

Raumsonden erforschen das heliosphärische Weltraumwetter im Sonnenwind (2)

von Ulrich v. Kusserow und Eckart Marsch

Nach ihren Starts im August 2018 bzw. Februar 2020 nähern sich zur Zeit die Raumsonden Parker Solar Probe (PSP) und Solar Orbiter (SO) an den Perihelia ihrer Orbits durch die innere Heliosphäre immer mehr der Sonne, die in den nächsten Jahren zunehmend aktiver wird. Durch in-situ Messungen vor Ort sowie durch Fernbeobachtung mit Teleskopen gewinnen die Plasma-, Heliosphären- und Sonnenphysiker mit Hilfe dieser Sonden besonders umfangreiches sowie räumlich, zeitlich bzw. spektral hochaufgelöstes Datenmaterial. In diesem zweiten Teil der Artikelserie geht es um die Erforschung unterschiedlich schneller Sonnenwindströme und solarer Eruptionen, um die Heizungs- und Beschleunigungsprozesse in der Sonnenkorona als auch um die Entstehung solarer Magnetfelder in Dynamoprozessen. Ausführlicher werden die Parker Solar Probe Mission und deren erste Erkenntnisse nach zwei Jahren auf dem Weg zur Sonnenkorona vorgestellt. Mit Hilfe beider Missionen lassen sich zukünftig die physikalischen Prozesse besser verstehen, die das Weltraumwetter in der Heliosphäre unseres Sonnensystems bestimmen.

Der erste Teil dieses Beitrages erschien in (ASTRONOMIE + RAUMFAHRT im Unterricht, 6/2019, S. 43–50)

Die mit dem Quadrat des Abstands von der Sonne rasch abnehmende Gravitationskraft bleibt noch bis zu mehr als 100.000 Astronomische Einheiten (AE) Entfernung von ihr wirksam. 1 AE \approx 150 Millionen km bezeichnet dabei den mittleren Abstand der Erde von der Sonne. Diese gravitative äußere Grenze unseres Sonnensystems liegt damit in der sogenannten Oort'schen Wolke, einer hypothetischen, vermutlich kugelschalenförmigen Ansammlung insbesondere auch kometenartiger astronomischer Objekte als äußerster Hülle unseres Sonnensystems. Wie in Teil 1 dieser Artikelserie ausführlicher beschrieben, bestimmt dagegen das Magnetfeld sowie das als magnetisierter

Sonnenwind von der Sonne ausströmende Plasma die Ausdehnung und Form der blasenartigen Heliosphäre des Sonnensystems. Diese ist mit dünnem Plasma, wenigen energiereichen Teilchen, Staub, Planeten, Monden, Kleinplaneten, Asteroiden und sehr vielen, noch kleineren Himmelsobjekten gefüllt. Vor allem unter dem Einfluss der komplex strukturierten und im solaren Aktivitätszyklus stark variierenden dynamischen Sonnenwindströme, aber auch der von außen eindringenden galaktischen kosmischen Strahlung spielt sich in der Heliosphäre das Weltraumwetter ab. Dieses charakterisiert und beschreibt die Auswirkungen von Ereignissen auf der Sonne im interplanetaren Raum, auf die unterschiedlichen planetaren Magnet- und Ionosphären unseres Sonnensystems, insbesondere auch auf die Erde und ihre Umgebung,

also auf die Ökosphäre und Anthroposphäre, d.h. der Einflussphasen von Leben und Menschen.

Zur Erforschung langsamer und schneller Sonnenwindströme ([11]–[15])

Im ersten Teil dieser Artikelserie wurden die unterschiedlichen Formen solarer Eruptionen und turbulenter Sonnenwindströme, der durch diese erzeugten magnetischen Stürme in der Erdmagnetosphäre sowie deren Einflussnahme auf und möglicherweise bedrohliche Folgen für die menschliche Gesellschaft vorgestellt. Eingehend wurden danach die vielfältigen Aufgabenbereiche der wichtigsten heliosphärischen Satellitenmissionen beschrieben, welche die Sonne, deren unterschiedliche Atmosphärenschichten, die überraschend stark aufgeheizte Korona, den intensiv beschleunigten Sonnenwind, die Magnetosphären der verschiedenen Planeten, insbesondere auch die der Erde, bis zum Ende des Jahres 2019 beobachtet und erforscht haben. Ulysses (Bild 4c) war eine Sonde der ESA und NASA, die auf ihrem Orbit fast senkrecht zur Ekliptik zwischen 1,5 und 5,4 AE Abstand erstmals den Sonnenwind auch über den Polbereichen der Sonne vermessen konnte. Danach strömt der schnelle, relativ dünne Sonnenwind zeitlich nahe dem solaren Aktivitätsminimum aus polnahen koronalen Löchern entlang offener trichterförmiger magnetischer Feldlinien in den interplanetaren Raum hinaus. Der langsame, dichtere Sonnenwind entsteht demgegenüber in den äquatornahen Gebieten an den Rändern geschlossener Magnetfeldstrukturen, entweicht aber auch zwi-

