas in der Erdmagnetosphäre und des Sonnenwinds erstmals direkt mit Satelliten gemessen werden. Mit den Mondlandungen der Apollo-Missionen konnten, da der Mond keine Atmosphäre besitzt, Sonnenwindteilchen, die mit speziellen Folien auf dem Mond aufgefangen wurden, auf die Erde gebracht und hier gründlich wissenschaftlich untersucht werden. Die beiden Raumsonden Helios 1 und 2, die in den Jahren 1974 und 1976 gestartet wurden, erforschten den interplanetaren Raum von der Erde bis zur Umlaufbahn des Merkurs und gelten heute noch als eines der Pionierprojekte der Weltraumforschung. 1974 machte das Röntgenteleskop auf der Raumstation Skylab erstmals Aufnahmen der Sonnenkorona in diesem hochenergetischen Spektralbereich, der von der Erdatmosphäre abgeschirmt wird. Überraschenderweise stellte man anhand der Aufnahmen der Korona im Röntgenlicht fest, dass die solaren Quellen der im Rhythmus der Sonnenrotation wiederkehrenden erdmagnetischen Stürme, die von Julius Bartels als M-Regionen bezeichnet wurden, aus magnetisch ruhigen

Gebieten der Korona, den koronalen Löchern, entspringen. Mit Spezialteleskopen, den Koronografen, an Bord des Satelliten OSO-7 und auf Skylab wurden Anfang der 1970er-Jahre gewaltige Ausbrüche in der Sonnenkorona entdeckt: die koronalen Masseauswürfe („coronal mass ejections“, CMEs). Messungen der Sonde Helios 1 zusammen mit zeitgleichen Aufnahmen des Koronografen an Bord des Satelliten P78-1 ergaben einen direkten Zusammenhang mit den von Helios 1 im interplanetaren Raum beobachteten transienten Böen und interplanetaren Stoßwellen im Sonnenwind. Mit stark vom normalen Sonnenwind abweichenden Plasma- und Magnetfeldeigenschaften bewegten sie sich mit Geschwindigkeiten von bis zu 2000 km/s durch das Sonnensystem.

Weitere Analysen von Satellitendaten zeigten, dass CMEs die stärksten Stürme in der Heliosphäre und auf der Erde auslösen können, ohne dass dabei vorher unbedingt ein Flare-Ereignis in der Sonnenatmosphäre beobachtet worden sein müsste. Während der Zeit der Helios-Mission befanden sich die beiden Voyager-Sonden 1 und 2 auf ihrem Weg durch das Sonnensystem. Ihr Start war nicht zufällig von der NASA für das Jahr 1977 gewählt worden: Die zu dieser Zeit bestehende Planetenkonstellation tritt nur alle 175 Jahre auf, so dass die Reise der Sonden an den Planeten Mars, Jupiter, Saturn, Neptun, Uranus und „Pluto“ vorbeiführen konnte. Bei diesen Vorbeiflügen gewannen sie genügend Schwung, um das Sonnensystem und die Heliosphäre zu verlassen. Erstmals im Jahr 2012 konnten mit Voyager 1 Messungen im interstellaren Raum durchgeführt und dabei gewonnene Daten zur Erde gesandt werden. Auch heute empfangen wir Informationen von dieser einzigartigen Sonde aus einem Abstand von 176 Astronomischen Einheiten von der Sonne nach einer Laufzeit von nahezu einem Tag.

Nachdem Voyager 2 1989 gerade den Neptun passiert hatte, wurden erstmals der Sonnenwind, solare energiereiche Teilchen und die kosmische Strahlung mit der NASA/ESA-Ulysses-Mission außerhalb der Ekliptik und über den Sonnenpolen vermessen. Nach dem vollendeten dritten Flug dieser Raumsonde über den Sonnennordpol im Jahr 2009 reichte die Stromversorgung nicht mehr aus, um weitere Messungen durchzuführen. Die Mission hat insgesamt fast zwei komplette Sonnenzyklen überdauert und sehr wertvolle direkte Aufschlüsse über den Zustand und das Magnetfeld des Sonnenwinds über den Polen der Sonne und ihre Umpolungen geliefert. Mit der japanischen Mission Yohkoh 1990 gelang mit internationaler Beteiligung ein weiterer großer Durchbruch in der Erforschung der Sonnenkorona im Röntgenbereich. Und im Jahr 1995 folgte der Start des einzigartigen Sonnenobservatoriums SOHO (Solar and Heliospheric

Observatory), welches noch heute nach über 20 Jahren wichtige Daten von der Sonne und ihrer Korona liefert.

Seit dem Start 2006 der STEREO-Satelliten A und B sowie des Solar Dynamics Observatory (SDO) im Jahr 2008 konnte die Sonne aus mehreren Blickwinkeln gleichzeitig und auch in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung beobachtet werden. Zusammen mit weiteren wissenschaftlichen Satellitenmissionen, z. B. der ESA-Cluster-Mission, dem NASA-Satelliten ACE (Advanced Composition Explorer), Wind oder dem Deep Space Climate Observatory (DSCOVR), deren Entwicklungszeiten meist mehr als zehn Jahre betragen, lassen sich die im Sonne-Erde-System, im äußeren Erdmagnetfeld und nahe dem Erdbit ablaufenden dynamischen Plasmaprozesse optisch durch Fernbeobachtung oder mithilfe von In-situ-Messungen vor Ort analysieren. Mit den Kameras der STEREO-Mission konnte die 3-D-Struktur von CMEs in Form eingelagerter großräumiger magnetischer Flussröhren entschlüsselt werden. Erstmals gelang die Beobachtung der Entstehung von CMEs auf der Sonne selbst, und ihre Ausbreitung über den gesamten Bereich des interplanetaren Raums bis hin zur Erde konnte direkt verfolgt werden. Die Ergebnisse einer Vielzahl von Weltraumforschungsmissionen haben im Laufe der letzten Jahrzehnte zu einem neuen und tieferen Verständnis der Einflüsse unserer Sonne auf den Weltraum und die Erde geführt.

Es zeigt sich, dass die Plasmaphysik und das Wissen um den Ursprung und die Variabilität des solaren Magnetfelds sowie anderer Magnetfelder im Sonnensystem von essenzieller Bedeutung auch für das Verständnis vorher nicht oder nur unzureichend verstandener physikalischer Prozesse sind. Das goldene Zeitalter der Erforschung der Sonne und der Heliosphäre weit außerhalb unserer Erde hat zu wesentlichen neuen Erkenntnissen über die Vielfalt der Phänomene und physikalischen Prozesse in unserem Sonnensystem geführt. Diese bilden die Grundlage für die weitere Erforschung der magnetisch aktiven Sonne, des Weltraumwetters und dessen große Bedeutung insbesondere auch in Hinblick auf dessen mögliche Auswirkungen auf unsere modernen technischen Infrastrukturen.

Doch auch heute noch treiben uns grundlegende Fragen an, z. B. nach dem Ursprung des elfjährigen Sonnenfleckenzyklus, den Ursprüngen des Sonnen- und Erdmagnetfelds und deren Umpolungen, der Heizung der Sonnenkorona sowie des Ursprungs und der Beschleunigung des Sonnenwinds. Zur Klärung all dieser Fragen werden die im August 2018 bzw. Februar 2020 gestarteten Parker-Solar-Probe- und Solar-Orbiter-Missionen der NASA und ESA, die in den letzten Jahren bzw. aktuell bereits faszinierende Beobachtungs- und Messergebnisse geliefert haben, in Zukunft



entscheidend beitragen können. Zukünftige Missionen wie die NASA-Mission PUNCH (Polarimeter to Unify the Corona and Heliosphere), die noch unerforschte Regionen zwischen der Sonnenkorona und der Erde erforschen wird, und die ESA-Mission Vigil, die die aktive Sonne überwachen und die Menschheit vor den Folgen heftiger Ausbrüche schützen soll, sowie eine Nachfolgemission für SOHO befinden sich momentan in der Entwicklung oder Planung. Die Sonne bleibt also im Blickfeld aktueller Forschung, gerade auch im Hinblick auf die geplanten zukünftigen Explorationen von Mond und Mars. Dabei gewonnene Erkenntnisse spielen natürlich auch für zukünftige satellitengebundene technologische Entwicklungen, für die Klimaforschung oder den Katastrophenschutz eine wichtige Rolle.

Mit großer Begeisterung habe ich selbst an der Entwicklung und Forschung vieler der genannten Missionen direkt teilhaben dürfen. Dabei hat immer auch das Miterlebendürfen großer aktueller Ereignisse, wie der Mondlandung oder Überquerung der Sonnenpole mit der Ulysses-Sonde, zusammen mit motivierender Fachliteratur eine große Rolle gespielt. In diesem Sinne ist das vorliegende Buch *Magnetisches Sonnensystem – Solare Eruptionen, Sonnenwinde und Weltraumwetter* eine faszinierende Einführung in die physikalischen Grundlagen der Plasmaphysik im Sonnensystem und der Heliosphäre. Es vermittelt in verständlicher Weise physikalische und historische Hintergründe und gibt Einblicke in neueste Forschungsergebnisse aktueller Missionen. Zusammen mit einer Vielzahl von Referenzen zu weiterführender Literatur, spektakulären Bildmaterialien und neuesten Forschungsvideos stellt es eine einzigartige Fundgrube für alle wissbegierigen Menschen dar. Ich bin sicher, dass dieses Buch so manchem Leser neue spannende Einblicke in die Physik der aktiven Sonne und des magnetischen Sonnensystems geben wird.

Göttingen  
im Frühjahr 2022

Volker Bothmer

# Danksagung

Mit den vielen bunten und informativen Abbildungen in unserem Buch haben wir versucht, auch komplexere wissenschaftliche Zusammenhänge anschaulich zu erläutern. Ganz herzlichen Dank deshalb an die Wissenschaftler der ESA, NASA, der Universitäten und anderer wissenschaftlicher Organisationen sowie auch an einige Amateurastronomen, die uns alle freundlicherweise die Rechte für die Wiederverwendung ihrer Abbildungen gegeben haben. Besonders möchten wir uns bei Miloslav Druckmüller von der Technischen Universität in Brünn (Tschechien) und seinen Mitarbeitern bedanken, die uns die so faszinierenden Aufnahmen von Sonnenfinsternissen, Kometen und einem Polarlicht zur Verfügung stellten und Videosequenzen solarer Aktivitäten, die mit den Kameras des Solar Dynamics Observatory der NASA aufgenommen wurden, so eindrucksvoll mithilfe ihres Bildbearbeitungsprogramms aufbereitet haben.

Carolus J. Schrijver und George L. Siscoe sind die Herausgeber einer Serie wissenschaftlicher Textbücher, die im Rahmen des „Living With a Star“-Programms der NASA im letzten Jahrzehnt veröffentlicht wurden und in denen die vielfältigen, häufig magnetisch dominierten Prozesse in der Heliosphäre unseres Sonnensystems, aber auch in den Astrosphären anderer Sterne vorgestellt werden. Diese Bücher haben uns wertvolle Anregungen für die Gestaltung unseres Buchs gegeben. Gleiches gilt auch für die interessanten Veröffentlichungen von Gregory H. Howes von der University of Iowa, der die große Bedeutung vor allem kleinskaliger kinetischer Prozesse in der Weltraumplasmaphysik sehr verständlich erklärt.

Ganz herzlichen Dank an Nour E. Raouafi, dem Projektwissenschaftler der Mission Parker Solar Probe (PSP), sowie Angelos Vourlidas, dem

Projektwissenschaftler des bildgebenden WISPR der PSP-Raumsonde und Leiter der Solarabteilung am Applied Physics Laboratory der Johns Hopkins University in Laurel (Maryland, USA), die uns vor Ort bzw. per E-Mail über den neuesten Erkenntnisstand dieser Raumsondenmission informiert und uns aktuelle Daten zugesandt haben. In der Reihe „Space Physics and Aeronomy“ haben beide übrigens gerade ein interessantes Buch mit dem Titel *Solar Physics and Solar Wind* veröffentlicht.

Auch Sami K. Solanki, der Direktor der Abteilung „Sonne und Heliosphäre“ am Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung (MPS) in Göttingen, hat sich freundlicherweise Zeit genommen, uns über Aktuelles aus der Sonnenforschung, speziell auch die Solar-Orbiter-Mission betreffend, zu informieren. Ein besonderer Dank geht an Ulrich Christensen, dem vor Kurzem emeritierten Direktor und Leiter der Abteilung für Planetenwissenschaften am MPS, der Kap. 8 unseres Buchs über planetare Magnetosphären und Polarlichter gründlich studiert, korrigiert und Ergänzungen darin angeregt hat. Eckart Marsch bedankt sich bei Prof. Robert Wimmer-Schweingruber, der ihm als Ruheständler einen Arbeitsplatz in seiner Abteilung „Extraterrestrische Physik“ am Institut für Experimentelle und Angewandte Physik (IEAP) der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel zur Verfügung gestellt hat.