schen den sich an der Spitze öffnenden wimpelartigen koronalen Magnetfeldern (Bild 5a).



Bilder vom Sonnenrand enthüllen die Ursprünge des Sonnenwinds; <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2016/images-from-sun-s-edge-reveal-origins-of-solar-wind>

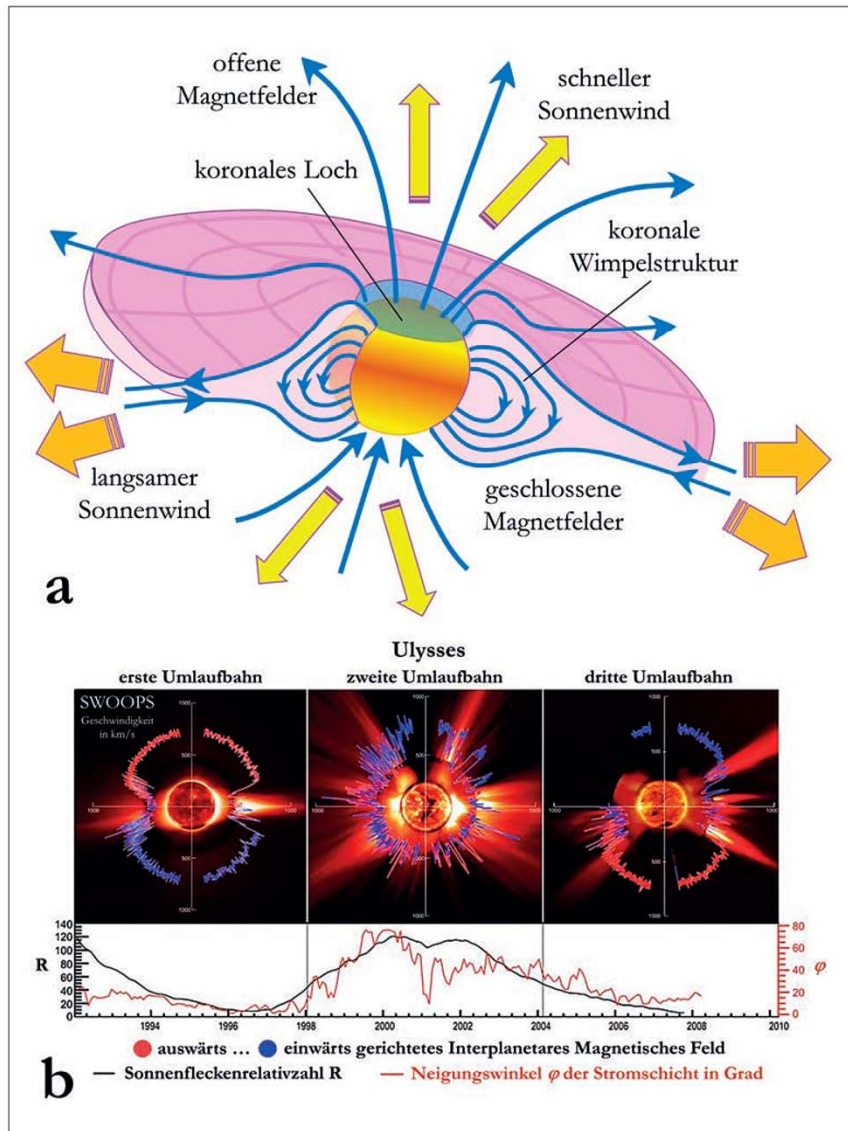


Das Ulysses-Erbe: 17 Jahre lang die Sonne beobachten; https://www.youtube.com/watch?v=74EH_XIPWCI



Ulysses: Video-Pressmitteilung; https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/1994/09/Ulysses_Video_News_Release