Zusammen mit Ioannis A. Daglis hat Volker Bothmer, der Leiter des CGAUSS/WISPR-Projekts, der deutschen Beteiligung an der NASA Parker Solar Probe, an der Universität in Göttingen ist, gerade 2022 eine Neuauflage seines Buchs mit dem Titel *Space Weather – Physics and Effects* veröffentlicht. Wir sind sehr froh und dankbar, dass dieser sehr engagierte deutsche Fachmann für das Weltraumwetter sofort bereit war, das Vorwort für unser Buch zu schreiben.

Mehr als drei Jahre lang hat Margit Maly vom Springer Verlag in Heidelberg die Entwicklung dieses Buchprojekts mit großer Geduld und entsprechendem Engagement betreut. Herzlichen Dank dafür. Nach ihrem Abschied vom Springer Verlag im Frühjahr 2022 übernahmen Caroline Strunz vorübergehend und danach Christian Gass die verantwortliche Betreuung der endgültigen Gestaltung dieses Buchs. Auch ihnen, aber vor allem Stefanie Adam, die nach Stella Schmoll im Wesentlichen für alle technischen Aspekte der Buchgestaltung verantwortlich war und dabei immer wieder geduldig Zeit für uns hatte, sind wir sehr dankbar. Danke auch an Ramon Khanna vom Springer Verlag, der uns bei der nicht immer einfachen Einholung der Bildrechte unterstützt hat.

Ulrich von Kusserow möchte sich schließlich besonders herzlich bei seiner Ehefrau Angelika dafür bedanken, dass sie den häufigen Stress bei der Fertigstellung dieses Buchs über mehrere Jahre hinweg so relativ geduldig ertragen hat.

Mai 2022

Ulrich von Kusserow  
Eckart Marsch

## Persönliches von Ulrich von Kusserow zur Entwicklungsgeschichte dieses Buches

Noch heute erinnere ich mich sehr genau an zwei Themenbereiche, die mich als 13-jähriger Schüler besonders interessierten. Zum einen wollte ich unbedingt erfahren, warum sich das Erdmagnetfeld in der Vergangenheit so oft vollständig umgepolt hat und welche Auswirkungen das auf unser Leben gehabt haben könnte. Offensichtlich war ich damals schon besonders beeindruckt von der erstmals 1963 veröffentlichten wissenschaftlichen Erklärung für die sich nacheinander mit unterschiedlichen magnetischen Polaritäten ausbreitenden Meeresbodenschichten am Mittelatlantischen Rücken. Zum anderen war ich damals extrem unzufrieden damit, dass meine Mathematik- und Physiklehrer häufig vieles so kompliziert und für uns Schüler recht unverständlich erklärten. Ich wollte es als Lehrer später auf jeden Fall besser machen. Schon damals gab ich Schülern aus der Nachbarschaft gerne Nachhilfeunterricht in Mathematik, später auch in Physik. Ich wählte den Unterricht im mathematisch-naturwissenschaftlichen Zweig eines Lüneburger Gymnasiums und hatte zum Glück auch Erfolgsergebnisse mit guten Noten in Mathematik. Kurz vor dem Abitur waren meine Leistungen in Physik allerdings höchstens ausreichend. Der Physiklehrer erklärte den Elektromagnetismus, zumindest aus meiner Sicht, so schlecht, dass ich damals offensichtlich nicht einmal motiviert war, die mich doch so faszinierenden Umpolungen des Erdmagnetfelds mithilfe dieser Theorie erklären zu wollen. Ich entschied mich anfangs für ein Lehrerstudium der Mathematik und sogar auch der Physik, aber schon nach wenigen Wochen des Studiums plötzlich lieber doch für ein Diplomstudium der Mathematik oder sogar Physik!

Einen ersten indirekten Kontakt mit Hannes Alfvén (1908–1995), einem der wichtigen Protagonisten dieses Buchs, bekam ich Ende der 1960er-Jahre während des Studiums in Clausthal-Zellerfeld. Im Verlauf eines gemeinsamen Urlaubs in Schweden hatte mir ein befreundeter junger Wissenschaftler vom Max-Planck-Institut für Aeronomie in Katlenburg-Lindau den Besuch des Königlichen Instituts für Technologie in Stockholm ermöglicht, wo der berühmte Mitbegründer der Magnetohydrodynamik und Plasmaphysik viele Jahre als Professor gewirkt hatte. Ich durfte die dort liegen gebliebenen Kopien einer Vielzahl seiner Artikel über die große Bedeutung kosmischer Magnetfelder, unter anderem auch über die Entstehung des Sonnensystems, studieren und eine größere Anzahl davon sogar mit nach Hause nehmen. Die so große Bedeutung dieses Wissenschaftlers, der im Jahr darauf, 1970, den Physik-Nobelpreis erhielt, war mir damals allerdings noch nicht wirklich bewusst gewesen.

Natürlich war ich nach dem Vordiplom 1971 überglücklich, als mir Willi Deinzer, ein mich sehr beeindruckender, „richtig bärtiger“ Professor der Astronomie in der Universitätssternwarte in Göttingen anbot, eine wissenschaftliche Arbeit über die Hintergründe der mich so faszinierenden Umpolung des Erdmagnetfelds zu schreiben. Zusammen mit Michael Stix, dem Autor des in Fachkreisen sehr anerkannten, mehr als 15 Jahre später erschienenen Buchs mit dem Titel *The Sun – An Introduction*, unterstützte er mich sehr engagiert bei meiner Diplomarbeit über „Stationäre sphärische  $\alpha$ - $\omega$ -Dynamos und das Erdmagnetfeld“. Zur Erarbeitung der Grundlagen der Dynamotheorie las ich damals mit großem Interesse Arbeiten von Hannes Alfvén zur Magnetohydrodynamik, von Eugene N. Parker (1927–2022) vor allem über dessen frühes Dynamomodell mit der bedeutsamen Einführung des magnetischen  $\alpha$ -Induktionseffekts zur Regenerierung kosmischer Magnetfelder. Für meine Diplomarbeit waren insbesondere auch die unter dem Titel „The Turbulent Dynamo“ von Paul H. Roberts und Michael Stix veröffentlichten Übersetzungen berühmter Arbeiten zur kosmischen Elektrodynamik von großer Bedeutung, die in den 1960er-Jahren von Fritz Krause, Karl-Heinz Rädler (1935–2020) und Max Steenbeck in der ehemaligen DDR verfasst worden waren. Besonders motivierten mich damals die didaktisch sehr gut aufbereiteten und sehr verständlichen Einführungsvorlesungen zur Astronomie von Willi Deinzer und die sehr spannenden und anschaulich bebilderten Vorlesungen von Rudolf Kippenhahn (1926–2020) zu den Themen „Plasmaphysik“ und „Sternentwicklung“.

Nach dem Physikediplom und einer kurzen Anstellung an der Universitätssternwarte entschied ich mich dann doch für den Beruf eines

Gymnasiallehrers in den Fächern Mathematik und Physik. Als Quereinsteiger ohne amtliche pädagogische Ausbildung arbeitete ich zunächst als Lehrer am Neuen Göttinger Gymnasium und studierte nebenbei Pädagogik, bevor ich die Lehrerausbildung in einem Studienseminar begann. In dieser schweren Zeit lernte ich sehr viel Grundsätzliches über die große Bedeutung der gründlichen didaktischen Aufbereitung eines jeden Lerninhalts sowie über die geeigneten Formen der methodischen Realisierung erfolgreicher Unterrichtseinheiten, beispielsweise, wie wichtig es ist, die komplexe Struktur des Unterrichtsgegenstands vorweg eingehend zu analysieren, die Auswahl der Themen adressatengerecht bezogen auf den Lernenden zu wählen, die Behandlung der Themen jeweils motivierend einzuleiten und die wesentlichen Lerninhalte exemplarisch unter Ausrichtung auf die mögliche Zukunftsbedeutung zu behandeln. Auch die Berücksichtigung historischer Hintergründe einer jeweils angestrebten Erkenntnisgewinnung kann dabei eine wichtige Rolle spielen. Die konkrete Umsetzung eines Unterrichtskonzepts in einer Unterrichtssituation erfordert darüber hinaus natürlich auch gründliche methodische Überlegungen. Geeignet eingesetzte Medien, faszinierende Abbildungen, erklärende Grafiken und Videosequenzen können entscheidend dazu beitragen, selbst kompliziertere Sachverhalte zu veranschaulichen und dadurch relativ einfach zu erklären.

Nachdem mein Interesse an der Astronomie ein Jahrzehnt lang als begeisterter Lehrer leider stark in den Hintergrund getreten war, weckte das populärwissenschaftliche Buch meines verehrten Professors Rudolf Kippenhahn mit dem Titel *Der Stern von dem wir leben – Den Geheimnissen der Sonne auf der Spur* erneut mein großes Interesse an der Plasma- und Sonnenphysik sowie an allen möglichen anderen Prozessen in kosmischen Magnetfeldern. Angeregt durch die frühen Arbeiten von Eugen Parker zur magnetischen Rekonnexion hatte ich in diesem Zusammenhang häufigere Kontakte vor allem auch mit Karl Schindler von der Ruhr-Universität Bochum, Eric Priest von der St. Andrews University in Schottland sowie Gunnar Hornig, heute an der University of Dundee, ebenfalls in Schottland. Auf MHD-Tagungen und Institutsbesuchen entstanden unter anderem „dynamogenerierte“ Freundschaften mit Karl-Heinz Rädler vom Astrophysikalischen Institut in Potsdam, Dieter Schmitt vom Max-Planck-Institut in Katlenburg-Lindau, später dann auch am Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Göttingen, sowie Frank Stefanie vom Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf. Aktuell engagiert sich Frank Stefanie schwerpunktmäßig insbesondere mit der Fertigstellung des Großforschungsexperiments DRES-DYN (DRESDEN Sodium facility for DYNAMO and thermohydraulic studies), in dessen Rahmen vor allem auch die Entstehung

des Erdmagnetfelds in naher Zukunft erforscht werden soll. Auf dem 2011 von Axel Brandenburg vom Institute for Theoretical Physics in Stockholm organisierten Workshop „Rädler Fest: Alpha Effect and Beyond“ zum 75. Geburtstag von Karl-Heinz Rädler hielt ich einen Vortrag mit dem Titel „K.-H. Rädler for Popular Sciences“. Dort genoss ich die Vorträge und Diskussionen insbesondere auch von und mit Eugene Parker sowie ein sehr persönliches Gespräch mit ihm. Leider ist Eugene Parker kurz vor der Fertigstellung dieses Buchs am 15. März 2022 verstorben. Der ihm 2020 verliehene Crafoord Prize for Astronomy hätte ihm aufgrund der Corona-Maßnahmen erst zwei Jahre später in Lund (Schweden) persönlich übergeben werden sollen.

Als langjähriger Vorsitzender der Olbers-Gesellschaft e. V. Bremen habe ich früher mehrfach im Jahr besonders gerne vor allem auch Wissenschaftler zu Themen eingeladen, bei denen kosmische Magnetfelder eine wichtige Rolle spielen. Ich habe astrophysikalische Arbeitsgruppen zum Thema „Sonne“ bzw. „Sternentstehung“, amateurastronomische und wissenschaftliche Tagungen geleitet und mitorganisiert, bei denen meist auch die Sonne im Mittelpunkt stand. Viele Jahre lang habe ich für Studenten der Bremer Universität den Praktikumsversuch zur „Beobachtung der magnetischen Sonne“ durchgeführt. Ich habe viele Institute und Sonnenobservatorien besucht, Vorträge gehalten und Artikel über diverse magnetische Prozesse im Kosmos verfasst, dabei speziell auch über den Einfluss der Sonne auf das Weltraumwetter und das Erdklima geschrieben. Auf Anregung von Karl-Heinz Rädler arbeitete ich drei Jahre am Institut für Didaktik der Physik in Potsdam an einer letztlich unvollendet gebliebenen Dissertation, in deren Rahmen ich an zwei Gymnasien in der Umgebung von Berlin Unterrichtseinheiten zum Thema „Lernen über kosmische Magnetfelder“ auch zur Freude der Schüler erprobt habe. Die dafür erstellten Materialien und didaktischen Erkenntnisse aus diesen Unterrichtsversuchen konnte ich schließlich in einem Buch mit dem Titel *Magnetischer Kosmos – To B or not to B* verwenden, in dem die so weitreichende Bedeutung der magnetischen Flussdichte  $B$  aufgezeigt wird.

Nach seinem Vortragsbesuch bei der Bremer Olbers-Gesellschaft schenkte mir der Heliophysiker Rainer Schwenn zwei wissenschaftliche Fachbücher zum Thema „Physics of the Inner Heliosphere“, die er 1990 bzw. 1991 zusammen mit seinem Kollegen Eckart Marsch herausgegeben hatte. In diesen für mich damals besonders anspruchsvoll erscheinenden Büchern ging es zum einen um großskalige heliosphärische Phänomene, zum anderen um die dafür relevante Physik der Teilchen und Wellen sowie um die



besondere Bedeutung turbulenter Prozesse. Etwa 20 Jahre danach traf ich Eckart Marsch das erste Mal persönlich im Max-Planck-Institut für Aeronomie zu einem vorbereitenden Gespräch für seinen geplanten Vortrag bei der Olbers-Gesellschaft zum Thema „Sonnenwind und Weltraumwetter“. Fasziniert lauschte ich damals seinen Ausführungen über die große Vielfalt der sehr komplexen Wechselwirkungsprozesse, die für die Aufheizung der Sonnenkorona und die Beschleunigung des von ihr ausströmenden Sonnenwinds entscheidend verantwortlich sind. Im März 2013 erklärte er den beeindruckten Besuchern seines Vortrags in Bremen, welche optischen Beobachtungen der Sonne vom Weltraum und welche In-situ-Messungen von Raumsonden aus für die Gewinnung gesicherter Erkenntnisse über die Vorgänge in der Heliosphäre sorgen können und wie die Aktivität der magnetischen Sonne, die solaren Eruptionen und der sehr dünne Sonnenwind das Weltraumwetter insbesondere auch in der Erdumgebung bestimmen.

Vor seiner Emeritierung im Jahr 2012 hatte Eckart Marsch als leitender Wissenschaftler seines Instituts unter anderem die Entwicklung der Sonnensonde Solar Orbiter mit einem Proposal an die ESA angeregt und in den entscheidenden Anfangsphasen dieser Mission die Aktivitäten der Community geleitet und koordiniert. Aus gutem Grund wurde er natürlich auch zum Start dieser ESA-Mission im Februar 2020 nach Cape Canaveral eingeladen. Aufgrund seiner vielfältigen Verdienste um ein tieferes Verständnis heliosphärischer Prozesse wurde ihm bei der Jahrestagung der European Geosciences Union (EGU) 2018 die Hannes-Alfvén-Medaille verliehen. Bei dieser Veranstaltung hielt er einen Vortrag mit dem Titel „Solar Wind and Kinetic Heliophysics“, in dem er, im Gegensatz zur üblichen großskaligen Betrachtung heliosphärischer magnetischer Fluide im Rahmen der Magneto-hydrodynamik, vor allem die entscheidende Bedeutung kleinskaliger kinetischer Prozesse für ein tiefes Verständnis der im weitgehend kollisionsfreien Plasma des Sonnenwinds ablaufenden Prozesse herausstellte. Wie froh war ich, dass ich 2015 zusammen mit Eckart einen internationalen Workshop zum Thema „Solar System Plasma Turbulence, Intermittency and Multifractals (STORM 2015)“ in Rumänien besuchen durfte, auf der Fachwissenschaftler die neuesten Erkenntnisse über die Vielfalt kinetischer Prozesse im Detail diskutierten.

Seit etwa zehn Jahren sind Eckart und ich miteinander enger befreundet, besuchen uns regelmäßig wechselseitig und diskutieren engagiert die unterschiedlichsten, nicht nur physikalischen Themen. Schwerpunktmäßig geht es dabei natürlich auch immer wieder über viel Spannendes und Aktuelles, die Vorgänge auf der Sonne und ihrer Heliosphäre betreffend.

Mit seinen tiefgehenden Fachkenntnissen hat mich Eckart dabei auch sehr bei der Gestaltung meines 2018 erschienenen Buchs zum Thema „Chaos, Turbulenzen und kosmische Selbstorganisationsprozesse“ unterstützt. Ich fand es danach eigentlich sehr schade, dass Eckart persönlich noch kein verständliches, auch für engagierte Laien und junge Studenten anschaulich gestaltetes Buch geschrieben hatte, in dem seine von vielen Kollegen sehr anerkannten tiefen wissenschaftlichen Erkenntnisse über die Heizung und Beschleunigung des magnetischen Sonnenwinds einmal zusammenfassend vorgestellt werden. Deshalb schlug ich ihm 2018 vor, doch gemeinsam ein Buch zum Thema „Magnetisches Sonnensystem – Solare Eruptionen, Sonnenwinde und Weltraumwetter“ zu schreiben. Ich war sehr froh, dass Eckart recht schnell zustimmte.

In endlosen Sitzungen, in langen Telefongesprächen, in umfangreichen Zoom-Sitzungen und durch das Hin- und Herschicken von Text- und Abbildungsvorschlägen zwischen Kiel und Bremen ist es uns Anfang 2022 endlich gelungen, einen gemeinsamen Entwurf zusammenzustellen, der uns beiden, im Zusammenspiel von wissenschaftlicher Erkenntnis und didaktischer Aufbereitung, heute gefällt. Unser Ziel war es, die uns persönlich so faszinierenden Phänomene und physikalischen Prozesse in der magnetisch aktiven Sonne, in ihrer Atmosphäre, in dem abströmenden Sonnenwind sowie in den Magnetosphären und Ionosphären der Planeten und kleinerer Himmelsobjekte unseres Sonnensystems einem größeren Personenkreis ausführlicher vorzustellen und möglichst anschaulich, aber auch wissenschaftliche korrekt zu erklären. Von der großen Bedeutung des Weltraumwetters für unsere technisch sich so rasant entwickelnde Gesellschaft haben in diesem Zusammenhang wahrscheinlich nicht nur die von der Astronomie Begeisterten, Studenten und Wissenschaftler gehört. Wir waren uns recht sicher, dass wir viele andere Menschen relativ einfach motivieren könnten, sich etwas tiefer mit der Erklärung der physikalischen Prozesse auseinanderzusetzen, die für die Entstehung der so spektakulären Sonneneruptionen, Kometenschweife und Polarlichter entscheidend verantwortlich sind. Insbesondere im Zusammenhang mit den Entstehungs- und Entwicklungsprozessen solarer und planetarer Magnetfelder sowie mit den kleinskaligen Heizungs- und Beschleunigungsprozessen in der Korona und dem sehr dünnen Sonnenwind haben wir uns häufiger die Frage gestellt, ob unsere Zielsetzungen nicht zu anspruchsvoll seien und ob wir nicht lieber auf allzu tiefe physikalische Erklärungen verzichten sollten.

Wir haben uns aber doch immer wieder dafür entschieden, die uns aus wissenschaftlicher Sicht sehr wichtig erscheinenden, manchmal auch recht komplizierten Sachverhalte möglichst ohne größeren Einsatz

mathematischer Herleitungen und Formeln, aber didaktisch aufbereitet, in diesem Buch dennoch einigermaßen verständlich zu erklären. Unterstützt durch die Verwendung einer Vielzahl farbiger Abbildungen, erklärender Grafiken und mithilfe des von Raumsonden gewonnenen Datenmaterials wollten wir dem Leser einen großen Überblick und tiefen Einblick über und in die Vielzahl interessanter Phänomene und Prozesse in der Heliosphäre unseres Sonnensystems geben, bei denen elektromagnetische Prozesse in elektrisch leitfähigen Plasmen und metallischen Fluiden nahezu überall eine dominierende Rolle spielen. Häufig angehängt an die Erklärungstexte unter den Abbildungen, sollen die als ShortURLs bezeichneten Links in der Form „sn.pub/...“ dem interessierten Leser einen direkten Zugang zu interessanten Videofilmen und ergänzendem Datenmaterial im Internet ermöglichen. Bewegte Bilder, Realfilmsequenzen, Animationen sowie einfache anschauliche Erklärungen erleichtern sicherlich tiefere Einblicke in die spannenden Prozesse in der Heliosphäre unseres Sonnensystems. Auf der Internetseite [sn.pub/hebmF6](https://sn.pub/hebmF6) können interessierte Leser ergänzendes Datenmaterial zu diesem Buch finden. Wer sich für die in den vergangenen Jahren als zunehmend bedeutsamer erkannte Rolle magnetischer Prozesse auch im Zusammenhang mit der Entstehung des Sonnensystems interessiert, findet hier auch ein dieses Buch ergänzendes ein Kapitel.

Juni 2022

Ulrich von Kusserow

# Prolog

„Weltraumwetter ist der Begriff, mit dem Wissenschaftler die sich ständig ändernden Bedingungen im Weltraum beschreiben. Explosionen auf der Sonne erzeugen Strahlungstürme, schwankende Magnetfelder und Schwärme von energetischen Partikeln. Diese Phänomene wandern mit dem Sonnenwind durch das Sonnensystem nach außen. Bei ihrer Ankunft auf der Erde interagieren sie auf komplexe Weise mit dem Erdmagnetfeld und erzeugen die Strahlungsgürtel der Erde und die Aurora. Einige Weltraumwetterstürme können Satelliten beschädigen, Stromnetze ausschalten und die Kommunikationssysteme von Mobiltelefonen stören.“ (Roberta Johnson, *Windows to the Universe*)

Unglaublich fasziniert und gebannt verfolgten mehr als 500 Mio. Menschen vor mehr als 50 Jahren die erste Mondlandung der NASA-Apollo-Mission in einer ausgedehnten Liveübertragung am Fernsehbildschirm. Am 21. Juli 1969 um 02:56:20 Uhr koordinierter UTC-Weltzeit betrat der amerikanische Astronaut Neil Armstrong als erster Mensch die Mondoberfläche und sprach die so berühmt gewordenen Worte: „Das ist ein kleiner Schritt für einen Menschen, aber ein großer Sprung für die Menschheit!“ Was wollte er mit diesem kurzen, möglicherweise gar nicht von ihm allein ersonnenen Satz wohl ausdrücken?

Sicherlich war es nicht seine persönliche Freude darüber, dass die Amerikaner in Zeiten des Kalten Kriegs in diesem Moment den Wettlauf zum Mond gegenüber den Russen gewonnen hatten. Vielmehr sollte sein Ausspruch wohl eher würdigen, dass es trotz gewaltiger technischer Schwierigkeiten und unter großer Lebensgefahr für die Astronauten der

Apollo-11-Mission einem Menschen erstmals gelungen war, einen Himmelskörper entfernt von der Erde zu betreten. Vielleicht wollte Armstrong damit auch ausdrücken, dass dieser kleine Schritt bereits ein entscheidender Schritt im Zusammenhang mit der Realisierung des Projekts einer zukünftigen Besiedlung des Weltalls gewesen sein könnte. „Der Mars und Terraforming dieses Planeten sind das Ziel“ war auch die Idee des deutsch-amerikanischen Raumfahrtgenieurs Jesco von Puttkamer (1933–2012), der seit 1963 im Team von Wernher von Braun (1912–1977) am Apollo-Programm arbeitete und seit 1974 eine Arbeitsgruppe zur strategischen Planung der permanenten Erschließung des Alls leitete. „Wir entwickeln ja die Raumfahrt und ihre Technik, um der Erde zu helfen [...] das machen wir deswegen, um dann, wenn wir der Erde zu viel werden und die Erde schützen müssen, hinaus können in die Freiheit und wachsen können [...]“ war ja noch vor einem Jahrzehnt seine Aussage.

Nach Apollo 11 gab es im Rahmen der Apollo Missionen noch insgesamt fünf weitere Mondlandungen, bei denen sich jeweils zwei Astronauten maximal bis zu etwas mehr als drei Tagen auf unserem Erdtrabanten aufhielten. Sie erprobten unter nicht einfachen Umständen die möglichen Lebensbedingungen auf dem Mond und führten geologische Untersuchungen durch. Sie stellten zu Vermessungszwecken Reflektoren auf und sammelten mithilfe des Solar-Wind-Composition-Experiments der Universität Bern wissenschaftliche Daten über den direkt auf die Oberfläche des Monds einströmenden Sonnenwind. Ursprünglich waren nach Apollo 17 noch drei weitere Apollo-Missionen zum Mond geplant. Die noch vorhandenen Apollo-Raumschiffe und Saturnraketen wurden jedoch lieber für das nachfolgende Skylab-Projekt verwendet. Jeweils drei Astronauten führten 1973/1974 auf der ersten und bisher einzigen rein US-amerikanischen Weltraumstation bei insgesamt drei Missionen Experimente im Rahmen der Werkstoffforschung und Biomedizin durch. Sie beobachteten die Erde im Infrarotbereich, vermaßen mit Radargeräten geologische Prozesse und studierten mit Sonnenteleskopen erstmals ungestört von der Erdatmosphäre das Verhalten der Chromosphäre und heißen Korona unseres Heimatsterns, der Sonne.