Anhand der mit dem SWOOPS-Instrument (Solar Wind Observations Over the Poles of the Sun) an Bord von Ulysses von 1992 bis 2008 auf drei Umläufen um die Sonne gewonnenen Daten lassen sich die typischen unterschiedlichen Geschwindigkeiten der langsamen und schnellen Sonnenwindströme während zweier solarer Aktivitätsminima und dem dazwischenliegenden Aktivitätsmaximum in Abhängigkeit von der heliographischen Breite ablesen (Bild 5b). In den Aktivitätsminima zeigt sich eine relativ einfache Geschwindigkeitsverteilung, die durch kleine (große) Geschwindigkeit um etwa 350 km/s (700 km/s) in niedrigen (höheren) heliographischen Breiten gekennzeichnet ist. Beim zweiten Umlauf der Ulysses-Sonde während eines Sonnenfleckenmaximums erweist sich die Geschwindigkeitsverteilung demgegenüber als räumlich besonders variabel. In Bild 5b



5 Entstehungsgebiete und Geschwindigkeiten der unterschiedlichen Sonnenwindströme: Verschiedenartige Entstehungsgebiete und zugrundeliegende Magnetfeldkonfigurationen langsamer und schneller Sonnenwindströme in Zeiten des solaren Aktivitätsminimums (Bild 5a). Darstellung der mit dem SWOOPS (Solar Wind Observations Over the Poles of the Sun) -Instrument an Bord von Ulysses von 1992 bis 2008 gewonnenen Daten über den Betrag der Geschwindigkeiten des aus unterschiedlichen (äquatorialen bis polaren) Sonnenregionen ausströmenden Sonnenwinds (Bild 5b) (U. v. Kusserow, D. J. McComas et al.)

ist die unterschiedliche Ausrichtung des in situ registrierten Magnetfeldes im Sonnenwind durch rote bzw. blaue Farbgebung der Geschwindigkeitsprofile gekennzeichnet, die sich ebenso wie die Neigungswinkel der dazwischen sich ausbildenden elektrischen Stromschichten relativ zum Äquator im Verlaufe des etwa 11-jährigen solaren magnetischen Aktivitätszyklus in charakteristischer Weise ändern.

Die Erforschung und zuverlässige Prognose des Weltraumwetters ist für die menschliche Gesellschaft im heutigen Raumfahrt-Zeitalter und weltweit zunehmender Technisierung von herausragender Bedeutung. Da der Einfluss des Sonnenwinds auf das Weltraumwetter entscheidend ist, haben die weltweit führenden Raumagenturen NASA und ESA mit Parker Solar Probe (PSP) bzw. Solar Orbiter

(SO) vor kurzem zwei leistungsfähige Sonnensatelliten gestartet, die die Entstehung, Ausbreitung und Dynamik des noch „jungen“ Sonnenwindes besonders nahe an der Sonne sowie die solaren Eruptionen wie Flares und Koronale Masseauswürfe mit in-situ-Messinstrumenten und durch Fernbeobachtungen mit Hilfe von Teleskopen im Detail studieren können. Neben den beiden großen Zielen der Gewinnung tiefgehender Erkenntnisse über Entstehungsursachen und Beschleunigungsprozesse der Sonnenwindströme und eruptiver Sonnenstürme sowie ihrer Einflussnahme auf das Weltraumwetter, stellt die Erklärung der Erzeugung der solaren Magnetfelder in Dynamoprosessen heute immer noch den „heiligen Gral“ der Sonnenforschung dar.

Alle hochenergetischen Vorgänge, die in den elektrisch leitfähigen Plasmen des Sonneninneren, der solaren Atmosphärenschichten bis hinaus in der äußeren Sonnenkorona und der sie weiträumig umhüllenden Heliosphäre unseres Sonnensystems ablaufen, werden bekanntlich entscheidend durch magnetische Prozesse beeinflusst, ausgelöst, gelenkt und dynamisch moderiert. Insbesondere mit Hilfe von Solar Orbiter könnte es in Zukunft gelingen, sogar alle drei obigen hehren Ziele zu erreichen, da der Flug dieser Raumsonde um die Sonne im Laufe der Zeit auf einem Orbit zunehmend schräger zur Ekliptik, der Umlaufebene der Erde um die Sonne, verlaufen wird. Anders als die PSP-Sonde, die den Sonnenwind vor allem mit hochauflösenden in-situ Messgeräten erforscht, wird Solar Orbiter auf seinen speziellen Orbits, später auch außerhalb der Ekliptik, aus größerer Entfernung zusätzlich mit leistungsfähigen Teleskopen auch die in der Regel eher äquatornahen Sonneneruptionen optisch bei ganz unterschiedlichen Wellenlängen beobachten und vermessen. Auf diese Weise werden die Sonnenphysiker in einigen wenigen Jahren erstmals auch die polnahen Magnetfeldstrukturen auf der Sonne direkt beobachten und analysieren können. Erste verlässliche Erkenntnisse über deren Eigenschaften und Entwicklung werden es den Wissenschaftlern in Zukunft ermöglichen, die Wirkungsweise des Sonnendynamos zur Erzeugung der solaren Magnetfelder noch besser zu verstehen.

Sonneneruptionen und die Erzeugung solarer Magnetfelder in Dynamoprosessen ([15]–[18])

Überall dort, wo in der Sonnenatmosphäre, in planetaren Magnetosphären, manchmal sogar auch in stärker verdichteten Sonnenwindströmen, die Magnetfeldstrukturen mit relativ zueinander entgegengesetzt orientierten Feldkomponenten aufeinandertreffen, innerhalb derer die Plasmamaterie zudem eine endliche Resistivität besitzt, also nicht besonders gut elektrisch leitfähig ist, treten sogenannte magnetische Rekonnexionsprozesse auf. Innerhalb der schmalen Kontaktbereiche derartiger, gegenläufiger Magnetfelder bilden sich nach den bekannten Gesetzen der Magnetohydrodynamik elektrische Stromschichten aus. Aufgrund des in ihnen bestehenden elektrischen Widerstands verhalten sich die Feldstrukturen dann nicht mehr wie „eingefroren“ in die Materie, wie es bei nahezu unendlicher elektrischer Leitfähigkeit idealisiert der Fall wäre. Interpretiert in einem anschaulichen Modellbild können die unterschiedlich orientierten Feldstrukturen stattdessen durch die Stromschichten diffundieren, treffen hier im Innern zusammen, reißen dabei auseinander, löschen sich lokal begrenzt gegenseitig aus und verschmelzen anschließend („Rekonnexion“) unter Ausbildung einer veränderten Magnetfeldtopologie neu miteinander.

Die in komplex strukturierten solaren Magnetfeldern über längere Zeiträume angesammelte und gespeicherte magnetische Energie kann dabei relativ plötzlich auf unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen mehr oder weniger explosiv in sogenannten Flare-Prozessen freigesetzt werden. Bei der Rekonnexion neu erzeugte und schnell wieder abgebaute magnetische Spannungen bewirken auch die Beschleunigung hochenergetischer Partikel sowie größerer Plasmamaterieballen, die Aufheizung der umgebenden Materie sowie die fackelartige Aussendung („Flare“) vor allem hochenergetischer elektromagnetischer Strahlung. **Bild 6a** veranschaulicht im linken Teil eine mögliche Entstehung solarer Flares, wenn eine neu aus dem Sonneninneren aufsteigende magnetische Feldstruktur (grün markiert) in Wechselwirkung tritt mit den zu ihr unterschiedlich orientierten magnetischen