Vielleicht haben Sie sich auch schon gefragt, warum seit mehr als 50 Jahren kein Astronaut mehr den Mond betreten hat, warum unser Erdtrabant gerade jetzt wieder in den Fokus einiger Raumfahrtationen und privater Raumfahrtagenturen gerückt ist und warum im nächsten Jahrzehnt ein „Massenansturm auf den Mond“ zu erwarten ist. Sicherlich war damals das Öffentlichkeitsinteresse nach mehreren Apollo-Missionen ohne wirklich spektakuläre weitere Ereignisse etwas erlahmt. Trotzdem weiterzumachen,

dafür war das Apollo-Programm, das zeitweise von 400 000 Menschen und 20 000 Privatfirmen realisiert worden war, mit Kosten von, aus heutiger Sicht, vermutlich mehr als 150 Mrd. US-\$ viel zu teuer. Außerdem wussten die NASA-Mitarbeiter sehr wohl, und nicht erst nach der Explosion eines Tanks mit Flüssigsauerstoff im Servicemodul des Apollo-13-Raumschiffs und der aufsehenerregenden Rettungsaktion der Astronauten, wie lebensgefährlich jede dieser Missionen für die Raumschiffbesatzung werden könnte. Noch waren die Technik, Elektronik und Computerisierung nicht genügend ausgereift, hatten die Raumfahrtfachleute auch keine ausreichenden Erfahrungen, um größere Risiken vermeiden zu können. Offensichtlich haben sich die Bedingungen für bemannte Flüge zum Mond und bald sogar zum Mars nach 50 Jahren erfolgreicher moderner Weltraumforschung wesentlich verbessert.

Sehr wahrscheinlich gab es aber einen weiteren, triftigen Grund, warum die NASA das Apollo-Programm damals vorzeitig gestoppt haben könnte. Zwischen den beiden Mondmissionen Apollo 16 im April 1972 (Abb. P.1a) und Apollo 17 (Abb. P.1c) im Dezember 1972 hatte am 7. August 1972 eine gewaltige Sonneneruption stattgefunden, deren Entwicklung mit einem hochauflösenden Sonnenteleskop vom Big Bear Solar Observatory (BBSO) im amerikanischen Bundesstaat Kalifornien gefilmt werden konnte (Abb. P.1b). Bei einem nach seinem Aussehen als Seepferdchen bezeichneten blitzartig aufleuchtenden Flare wurden in einer Region mit dunklen Flecken auf der Sonne über viele Minuten hinweg große Mengen an gespeicherter magnetischer Energie freigesetzt. In der Folge wurden harte elektromagnetische Strahlung im UV-, Röntgen- und Gammastrahlenbereich, viele stark beschleunigte, geladene Teilchen sowie riesige Materiewolken teilweise auch in Richtung zum Mond ausgesandt.

Die Astronauten der beiden letzten Apollo-Missionen wären bei ihrem Aufenthalt auf dem Mond, der sich gerade nicht in dem abschirmenden Schweif der Erdmagnetosphäre aufhielt, deshalb etwa zweieinhalb bis drei Tage lang, ohne eine sie schützende lunare Atmosphäre, dem unheilsamen Bombardement von hochenergetischen Teilchen und hochenergetischer Strahlung von der Sonne ausgesetzt gewesen. Die NASA-Wissenschaftler haben vermutlich wohl erst nachträglich erkannt, dass die Astronauten die Auswirkungen derartig heftiger, sich im Zeitraum vom 2. bis 11. August 1972 und darüber hinaus immer wiederholender Strahlungsausbrüche damals wahrscheinlich nicht überlebt hätten. Von daher ist es verständlich, dass sich die NASA in den vergangenen Jahrzehnten gründliche Gedanken darüber machte und auch heute noch intensiv erforscht, wie man den



**Abb. P.1** Mögliche Lebensgefahr für Astronauten durch die Auswirkungen von Sonneneruptionen. **a** Der Astronaut John Young der Apollo 16 Mission salutiert am 21. April 1972 vor der Flagge der Vereinigten Staaten auf dem Mond. Im Hintergrund sieht man das Apollo Lunar Module Orion und das Lunar Roving Vehicle. **b** Gewaltiger Sonnensturm in Form eines Flares am 7. August 1972. **c** Der Astronaut Eugene A. Cernan der Apollo 17 Mission unternimmt am 11. Dezember 1972 eine erste Probefahrt mit dem Lunar Roving Vehicle  
 Apollo 16 NASA Documentary – Nothing So Hidden – 1972 – 5th Moon Landing: [sn.pub/1VAVNI](https://www.nasa.gov/sn.pub/1VAVNI)  
 Great Solar Flare (August 7, 1972): [sn.pub/elkDO6](https://www.nasa.gov/sn.pub/elkDO6)  
 Apollo 17 Lunar Rover: [sn.pub/fLd8fV](https://www.nasa.gov/sn.pub/fLd8fV)  
 © a C. Duke/NASA, b Big Bear Solar Observatory, c Harrison H. Schmitt/NASA

Gefahren für die Astronauten durch die bedrohlichen Auswirkungen des Weltraumwetters am besten begegnen kann.

Die Weltraumagenturen planen gegenwärtig wesentlich längere bemannte Raumflüge und Aufenthalte von Astronauten auf dem Mond und sogar auf dem Mars. Manche Fantasten träumen darüber hinaus von einer technisch machbaren Umwandlung anderer Planeten in bewohnbare erdähnliche Himmelskörper, sogar der Besiedelung „naher“ extrasolarer Sternsysteme wie z. B. Proxima Centauri oder Trappist-1 (Abb. E.1 im Epilog). Abgesehen

davon, dass die Reisen dorthin viele Zehntausend Jahre dauern würden und schon von daher als unrealistisch angesehen werden müssen, sollte man sich auch die ungeheuren Gefahren für die Astronauten bei solchen Reisen wegen des auch dort sicherlich herrschenden, wahrscheinlich sogar noch wesentlich extremeren „Weltraumwetters“ bewusst machen. Die im Umfeld dieser Sterne anzutreffenden kosmischen Entwicklungen könnten noch viel intensiver sein.

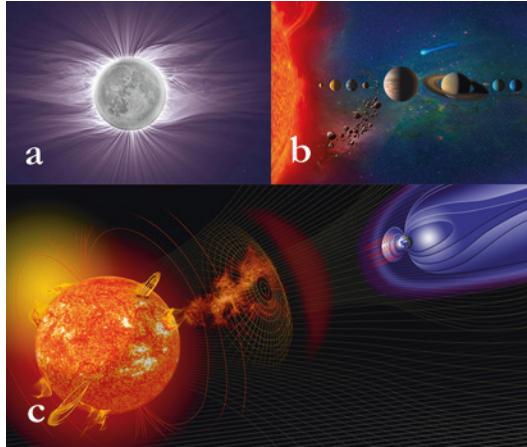
Die Sonne als Zentralkörper unseres Sonnensystems stellt eine im Vergleich zur Erde riesige, weitgehend aus ionisiertem Wasserstoff bestehende Plasmakugel dar. Ihr Durchmesser ist etwa 109-mal so groß wie der unseres Heimatplaneten. Unser Stern besitzt eine Masse, die die Gesamtmasse aller acht Planeten, die sie umkreisen, um mehr als das 700-Fache übertrifft. Es ist die Vielzahl der in dem Inneren und den unterschiedlichen Atmosphärenschichten der Sonne auf ganz verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen ablaufenden dynamischen Prozesse, die auch die Entwicklung der die Sonne umgebenden Heliosphäre entscheidend bestimmt. Im äußeren Drittel des Sonneninneren, der Konvektionszone, werden durch großräumige sowie turbulente elektrische Ströme die solaren Magnetfelder in Dynamoprozessen immer wieder neu erzeugt. Diese im Vergleich zum Erdmagnetfeld relativ starken Felder schwanken hinsichtlich ihrer Stärke und räumlichen Anordnung auffallend im Rhythmus des etwa elfjährigen periodischen Zyklus der Sonnenfleckenaktivität bzw. 22-jährigen Zyklus des sich zeitlich weitgehend periodisch stark ändernden globalen Magnetfelds der Sonne.

Die Sonnenmagnetfelder steuern die Strukturbildung und Entwicklungen einer Vielzahl solarer Phänomene, die auf der Sonnenscheibe, in höheren Atmosphärenschichten sowie in dem aus der heißen Sonnenkorona stetig in den interplanetaren Raum abströmenden turbulenten und magnetisierten Sonnenwind zu beobachten sind. So treten beispielsweise die auffallend dunklen Sonnenfleckengruppen sowie die manchmal riesigen, auch als Protuberanzen bezeichneten solaren Plasmawolken im Verlauf des elfjährigen Zyklus systematisch bei verschiedenen heliografischen Breiten mit ganz unterschiedlichen Abmessungen auf. Die Entstehung besonders großer Sonnenflecken näher zum Sonnenäquator, weit über den Sonnenrand aufragende riesige Gaswolken sowie die solaren Flares und Eruptionen mit gewaltigen Materieauswürfen finden dabei bevorzugt in Zeiten des Maximums der Sonnenaktivität statt. Magnetisch vermittelte Prozesse heizen die Sonnenkorona bis zu mehr als 1 Mio. Grad auf. Sie lösen heftige Explosionen in der Sonnenatmosphäre aus und beschleunigen die geladenen Elektronen, Protonen sowie Ionen größerer Masse im Sonnenwind.



Als Heliosphäre wird das sehr weiträumige Gebiet des Weltraums bezeichnet, welches die Sonne blasenförmig umgibt und in dem der Sonnenwind mit seinem Magnetfeld dynamisch wirksam wird. Bis zu der als Heliopause bezeichneten Außengrenze dieses Raums verdrängt dieser von der Sonne ausgehende Teilchenstrom weitgehend den Zustrom von Materie aus dem umgebenden interstellaren Medium. Das Weltraumwetter in der Heliosphäre (Abb. P.2) beschreibt die zeitlich variierenden Zustände der Teilchen und elektromagnetischen Felder im Sonnensystem. Es wird dabei ganz wesentlich durch den Sonnenwind und die Sonnenstürme, aber auch durch die von außen in das Sonnensystem einströmenden hoch-energetischen Partikel der galaktischen kosmischen Strahlung bestimmt. Unterschiedliche Sonnenwindströme wechselwirken im interplanetaren Raum dynamisch miteinander, und sie treffen auf die Magnetosphären und Ionosphären der Planeten sowie auf kleinere Himmelskörper. Die in unregelmäßigen Abständen verstärkt einsetzenden Teilchen- und Strahlungsströme bei solaren Flares sowie die kosmische Teilchenstrahlung können Vorgänge selbst noch in den tieferen Schichten der Planetenatmosphären beeinflussen. Entscheidend für uns Menschen ist natürlich der Einfluss des Weltraumwetters in der Umgebung unserer Erde, denn in einer zunehmend höhertechnisierten Welt können intensive Teilchenströme von der Sonne und durch sie induzierte erdmagnetische Stürme unter Umständen sehr negative Folgen haben.

Etwa 99 % des Universums bestehen vermutlich aus Plasmamaterie, in der magnetische Felder wie in der Heliosphäre der Sonne eine zentrale Rolle spielen. Insbesondere die Vor-Ort-Erforschung durch Satelliten, die Gewinnung umfangreichen, räumlich und zeitlich hochaufgelösten Datenmaterials für eine Vielfalt von sich relativ rasch entwickelnden und gut beobachtbaren Phänomenen im uns nahen Sonnensystem ermöglichen die genaue Erforschung von und Gewinnung grundlegender Erkenntnisse über physikalische Prozesse in den verschiedensten magnetisierten Plasmen. Mit den hier gewonnenen Einsichten lassen sich auch die grundlegenden Prozesse der Heizung und Beschleunigung elektrisch geladener Teilchen in stellaren Koronen und Astrosphären weit entfernter Sterne viel besser verstehen. Wie wichtig erweist es sich doch für ein tieferes Verständnis der komplexen Vorgänge in unserem Universum, neben den physikalischen Prozessen, die unter dem dominierenden Einfluss der Gravitation erfolgen, gerade auch die vielfältigen elektromagnetischen Prozesse adäquat zu berücksichtigen.



**Abb. P.2** Durch den Sonnenwind in der Heliosphäre getriebenes Weltraumwetter. **a** Blick in die Sonnenkorona und Innere Heliosphäre während einer totalen Sonnenfinsternis, bei der der Mond die Sonnenscheibe verdeckt. **b** Künstlerische Darstellung bekannter Himmelsobjekte in der Heliosphäre unseres Sonnensystems. **c** Magnetische Feldstrukturen, die das Weltraumwetter im Sonne-Erde System prägen  
 Miloslav Druckmüller, Stále záhadná sluneční koróna: [sn.pub/YnCoya](http://sn.pub/YnCoya)  
 Das Sonnensystem: Unser Zuhause im Weltall: [sn.pub/AErisu](http://sn.pub/AErisu)  
 1859 Carrington-Class Solar Storm Pummeled Earth's Magnetic Field: [sn.pub/tY05ni](http://sn.pub/tY05ni)  
 CME Leaving the Sun, Slamming into our Magnetosphere: [sn.pub/mhyqZj](http://sn.pub/mhyqZj)  
 © a M. Druckmüller, b NASA, c NASA

Nicht nur für Wissenschaftler gibt es offensichtlich viele triftige Gründe dafür, in der Heliosphäre, in der Sonnenatmosphäre, im Sonnenwind und im Umfeld planetarer Magnetosphären das Weltraumwetter mit all seinen komplexen physikalischen Prozessen gründlich und im Detail zu erforschen und tiefer zu verstehen. Die Sonne ist nun einmal der Stern, der unser aller Leben bestimmt, und deshalb sind wir neugierigen Menschen sehr daran interessiert, auch mehr über die Vorgänge im Umfeld unseres Heimatsterns und seines Planeten Erde zu erfahren. Besonders fasziniert bestaunen wir bei einer totalen Sonnenfinsternis die filigranen, durch Magnetfelder geformten Strukturen der Sonnenkorona und bewundern die Entwicklungen der Polarlichterscheinungen und die Schönheit der Kometenschweife.

In einer zunehmend technisierten Welt werden wir Menschen in Zukunft außerdem stärker darauf angewiesen sein, die möglichen negativen Auswirkungen des Weltraumwetters einschätzen zu können. Wissenschaftler und Raumfahrtagenturen benötigen dessen verlässliche Vorhersage, damit sie die Sicherheit der oft sehr teuren Satellitenprojekte oder gefährlicher bemannter Raumfahrtmissionen durch rechtzeitige Risikominimierung

gewährleisten können. Gespannt verfolgen viele Menschen in diesem Zusammenhang die aktuellen Vorbereitungen der für die nächsten Jahrzehnte geplanten Raumflüge von Astronauten zum Mond und sogar zum Mars. Die Plasma- und Heliophysiker, Sonnenwind- und Magnetosphärenforscher sind darüber hinaus natürlich aber auch sehr an der Grundlagenforschung selbst interessiert.

Dieses Buch ist für interessierte Laien, Studenten und Amateurastronomen geschrieben, die sich für die Vielfalt der faszinierenden Phänomene auf der Sonne und in der Heliosphäre unseres Sonnensystems (Kap. 1, 2 und 3) interessieren. Beeindruckendes Bild- und Videomaterial<sup>1</sup> sowie anschauliche, tiefergehende Erklärungen sollen die Leser ohne Zuhilfenahme größerer mathematischer Herleitungen über die besondere Bedeutung und den Einfluss der Plasmen und Magnetfelder in dem uns direkt umgebenden Teil des Universums gründlich informieren. Es wird erklärt, wie die magnetischen Felder in der Sonne und in den sie umkreisenden Planeten mit ihren Monden durch Dynamoprozesse entstehen können (Kap. 3 und 8). Es werden die komplexen Prozesse ausführlicher beschrieben und erklärt, welche die Aufheizung der Sonnenatmosphäre, die Auslösung solarer Eruptionen sowie die Beschleunigung der Teilchen im magnetisierten Sonnenwind bewirken (Kap. 3, 4 und 5). Es wird weiterhin dessen langer Weg durch die gesamte Heliosphäre bis zum Kontakt mit dem das Sonnensystem umgebenden lokalen interstellaren Medium verfolgt.

Insbesondere werden auch die physikalischen Wechselwirkungsprozesse des Sonnenwinds beim Auftreffen auf Hindernisse wie Kometenkerne, Magnetosphären oder Ionosphären der Planeten beschrieben und eingehender erläutert (Kap. 7 und 8). Es sollen sowohl die historischen (Kap. 1 und Anhang) als auch die jeweils neuesten wissenschaftlichen Aktivitäten und Erkenntnisse zur Erforschung des Weltraumwetters (Kap. 5 und 9) vorgestellt und dessen vielfältige Einflüsse auf das Leben auf unserem Planeten, speziell aber auf das Klima im Erdsystem, ausführlich beschrieben

---

<sup>1</sup> An den erklärenden Text zu den Abbildungen sind häufiger zu angesprochenen Themen eine Vielzahl sogenannter Kurz-URLs angefügt, über die der Leser leichteren Zugang zu ergänzendem Video- und Datenmaterial finden kann. Dies gelingt jeweils durch Eintippen und Anklicken dieser Kürzel im Internet-Browser, in der Online-Ausgabe dieses Buchs einfach durch direktes Anklicken dieser Links. Einige dieser Materialien entsprechen nicht strengen wissenschaftlichen Anforderungen, erleichtern dem Leser möglicherweise aber einen einfacheren Zugang zu komplexeren Sachthemen.

Aktualisierte und ergänzende Text- und Bildmaterialien zu diesem Buch sowie gegebenenfalls erforderliche Fehlerkorrekturen des Buchtextes werden fortlaufend auf der Seite [sn.pub/hebmF6](http://sn.pub/hebmF6) im Internet veröffentlicht.

werden (Kap. 10). Für ein tieferes Verständnis all dieser Phänomene werden jeweils die zurzeit anerkannten Szenarien und Theorien möglichst anschaulich erläutert. Dafür werden die mithilfe moderner Teleskope und In-situ-Messungen auf Satelliten gewonnenen Beobachtungsergebnisse, aber auch einige durch Modell- und numerische Simulationsrechnungen gewonnene Erkenntnisse vorgestellt.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Das Sonnensystem und die Heliosphäre</b>	<b>1</b>
1.1	Eigenschaften des Sonnensystems	1
1.2	Dynamoprozesse und magnetische Eigenschaften	4
1.3	Der Einfluss der Sonne auf die Heliosphäre	6
1.4	Zur Erforschung des heliosphärischen Weltraumwetters	8
	Weiterführende Literatur	13
<b>2</b>	<b>Erforschung der Sonne und Heliosphäre</b>	<b>15</b>
2.1	Kurze Geschichte magnetischer Phänomene und Prozesse im Sonnensystem	16
2.2	Observatorien im Weltraum und auf der Erde	20
	2.2.1 Kurze Geschichte der Weltraummissionen	20
	2.2.2 Bodengebundene, ballongetragene und von Raketen aus beobachtende Sonnentelkope	27
2.3	Menschen und ihre Forschungsmethoden	32
2.4	Einige Messinstrumente und Messtechniken	34
	2.4.1 Allgemeine Bemerkungen	34
	2.4.2 Messungen von Teilchen	36
	2.4.3 Messungen von Feldern	39
	2.4.4 Messungen von Photonen	41
2.5	Analytische Modellierung und numerische Simulation	44
	Weiterführende Literatur	47

<b>3</b>	<b>Die magnetisch aktive Sonne</b>	49
3.1	Magnetische Sonnenphänomene	52
3.2	Der innere Aufbau und die Atmosphärenschichten der Sonne	53
3.2.1	Ein Blick in das Sonneninnere	54
3.2.2	Sonnenphänomene in den solaren Atmosphärenschichten	56
3.3	Magnetische Sonnenflecken und solare Aktivitätszyklen	59
3.3.1	Sonnenflecken und Fackelgebiete im photosphärischen Netzwerk	60
3.3.2	Sonnenflecken im chromosphärischen Netzwerk und in der Korona	63
3.3.3	Über die Entstehung der Sonnenflecken	65
3.3.4	Entwicklung der Sonnenfleckenrelativzahl und magnetischer Flussdichten im Verlauf der 11- bzw. 22-jährigen Aktivitätszyklen	70
3.3.5	Die passive und aktive Sonne	73
3.4	Erzeugung solarer Magnetfelder in Dynamoprozessen	75
3.4.1	Das dynamoelektrische Prinzip des Werner von Siemens	75
3.4.2	Zur Realisierung kosmischer Dynamoprozesse	76
3.4.3	Zur Wirkungsweise des Sonnendynamos	77
3.4.4	Das $\alpha$ - $\Omega$ -Dynamo-Modell	80
3.4.5	Das Flusstransport-Dynamomodell	82
3.5	Chromosphärisches Netzwerk, Spikulen und Tornados	86
3.5.1	Chromosphärische Spikulen	88
3.5.2	Atmosphärische Heizung durch chromosphärische Tornados	89
3.5.3	Solare Gaswolken über dem Sonnenrand	91
3.6	Protuberanzen und koronale Magnetfeldstrukturen	92
3.6.1	Protuberanzen und Filamente	94
3.6.2	Feldstrukturentwicklungen in Protuberanzen	94
3.6.3	Die instabile Grand-Daddy-Heckenprotuberanz	97
3.7	Flares, solare Eruptionen und koronale Masseauswürfe	98
3.7.1	Freisetzung magnetischer Energien in Flare-Prozessen	99
3.7.2	Eruptionen solarer Protuberanzen	103

3.7.3	Koronale Masseauswürfe	105
3.8	Zur Aufheizung der solaren Atmosphärenschichten	108
	Weiterführende Literatur	113
<b>4</b>	<b>Der Sonnenwind im Weltraum</b>	<b>115</b>
4.1	Historische Bemerkungen	116
4.2	Sonnenwind und Heliosphäre	119
4.2.1	Regionen der Heliosphäre	119
4.2.2	Am Rande von Heliosphäre und Sonnensystem	122
4.3	Eigenschaften des Sonnenwinds und ihre Variationen im Verlauf des Sonnenzyklus	124
4.3.1	Fundamentale Parameter	124
4.3.2	Räumliche Variationen	125
4.3.3	Zeitliche Variationen mit dem Sonnenzyklus	129
4.4	Die Quellen des Sonnenwinds in der Sonnenkorona	130
4.4.1	Großräumige Quellen in der Korona	131
4.4.2	Kleinräumige Quellen im chromosphärischen Netzwerk	135
4.4.3	Kurze Zusammenfassung	138
4.5	Heizung der Korona und Beschleunigung des Sonnenwinds	139
4.5.1	Temperaturen und das Heizungsproblem der Sonnenatmosphäre	139
4.5.2	Zur Beschleunigung des Sonnenwinds	141
4.5.3	Koronale Masseauswürfe	147
4.5.4	Zur Heizung der Sonnenkorona	149
4.5.5	Zur Beschleunigung schwerer Ionen	152
4.6	Die dynamische Heliosphäre	154
4.6.1	Turbulenzen und Wellen im Sonnenwind	154
4.6.2	Stoßwellen und Diskontinuitäten im Sonnenwind	160
4.7	Mikroskopische Prozesse im Sonnenwind	165
4.7.1	Allgemeine Betrachtungen	165
4.7.2	Geschwindigkeitsverteilungen und grundlegende Begriffe	168
4.7.3	Charakteristische Längen und Zeiten im Sonnenwind	170
4.7.4	Verteilungsfunktionen von Elektronen	173
4.7.5	Verteilungsfunktionen der Protonen	176

4.7.6	Plasmamikroinstabilitäten	178
4.7.7	Schwere Ionen im Sonnenwind	182
	Weiterführende Literatur	184
<b>5</b>	<b>Parker Solar Probe und Solar Orbiter</b>	<b>185</b>
5.1	Neue Epoche in der Erforschung der inneren Heliosphäre	185
5.2	Wissenschaftliche Ziele und Instrumente von Parker Solar Probe	189
5.2.1	Wissenschaftliche Fragen	189
5.2.2	Wissenschaftliche Instrumente	191
5.3	Wissenschaftliche Ziele und Instrumente von Solar Orbiter	192
5.3.1	Wissenschaftliche Fragen	192
5.3.2	Wissenschaftliche Instrumente	194
5.4	Erste Ergebnisse der Missionen	196
5.4.1	Sonnenwindaufnahmen mit WISPR	196
5.4.2	Wellen und Turbulenz im Sonnenwind	197
5.4.3	Magnetfeldumkehrungen	198
5.4.4	Lagerfeuer im ultravioletten Licht	202
5.4.5	Ultraviolettes Linienspektrum der Sonnenatmosphäre	202
5.4.6	Bestimmung der Geschwindigkeit des Sonnenwinds	205
5.4.7	Neuigkeiten von PSP und SO	207
	Weiterführende Informationen im Internet	208
<b>6</b>	<b>Hindernisse im Sonnenwind</b>	<b>209</b>
6.1	Bugstoßwellen vor magnetischen Hindernissen	211
6.2	Magnetosphären und Ionosphären der Planeten und Monde als Hindernisse	213
6.3	Asteroiden und Kometen als Hindernisse	216
6.4	Interstellare Teilchen als Hindernisse	218
	Weiterführende Literatur	219
<b>7</b>	<b>Kometen und ihre Schweife</b>	<b>221</b>
7.1	Ausbildung der Kometenkoma	224
7.2	Kometenschweife in großer Sonnennähe	226
7.3	Fragmentation des Kometenkerns und Schweifabrisse	228
7.4	Aktivitäten im Kometenkern	230
	Weiterführende Literatur	232



<b>8</b>	<b>Magnetosphären, Ionosphären und Polarlichter</b>	235
8.1	Historisches	236
8.2	Die Planeten mit dynamogenierten Magnetosphären	241
8.3	Die Erde im Sonnenwind	247
8.3.1	Erzeugung der erdmagnetosphärischen Felder	249
8.3.2	Funktionsprinzip des Geodynamos	252
8.3.3	Exkursionen und Umpolungen des Erdmagnetfelds	255
8.3.4	Strukturen und Stromsysteme der Erdmagnetosphäre	259
8.3.5	Über die Entstehung der Polarlichter	262
8.3.6	Erdmagnetische Teilstürme	266
8.4	Magnetfeldeigenschaften anderer Planeten	268
8.4.1	Merkurs Magnetfeld in großer Sonnennähe	269
8.4.2	Die induzierte Magnetosphäre der Venus	271
8.4.3	Das Krustenmagnetfeld des Erdmonds	273
8.4.4	Elektrische Ströme und Magnetfelder auf dem Mars	274
8.4.5	Dynamoprozesse im Inneren des Jupiters	276
8.4.6	Einfluss von Magnetfeldern auf die Ringstrukturen des Saturns	278
8.5	Strahlungsgürtel und Polarlichter anderer Planeten	280
8.5.1	Strahlungsgürtel und Polarlichter des Jupiters	280
8.5.2	Polarlichter des Saturns	283
8.5.3	Strahlungsgürtel und Polarlichter durch bzw. auf Monden der Gasplaneten	285
8.5.4	Die Polarlichter der Eisplaneten	288
8.6	Bedeutung der Erforschung planetarer Magnetosphären und Ionosphären	291
8.6.1	Warum die Magnetosphären erforscht werden	291
8.6.2	Über die Bedeutung der Ionosphären	292
	Weiterführende Literatur	294
<b>9</b>	<b>Erforschung des Weltraumwetters</b>	295
9.1	Weltraumwetter in der Heliosphäre und Umgebung der Erde	296

9.1.1	Wetter und Klima im Weltraum und auf der Erde	296
9.1.2	Das Weltraumwetter bestimmende Faktoren	297
9.2	Vorstellung exemplarischer Weltraumwetterereignisse	300
9.2.1	Koronale Masseauswürfe	300
9.2.2	Solare energiereiche Teilchen	302
9.2.3	Kosmische Strahlung in der Heliosphäre	304
9.3	Weltraumwetter und Erdmagnetosphäre	307
9.3.1	Erdmagnetische Stürme	308
9.3.2	Strahlenbelastung in den Van-Allen-Gürteln	310
9.4	Auswirkungen des Weltraumwetters	312
9.4.1	Auswirkungen auf das Erdsystem	312
9.4.2	Konsequenzen des Weltraumwetters für unsere technische Umwelt	312
9.4.3	Direkte Konsequenzen des Weltraumwetters für uns Menschen	315
9.5	Aufgaben und konkrete Arbeiten der Weltraumwetter-Vorhersagezentren	317
9.5.1	Vorhersagen zur Entwicklung des Weltraumwetters	317
9.5.2	Bewusstmachung des Zustands unserer Weltraumumgebung	318
9.5.3	Numerische Simulationen des Weltraumwetters	320
9.5.4	Einige Schutzvorkehrungen gegen Auswirkungen des Weltraumwetters	322
9.6	Bemannte Raumfahrt und die Auswirkungen des Weltraumwetters auf Mond und Mars	324
9.6.1	Schutzvorkehrungen für Astronauten auf Raumflügen	324
9.6.2	Gefahren durch das Weltraumwetter auf dem Mond	326
9.7	Heliobiologie – Über den möglichen Einfluss des Weltraumwetters auf die menschliche Gesundheit	327
	Weiterführende Literatur	331

<b>10</b>	<b>Mögliche Auswirkungen des Weltraumwetters auf das Erdklima</b>	333
10.1	Treibhausgase und der Klimawandel	335
10.2	Temperaturschwankungen im Rhythmus der Milanković-Zyklen	337
10.3	Sonne und Erde im Strahlungsgleichgewicht	339
10.4	Über die Vielfalt der Klimafaktoren	342
10.5	Kosmische Klimaeinflussfaktoren	347
	Weiterführende Literatur	353
	<b>Epilog</b>	355
	<b>A Zur Geschichte der Entdeckung solarer und heliosphärischer Prozesse</b>	361
	<b>Weiterführende Literatur</b>	399
	<b>Glossar</b>	401
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	415

# Abbildungsverzeichnis

Abb. P.1	Lebensgefahr für Astronauten bei Sonneneruptionen © a C. Duke/NASA, b Big Bear Solar Observatory, c Harrison H. Schmitt/NASA	XXVIII
Abb. P.2	Vom Sonnenwind getriebenes Weltraumwetter © a M. Druckmüller, b NASA, c NASA	XXXI
Abb. 1.1	Sonnensystem, Heliosphäre und das Interstellare Medium © C. Carter/Keck Institute for Space Studies, U. v. Kusserow	2
Abb. 1.2	Planeten und Kometen des Sonnensystems © NASA	3
Abb. 1.3	Aufnahme der totalen Sonnenfinsternis des Jahres 2020 © M. Druckmüller/A. Möller	9
Abb. 2.1	Satellitenmissionen, Raumsonden und Sonnentelkope (bis 2005) © NASA, ESA, NASA/DLR, U. v. Kusserow	21
Abb. 2.2	Satellitenmissionen, Raumsonden und Sonnentelkope (ab 2006) © NASA, ESA, KIS, BBSO, Institute of Solar-Terrestrial Physics Irkutsk, NSO	22
Abb. 2.3	Das Daniel K. Inouye Solar Telescope (DKIST) © a NSO/AURA/NSF, b NSF/NSO/AURA NSO/NSF/AURA. National Solar Observatory Association of Universities for Research in Astronomy, Inc. on behalf of the National Solar Observatory CO 80303, USA	29
Abb. 2.4	Raketen- und ballongetragenes sowie geplantes Sonnenobservatorium © NASA, b SUNRISE/S. Solanki, c G. Pérez Díaz (Instituto de Astrofísica de Canarias)	31

## XLIV      **Abbildungsverzeichnis**

Abb. 2.5	Galerie ausgewählter Plasma-, Astro-, Sonnen-, Helio- und Geophysiker © AIP Publishing, J. Zich (Univ. of Chicago), U. Christensen, A. Brandenburg, E. Priest, L. Boenisch, A. Vourlidas/JHUAPL, S. P. Gary, G. Paschmann, U. v. Kusserow, C. Schrijver, G. Howes	33
Abb. 2.6	Verschiedene Teilchendetektoren und deren Funktionsprinzipien © a A. Wang/SPC_Glamour/SWEAP/PSP, b, c, f U. v. Kusserow, d NASA/GSFC/SSL, e SWICS/Univ. of Maryland/Space Physics Group	38
Abb. 2.7	Instrumente und Funktionsprinzipien zur Vermessung elektromagnetischer Felder und Wellen © a NASA/UC Berkeley/IWF Graz, b, c U. v. Kusserow, d JHUAPL/G. Jannet/ LPC2E (Bearbeitung: U. v. Kusserow), e ESA/NASA/GSFC	40
Abb. 2.8	Spektrometer zur Messung von Teilchengeschwindigkeit und Magnetfeldstärke © U. v. Kusserow	42
Abb. 3.1	Durch den Einfluss solarer Magnetfelder erzeugte Sonnenphänomene © a NASA, b JAXA, c NASA/GSFC/Miloslav Druckmüller	51
Abb. 3.2	Aufbau des Inneren und der Atmosphäre der Sonne sowie Sonnenphänomene © NASA/GSFC, U. v. Kusserow	54
Abb. 3.3	Temperatur- und Teilchendichteverteilungen in der Sonnenatmosphäre © U. v. Kusserow (nach M. Aschwanden)	58
Abb. 3.4	Aufnahmen des Inouye Solar Telescope (DKIST) von einem Sonnenfleck und einem Fackelgebiet im granularen photosphärischen Netzwerk © a, b NSO/AURA/NSF. National Solar Observatory Association of Universities for Research in Astronomy, Inc. on behalf of the National Solar Observatory CO 80303, USA	61
Abb. 3.5	Chromosphärische und koronale Magnetfeldstrukturen in solaren Fleckengruppen © a O. Engvold/ J. E. Wiik/ L. Rouppe van der Voor, b NASA/GSFC/M. Druckmüller (PM-NAFE)	64
Abb. 3.6	Entstehung von Fleckengruppen durch aufsteigende magnetische Flussröhren © NASA/GSFC, U. v. Kusserow	65
Abb. 3.7	Magnetische und elektrische Felder im Plasma, die Lorentzkraft und die „Eingefrorenheit“ magnetischer Feldlinien © U. v. Kusserow	68

Abb. 3.8	Periodische Entwicklungen der Sonnenaktivität © a SILSO (Royal Observatory of Belgium), b D. H. Hathaway/NASA/	71
Abb. 3.9	Fleckenaktivität und koronale Magnetfelder in Zeiten minimaler und maximaler magnetischer Sonnenaktivität © a, b NASA, c M. Druckmüller/P. Aniol, d M. Druckmüller u. a.	74
Abb. 3.10	Schematische Darstellungen zur Erzeugung solarer Magnetfelder in Dynamoprozessen © a NASA/DSFC Scientific Visualization Studio, U. v. Kusserow, b NASA/DSFC Scientific Visualization Studio (Bearbeitung: U. v. Kusserow)	78
Abb. 3.11	Dynamo-Modelle zur Erzeugung solarer Magnetfelder © a, b U. v. Kusserow	81
Abb. 3.12	Erzeugung kosmischer Magnetfelder nach dem Funktionsprinzip sogenannter alpha-omega-Dynamos © S. Sanchez/A. Fournier/J. Aubert, U. v. Kusserow	85
Abb. 3.13	Spikulen im magnetischen chromosphärischen Netzwerk © a TURM Observatory (TU Darmstadt), b L. Rouppe van der Voort (University of Oslo)	87
Abb. 3.14	Erscheinungsformen chromosphärischer Wirbel und Spikulen in den unterschiedlichen Atmosphärenschichten der Sonne © a E. Scullion/ S. Wedemeyer u. a./NASA, b T. Samanta u. a. BBSO/GST/NASA/SDO (Bearbeitung: U. v. Kusserow)	90
Abb. 3.15	Spikulen, magnetische Bögen und Protuberanzen über dem Sonnenrand © NASA/JAXA	92
Abb. 3.16	Solare Filamente und Protuberanzen © a W. Lille, b Big Bear Solar Observatory	93
Abb. 3.17	Schematische Darstellungen zur Entwicklung magnetischer Feldstrukturen und der damit einhergehenden Materieeinlagerung in Heckenprotuberanzen © U. v. Kusserow	95
Abb. 3.18	Eruption der „Grand Daddy“ Heckenprotuberanz © High Altitude Observatory (HAO)	98
Abb. 3.19	Dynamische Entwicklungen solarer Flares in der Chromosphäre, Transitregion und Korona © a NASA/GSFC, b M. Cheung (Lockheed Martin)/M. Rempel (NCAR)	101
Abb. 3.20	Lokale Zerreiß- und Neuverbindungsprozesse des Magnetfeldes in resistiven Plasmen und Fluiden © U. v. Kusserow	103

## **XLVI      Abbildungsverzeichnis**

Abb. 3.21	Erklärung einer solaren Eruption im Standardmodell © a NASA/GSFC/M. Druckmüller (PM-NAFE), b U. v. Kusserow	105
Abb. 3.22	Auslösung solarer Eruptionen durch aufsteigende magnetische Feldbögen © U. v. Kusserow	106
Abb. 3.23	Aufnahmen gigantischer solarer Eruptionen mit dem Solar Dynamic Observatory © a NASA/GSFC/M. Druckmüller (PM-NAFE), b und c NASA/GSFC	107
Abb. 3.24	Die starke Veränderung der Größe des als Plasmabeta benannten Parameters © U. v. Kusserow (nach G. A. Gary)	110
Abb. 3.25	Beobachtung dynamischer Prozesse in der Chromosphäre, Transitregion und Korona der Sonne im UV-Licht © NASA/GSFC/M. Druckmüller (PM-NAFE)	111
Abb. 4.1	Bedeutame Entdeckungen zweier herausragender Wissen- schaftler im Bereich der Plasma- und Astrophysik © a AIP Publishing, b U. v. Kusserow/NASA, c J. Zich (Univ. of Chicago), d U. v. Kusserow/NASA/JHUAPL; Glasheen Graphics, American Geophysical Union, courtesy AIP Emilio Segrè Visual Archives	117
Abb. 4.2	Schematische Darstellung der Heliosphäre der Sonne © U. v. Kusserow	120
Abb. 4.3	Teilchenflüsse im Grenzbereich der Heliosphäre mit dem Interstellaren Raum © NASA	122
Abb. 4.4	Die Struktur der Heliosphäre © a U. von Kusserow, NASA, b M. Opher/AAS, c NASA/STScI/AURA	123
Abb. 4.5	Radiale Geschwindigkeitsprofile der Sonnenwinde und Koronaler Masseauswürfe © U. v. Kusserow, NASA	126
Abb. 4.6	Künstlerische Darstellung der dreidimensionalen Heliosphäre mit den zugehörigen Sonnenwindströmen © U. v. Kusserow	127
Abb. 4.7	Mit der Raumsonde Ulysses gemessene Geschwindigkeiten der Sonnenwindströme © ESA, NASA/Yohkoh (Bearbeitung: U. v. Kusserow)	128
Abb. 4.8	Die sich zeitlich ändernde Sonnenkorona und Stromstruktur des Sonnenwindes © ESA/NASA/D. McComas/Space Science Review (Bearbeitung: U. v. Kusserow); Ulysses' Second Orbit, Remarkably Different Solar Wind, D. J. McComas, R. Goldstein, J. T. Gosling, R. M. Skoug, Space Science Reviews 97: 99–103, 2001 (Kluwer Academic Publishers), Figure 1	129

Abb. 4.9	Magnetisch bestimmte Phänomene in der Sonnenatmosphäre © a M. Druckmüller/ P. Aniol/ S. Habbal/NASA (Zusammenstellung: U. v. Kusserow), b U. v. Kusserow	131
Abb. 4.10	Darstellung des solaren Magnetfeldes als Potentialfeld © a M. Druckmüller/ P. Aniol/ S. Habbal/NASA (Zusammenstellung: U. v. Kusserow), b U. v. Kusserow	133
Abb. 4.11	Bild der Sonne im ultravioletten Licht mit Quellen des Sonnenwindes © a und b ESA/NASA, c NASA/GSFC	134
Abb. 4.12	Chromosphärisches Netzwerk im Licht der Heliumlinie He II 30,4 nm © NASA/GSFC, U. v. Kusserow	136
Abb. 4.13	Quellen des Sonnenwindes in der Transit-Zone im magnetischen Netzwerk a JAXA, b und c E. Marsch/C.-Y. Tu	137
Abb. 4.14	Pannekoek-Rosseland Potenzial © U. v. Kusserow	143
Abb. 4.15	Typische Strukturen eines Interplanetaren Koronalen Masseauswurfs © a NASA/ESA, b U. v. Kusserow, NASA/GSFC	148
Abb. 4.16	Illustration des magnetischen Netzwerks als Funktion der Höhe über der Sonnenoberfläche © S. Wedemeyer	151
Abb. 4.17	Ergebnisse von Modellrechnungen zur Beschleunigung des Sonnenwindes © S. Cranmer, Living Rev. Solar Phys., 6, 2009 ( <a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0</a> ), Textbearbeitung: U. v. Kusserow; Cranmer, S.R. Coronal Holes. Living Rev. Sol. Phys. 6, 3 (2009). <a href="https://doi.org/10.12942/lrsp-2009-3">https://doi.org/10.12942/lrsp-2009-3</a>	153
Abb. 4.18	Ulysses Plasma- und Magnetfeld-Beobachtungen © T. Horbury, R. Forsyth; The heliosphere near solar minimum. The Ulysses perspective”, André Balogh, Richard G. Marsden and Edward J. Smith (eds.). Springer-Praxis Books in Astrophysics and Astronomy. London: Springer. ISBN 1-85233-204-2, 2001, p. 167 – 227	155
Abb. 4.19	Alfvénwellen im Sonnenwind © X. Wang u. a., ApJ 746, 2012	156
Abb. 4.20	Leistungsspektrum des interplanetaren Magnetfeldes bei 1AE © R. Bruno, V. Carbone, Liv. Rev. Sol. Phys., 10, (2013), ( <a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0</a> ), Bearbeitung: U. v. Kusserow Bruno, R., Carbone, V. The Solar Wind as a Turbulence Laboratory. Living Rev. Sol. Phys. 10, 2 (2013). <a href="https://doi.org/10.12942/lrsp-2013-2">https://doi.org/10.12942/lrsp-2013-2</a>	157



## XLVIII      **Abbildungsverzeichnis**

- Abb. 4.21      Varianz der drei Magnetfeldkomponenten und seines Betrages im Sonnenwind © R. Bruno, V. Carbone, Liv. Rev. Sol. Phys., 10, (2013), (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), Bearbeitung: U. v. Kusserow Bruno, R., Carbone, V. The Solar Wind as a Turbulence Laboratory. Living Rev. Sol. Phys. 10, 2 (2013). <https://doi.org/10.12942/lrsp-2013-2> 158
- Abb. 4.22      Korrelationskoeffizienten der über die Sonnenrotation gemittelten Druckschwankungen im Sonnenwind © R. Bruno, V. Carbone, Liv. Rev. Sol. Phys., 10, (2013) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), Bearbeitung: U. v. Kusserow; Bruno, R., Carbone, V. The Solar Wind as a Turbulence Laboratory. Living Rev. Sol. Phys. 10, 2 (2013). <https://doi.org/10.12942/lrsp-2013-2> 160
- Abb. 4.23      Parker-Spirale und wechselwirkende Sonnenwindströme © a U. v. Kusserow, b U. v. Kusserow, NASA/GSFC 161
- Abb. 4.24      Modellrechnungen zur Parker Spiral und variable Intensität kosmischer Strahlung © a S. I. Akasofu/K. Hakamada 1983, b Robert J. Leamon (Bearbeitung: U. v. Kusserow); zur Verfügung gestellt von Springer Nature und dem Copyright Clearance Center, Solar Wind Disturbances In The Heliosphere Caused By Successive Solar Flares From The Same Activity Region, S. I. Akasofu/K. Hakamada, The work reported here was supported in part by a contract from the U.S.A.F, FI9628-81-K-0024. Fig. 1a 163
- Abb. 4.25      Stromwechselwirkungszone vermessen von der Ulysses Raumsonde © I. G. Richardson, Living Rev. Sol. Phys. 15, 1 (2018), (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), Bearbeitung: U. v. Kusserow; Richardson, I.G. Solar wind stream interaction regions throughout the heliosphere. Living Rev Sol Phys 15, 1 (2018). <https://doi.org/10.1007/s41116-017-0011-z> 164
- Abb 4.26      Maxwell-Boltzmann-Verteilung der Molekülgeschwindigkeiten © U. v. Kusserow 167
- Abb. 4.27      Illustration unterschiedlicher Geschwindigkeitsverteilungen © U. v. Kusserow/E. Marsch 169
- Abb. 4.28      Grundlegenden Gleichungen der Magnetohydrodynamik, der kinetischen Plasmaphysik, sowie die Maxwell Gleichungen der Elektrodynamik © U. v. Kusserow/E. Marsch 171

Abb. 4.29	Eigenschaften der Elektronenverteilung © R. Schwenn/E. Marsch, U. v. Kusserow	175
Abb. 4.30	Aus Modellrechnungen bestimmte Geschwindigkeitsverteilungen der Elektronen im Sonnenwind © H. M. Smith, E. Marsch, P. Helander ApJ, 753, 2012; Electron Transport in the Fast Solar Wind, H. M. Smith, E. Marsch, P. Helander, June 2012, The Astrophysical Journal 753(1):31, Figure 3	176
Abb. 4.31	Geschwindigkeitsverteilungen der Protonen im Sonnenwind © E. Marsch (Bearbeitung: U. v. Kusserow)	177
Abb. 4.32	Häufigkeitsverteilung der Protonenparameter in einer Ebene aufgespannt von Temperaturanisotropie und parallelem Plasma-Beta © D. Verscharen, K. G. Klein, B. A. Maruca, Living Rev. Solar Phys. (2019), Figure 21, ( <a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0</a> ), Textbearbeitung: U. v. Kusserow; Verscharen, D., Klein, K.G. & Maruca, B.A. The multi-scale nature of the solar wind. Living Rev Sol Phys 16, 5 (2019). <a href="https://doi.org/10.1007/s41116-019-0021-0">https://doi.org/10.1007/s41116-019-0021-0</a>	181
Abb. 4.33	Messpunkte der kinetischen Temperaturen von Sauerstoff-Ionen (O <sup>5+</sup> ), Wasserstoff (H), und Elektronen (e) in verschiedenen solaren Streamern © L. Abbo u. a. Space Science Reviews 201, 2016	183
Abb. 5.1	Künstlerische Darstellungen von Parker Solar Probe und Solar Orbiter © a Solar Orbiter: ESA/ATG medialab; Parker Solar Probe: NASA/Johns Hopkins APL, b ESA/NASA/JHUAP, U. v. Kusserow	187
Abb. 5.2	Abstände der Sonden Parker Solar Probe und Solar Orbiter von der Sonne © NASA/DLR/ESA (Zusammenstellung: U. v. Kusserow)	188
Abb. 5.3	Zeitleisten der Bahngeschwindigkeiten und Sonnenabstände von PSP und SO © a NASA/JHUAPL, b ESA/NASA (Bearbeitung: U. v. Kusserow)	189
Abb. 5.4	Die Raumsonde Parker Solar Probe © NASA/JHUAPL (Bearbeitung: U. v. Kusserow)	190
Abb. 5.5	Die Raumsonde Solar Orbiter © a NASA/K. Shiflett, b STIX/ESA (Bearbeitung: U. v. Kusserow), c ESA/S. Corvaja, d ESA/ATG medialab	193
Abb. 5.6	Aufnahmen des abströmenden Sonnenwindes von Parker Solar Probe (WISPR), SOHO und STEREO © a NASA/Johns Hopkins APL/Naval Research Laboratory, b ESA/NASA, c ESA	197

## L      **Abbildungsverzeichnis**

Abb. 5.7	Zeitliche Entwicklung der Wellen und Turbulenzen im Sonnenwind © S. D. Bale u. a., nature 2019 (Bearbeitung: U. v. Kusserow); Highly structured slow solar wind emerging from an equatorial coronal hole, S. D. Bale et al., Nature volume 576, pages237–242 (2019), Figure 2	198
Abb. 5.8	Von Parker Solar Probe vermessene „Switchbacks“ © A. Larosa u. a. 2021, A&A, 650, A3 (Bearbeitung: U. v. Kusserow)	199
Abb. 5.9	Spekulative Entstehungsszenarien von lokalen Magnetfeldumkehrungen © a NASA/JHUAPL, b U. v. Kusserow/E. Marsch	200
Abb. 5.10	Von Solar Orbiter entdeckte „Campfires“ im ultravioletten Licht © a und b Solar Orbiter/EUI Team (ESA & NASA); CSL, IAS, MPS, PMOD/WRC, ROB, UCL/MSSL, c und d Y. Chen u. a. (2021), (Zusammenstellung: U. v. Kusserow)	203
Abb. 5.11	Von Solar Orbiter gemessenes Linienspektrum im ultravioletten Licht © A. Fludra u. a. 2021, A&A, 656, A38 (Bearbeitung: U. v. Kusserow)	204
Abb. 5.12	Geschwindigkeit des Sonnenwindes mithilfe der sogenannten „Doppler-dimming“-Technik © M. Romoli u. a. 2021, A&A, 656, A32 (Bearbeitung: U. v. Kusserow)	206
Abb. 5.13	Aufnahmen des Extreme Ultraviolet Imager (EUI) Instruments von Solar Orbiter © a und c ESA & NASA/Solar Orbiter/EUI team; Data processing: E. Kraaikamp (ROB), b Solar Orbiter/EUI and SOHO/LASCO teams, ESA & NASA	208
Abb. 6.1	Künstlerische Darstellung der Magnetosphären und Himmelsobjekte im Sonnensystem © NASA/GSFC/M. P. Hrybyk-Keith (Text: U. v. Kusserow)	210
Abb. 6.2	Schematische Darstellung magnetosphärischer Strukturen im Sonnenwind © U. v. Kusserow	212
Abb. 6.3	Bugstoßwellen im Umfeld angeströmter Hindernisse © a Wikipedia gemeinfrei, b ESA	213
Abb. 6.4	Planeten und Staubpartikel als Hindernisse im Sonnenwind © NASA/Johns Hopkins APL/Naval Research Laboratory/G. Stenborg/B.Gallagher	214
Abb. 6.5	Asteroiden und Kometen © a NASA/JHUAPL, b H.-J. Leue	217

Abb. 6.6	Sternwinde Kosmische Strahlung als Hindernis für magnetisierte Sonnenwindströme © NASA/GSFC /Conceptual Image Lab (Text: U. v. Kusserow)	219
Abb. 7.1	Charakteristische Koma- und Schweifstrukturen der Kometen © a M. Druckmüller, b P. Aniol/M. Druckmüller	223
Abb. 7.2	Kometenkern und Kometenkoma, Staub- und Plasmaschweife © U. v. Kusserow, NASA/JPL-Caltech/Univ. Maryland	225
Abb. 7.3	Kometen in großer Sonnennähe © a NASA/ESA, b NASA, c NASA/GSFC/ESA, d C. Downs u. a./NASA/GSFC	227
Abb. 7.4	Kometenkern-Fragmentation und Plasmaschweif-Abriss © a, c U. v. Kusserow, b E. Kolmhofer/H. Raab, Johannes-Kepler-Observatory Linz	229
Abb. 7.5	Ausbildung kometarer Jets auf dem Kometen Churyumov-Gerasimenko © ESA/Rosetta/MPS/OSIRIS Team/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA	231
Abb. 8.1	Polarlichter in der Ionosphäre der Erde und des Jupiters © a M. Druckmüller, b NASA/JPL-Caltech/SwRI	237
Abb. 8.2	Die Positionen der Planeten in der Heliosphäre unseres Sonnensystems © U. v. Kusserow, NASA	242
Abb. 8.3	Eigenschaften der Planeten des Sonnensystems mit dynamogenierten Magnetfeldern © U. v. Kusserow	244
Abb. 8.4	Größenvergleich dynamogenerter Magnetosphären der Planeten sowie des Mondes Ganymed © U. v. Kusserow, NASA	247
Abb. 8.5	Animationen und Ergebnissen von Simulationsrechnungen zum Verhalten der Erdmagnetosphäre im Sonnenwind © a NASA/GSFC/M. P. Hrybyk-Keith; NASA Goddard's Conceptual Image Lab/J. Masters b ESA/Vlasiator team, University of Helsinki c S. Kavosi/J. Raeder/UNH d NASA/Scientific Visualization Studio	248
Abb. 8.6	Unterschiedliche Erzeugungsprozesse des Erdmagnetfeldes © a DESY/G. A. Glatzmaier, b NASA/GSFC/J. Ng, c ESA/DTU Space/DLR, d ESA/Planetary Visions	250
Abb. 8.7	Erzeugung des dynamogenierten Magnetfeldes im metallischen Fluid des äußeren Erdkerns © a U. v. Kusserow, b N. Schaeffer/ISTerre (creative common licence CC BY 4.0)	253

## LII      **Abbildungsverzeichnis**

- Abb. 8.8      Umpolungen, Exkursionen und Anomalien des Erdmagnetfeld © a ESA/AOES/Medialab/Wikiwand, b J. Favre/A. Sheyko, c World Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism/Kyoto University, d ESA/DTU Space/Technical University of Denmark (Bearbeitung: U. v. Kusserow) 256
- Abb. 8.9      Erdmagnetische Strukturen und Stromsysteme © U. v. Kusserow, NASA 259
- Abb. 8.10     Abbildungen von Polarlichtern in höheren geographischen Breiten © a A. Gerst/ESA/NASA, b NASA/GSFC/ Scientific Visualization Studio, c NASA 263
- Abb. 8.11     Beschleunigung geladener Teilchen in der Erdmagnetosphäre und die Erzeugung von Polarlichtern © a U. v. Kusserow, NASA, b U. v. Kusserow, c ESA Medialab, U. v. Kusserow, d U. v. Kusserow 265
- Abb. 8.12     Ergebnisse von Simulationsrechnungen zur Auslösung Magnetischer Stürme im Erdmagnetosphärenschweif © NASA/Scientific Visualization Studio 267
- Abb. 8.13     Magnetosphäre und Dynamoprozesse des Merkur © a X. Jia u. a., b U. v. Kusserow (nach D. Heyner u. a./Science), c NASA/JHUAPL/Carnegie Institution for Science 270
- Abb. 8.14     Magnetische Rekonnexionsprozesse in der induzierten Magnetosphäre der Venus © a ESA/Y. Wei u. a., M. Fränz/MPS, b T. Zhang 272
- Abb. 8.15     Verteilung und Stärke magnetischer Krustenfelder auf der Mondoberfläche © M. A. Wieczorek 273
- Abb. 8.16     Dynamogenerierte Krustenmagnetfelder und elektrische Ströme in der induzierten Magnetosphäre des Mars © a NASA, b NASA/Goddard/MAVEN/CU Boulder/SVS/C. Starr 275
- Abb. 8.17     Erzeugung unterschiedlicher dynamogenerierter Magnetfeldanteile im Planeten Jupiter © a und b NASA/GSFC, c J. Wicht/MPS 277
- Abb. 8.18     Auswirkung saturnischer magnetosphärischer Felder auf die Saturnringe © a NASA/JPL-Caltech, b NASA/GSFC/D. Ladd 279
- Abb. 8.19     Strahlungsgürtel in der Magnetosphäre des Jupiters © NASA/JPL 281
- Abb. 8.20     Komplexe Polarlichterscheinungen in den Polregionen des Jupiters © a NASA/ESA/J. T. Clarke (Univ. of

	Michigan), b NASA/ESA/J. Nichols (Univ. of Leicester), c NASA/JPL-Caltech/SwRI/ASI/INAF/JIRAM	282
Abb. 8.21	Polarlichter des Saturns © a ESA/NASA/A. Simon (GSFC)/OPAL Team/J. DePasquale (STScI)/L. Lamy (Observatoire de Paris), b NASA/JPL /University of Leicester/University of Arizona, c NASA/JPL/University of Arizona	284
Abb. 8.22	Entstehung von Strahlungsgürteln durch Monde der Gasplaneten sowie von Polarlichtern auf dem Jupitermond Ganymed © a J. Spencer, b NASA/JPL/JHUAPL/University of Colorado/Central Arizona College/SSI, c NASA/ESA/G. Bacon/J. Sauer	286
Abb. 8.23	Polarlichterscheinung auf dem Uranus © a ESA/Hubble & NASA/L. Lamy / Observatoire de Paris, b NASA/E. Karkoschka u. a. (University of Arizona), c Röntgenstrahlung: NASA/CXO/University College London/W. Dunn u. a.; Optisch: W.M. Keck Observatory	290
Abb. 9.1	Bilder spektakulärer Ereignisse in der Erdatmosphäre © a A. Alishevskikh, b Crey – CC BY 2.0 (ESA)	299
Abb. 9.2	Charakteristische Beispiele morphologisch gut-ausgeprägter CMEs © NASA/ESA	301
Abb. 9.3	Koronaler Massenauswurf mit magnetischer Blase, Röntgen- und Radiostrahlung © NASA/ESA/AGU/St. Cyr	303
Abb. 9.4	Typische Strahlung der magnetisch aktiven Sonne im Zusammenhang mit einem Halo CME und koronaler Stoßwelle © U. v. Kusserow/E. Marsch (nach A. Anastasiadis u. a.)	304
Abb. 9.5	Graduelles und impulsives SEP Ereignis assoziiert mit Parker-Spirale und Koronalem Masseauswurf © M. Desai/J. Giacalone, Living Rev. Sol. Phys. 13, 3 (2016) ( <a href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a> ); Bearbeitung: U. v. Kusserow; Desai, M., Giacalone, J. Large gradual solar energetic particle events. Living Rev. Sol. Phys. 13, 3 (2016). <a href="https://doi.org/10.1007/s41116-016-0002-5">https://doi.org/10.1007/s41116-016-0002-5</a>	305
Abb. 9.6	Energiereiche heliosphärische, nicht von der Sonne stammende Teilchenstrahlung © M. S. Potgieter, M.S. Solar Modulation of Cosmic Rays. Living Rev. Sol. Phys. 10, 3 (2013); ( <a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/ by/4.0</a> ) Potgieter, M.S. Solar Modulation of Cosmic Rays. Living Rev. Sol. Phys. 10, 3 (2013). <a href="https://doi.org/10.12942/lrsp-2013-3">https://doi.org/10.12942/lrsp-2013-3</a>	306

## LIV      **Abbildungsverzeichnis**

- Abb. 9.7      Zeitprofile der Kosmischen Strahlung und der  
Sonnenfleckenzahl © Iskra, K. et al., Sol. Phys. 294,  
115 (2019) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)  
Bearbeitung: U. v. Kusserow; Iskra, K., Siluszyk, M., Alania,  
M. et al. Experimental Investigation of the Delay Time in  
Galactic Cosmic Ray Flux in Different Epochs of Solar  
Magnetic Cycles: 1959–2014. Sol Phys 294, 115 (2019).  
<https://doi.org/10.1007/s11207-019-1509-4> 307
- Abb. 9.8      Hochenergetische Prozesse in den Van-Allen-Gürteln  
© a NASA/GSFC/JHUAPL, b NASA 311
- Abb. 9.9      Auswirkungen des magnetisierten Sonnenwindes,  
solarer Eruptionen sowie der galaktischen Kosmischen  
Strahlung im Umfeld der Erde © ESA/Science Office,  
CC BY-SA 3.0 IGO, Text: U. v. Kusserow 314
- Abb. 9.10     Eindringen der Sonnenstrahlung sowie der Kosmischen  
Strahlung in verschiedene Schichten der Erdatmosphäre  
© NASA, U. v. Kusserow 316
- Abb. 9.11     Space Situational Awareness, das Wissen um den  
aktuellen Zustand der erdnahen Weltraumumgebung  
© ESA-P. Carril, Textbearbeitung: U. v. Kusserow 319
- Abb. 9.12     Vorhersagezentren für das Weltraumwetter  
© a NOAA, b ESA/Observatoire Royal de Belgique 321
- Abb. 9.13     Numerische Simulation des Weltraumwetters  
© NASA/GSFC Space Weather Lab 323
- Abb. 9.14     Auswirkungen solarer Eruptionen auf den Mond  
im Schweif der Erdmagnetosphäre © a U. v. Kusserow,  
NASA, b NASA 327
- Abb. 10.1     Zeitliche Entwicklungen der Konzentrationen des  
Treibhausgases Kohlendioxid und der Temperaturen  
© D. Lüthi u. a. (Bearbeitung, Aktualisierung:  
U. v. Kusserow) 336
- Abb. 10.2     Temperaturveränderungen aufgrund variierender  
Erdbahnparameter im Rahmen der Milankovitch  
Zyklen © a NASA/GSFC, b Wikipedia gemeinfrei  
(Bearbeitung: U. v. Kusserow) 338
- Abb. 10.3     Einflussnahme der Sonne auf Energiehaushalt der  
Erde im Strahlungsgleichgewicht © U. v. Kusserow,  
NASA/GSFC 341
- Abb. 10.4     Klimaeinflüsse im Erdsystem durch elektromagnetische  
Sonneneinstrahlung, solare energiereiche Partikel sowie  
galaktische Kosmische Strahlung © U. v. Kusserow 342

Abb. 10.5	Einfluss Kosmischer Strahlung auf Wolkenbildungsprozesse und das Erdklima © a NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC/Caltech)/U. v. Kusserow, b N. J. Shaviv/J. Veizer/U. v. Kusserow, c U. v. Kusserow/NASA/GSFC/NASA/CXC/SAO/F.Seward/NASA/ESA/ASU/J.Hester & A.Loll/NASA/JPL-Caltech/Univ. Minn./R.Gehrz	348
Abb. 10.6	Vielfalt des Einflusses solarer Prozesse, planetarer Konstellationen und der Kosmischen Strahlung auf das Erdklima © U. v. Kusserow/E. Marsch, NASA	352
Abb. E.1	Extrasolare Planetensysteme um magnetisch aktive Sterne © a K. G. Strassmeier/AIP, b NASA/JPL-Caltech, c Casey Reed/NASA	357
Abb. A.1	Naturforscher und Wissenschaftler, die den Einfluss kosmischer Magnetfelder in der Heliosphäre im Laufe der Geschichte erkannt haben © gemeinfrei, NASA, Image courtesy of the Observatories of the Carnegie Institution for Science Collection at the Huntington Library, San Marino, California	365



## Text für das Titelbild

Das Titelbild dieses Buchs ist ein Bildkomposit. Es zeigt eine Aufnahme der Sonnenkorona bei der totalen Sonnenfinsternis, die 2021 von Miloslav Druckmüller und Andreas Möller in der Antarktis beobachtet wurde. Ihr überlagert, bedeckt eine Aufnahme, die mit einer Kamera des Solar Dynamics Observatory (SDO) vom Weltraum aus gemacht wurde, die Sonnenscheibe. Die Chromosphäre und Transitregion der Sonnenatmosphäre sind darauf im ultravioletten Licht des einfach ionisierten Heliums bei einer Temperatur von etwa 50 000 Grad zu sehen. Die Feinstrukturen in der Sonnenkorona entstehen durch Streuung des von der Sonne ausgestrahlten weißen Lichts an den koronalen Elektronen: Sie veranschaulichen eindrucksvoll die hier komplexe Verteilung der Plasmadichte sowie den filigranen Verlauf der solaren Magnetfeldlinien.