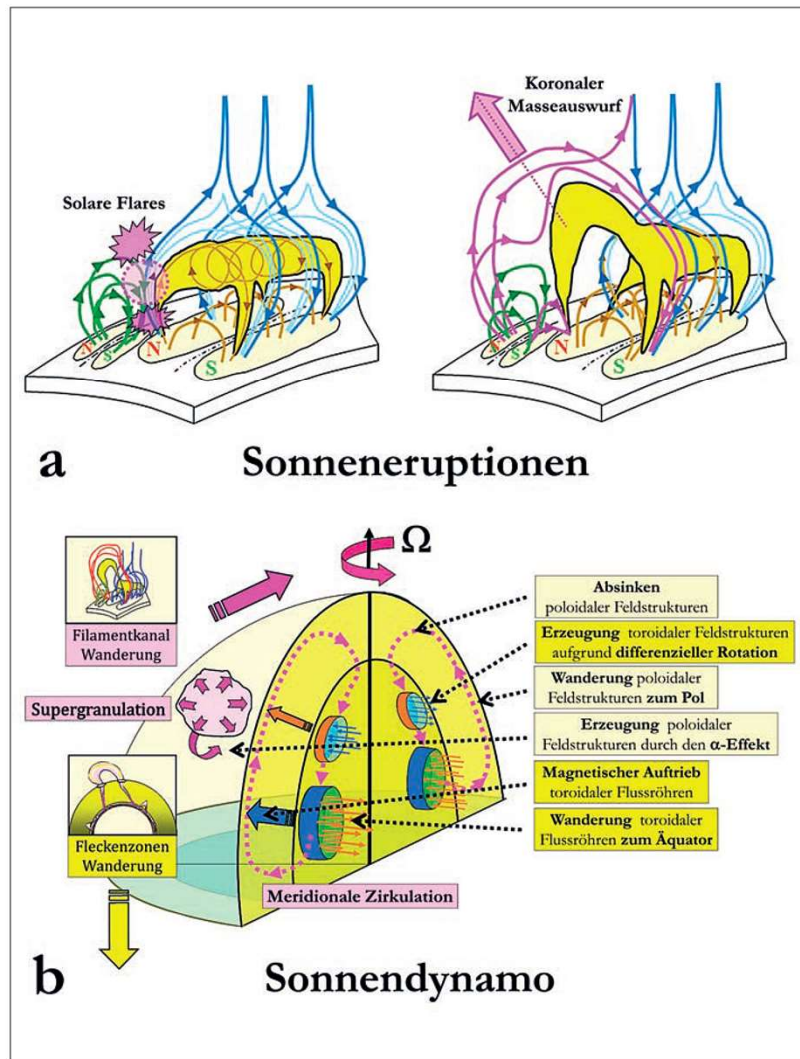
Feldkomponenten einer (ursprünglich über längere Zeiträume stabil gelagerten, als Heckenprotuberanz bezeichneten) riesigen magnetisch gestützten Plasmawolke. Rekonnexions-Prozesse sorgen dann nicht nur für ein blitzartiges Freisetzen magnetischer Energie und die nicht-thermische Erzeugung hochenergetischer Teilchen. Der rechte Teil von Bild 6a soll illustrieren, wie Teile der Heckenprotuberanz durch Freisetzung magnetischer Spannungen instabil werden, und dass eine dadurch ausgelöste solare Eruption sogar einen gewaltigen Koronalen Masseauswurf hinaus in die Heliosphäre bewirken kann, wenn nicht darüberliegende starke magnetische Felder dies noch verhindern.

Solare Magnetfelder vermitteln die Aufheizung der Sonnenkorona und die Beschleunigung sowohl der langsamen als auch der schnellen Sonnenwindströme. Sie bestimmen die meisten der in den unterschiedlichen Schichten der Sonnenatmosphäre ständig ablaufenden dynamischen Prozesse entscheidend mit. Sie bewirken die Ausbildung der dunklen Sonnenflecken und der magnetisch gestützten Protuberanzen, die Entwicklung explosiver Flare-Prozesse, solarer Eruptionen und Koronaler Masseauswürfe. All diese Felder entstehen und verstärken sich in der Konvektionszone, der turbulent verwirbelten, räumlich sowie zeitlich variierend mit unterschiedlichen Winkelgeschwindigkeiten differenziell rotierenden äußeren Kugelschale der Sonne, die von der Sonnenoberfläche bis etwa 200 000 km tief ins Sonneninnere hineinreicht. Im Rahmen eines sogenannten Flusstransport-Dynamomodells lässt sich anhand von Bild 6b pauschal recht gut erklären, weshalb sich die globalen und in solaren Aktivitätsgebieten dominierenden Magnetfelder im Verlaufe des im Durchschnitt etwa 11-jährigen magnetischen Aktivitätszyklus der Sonne periodisch immer wieder umpolen, und warum die Fleckenzonen im Verlaufe dieses 11-jährigen Fleckenzzyklus von mittleren heliographischen Breiten äquatorwärts, die sogenannten Filamentkanäle, oberhalb derer sich immer wieder großräumige Heckenprotuberanzen ausbilden, demgegenüber polwärts wandern. Verantwortlich gemacht wird dafür insbesondere die sogenannte Meridionale Zirkulation, deren Existenz und typi-

sche Eigenschaften erst kürzlich im Jahre 2020 durch umfangreiche helioseismologische Langzeituntersuchungen verlässlich verifiziert wurden.

Dieses solare Förderband transportiert die häufig in Form supergranularer Zellen organisierte Plasmamaterie sowie die Filamentkanäle mit den in sie eingelagerten „poloidalen“ (radialen und tangentialen) Magnetfeldkomponenten im Bereich der Sonnenoberfläche mit typischen Geschwindigkeiten von etwa 20 m/s polwärts. In hohen heliographischen Breiten sinken die poloidalen Feldstrukturen in die sogenannte Tachocline-Zone am Boden der Konvektionszone ab. Die dort anzutreffenden Strömungsmuster der differentiellen Rotation wandeln die poloidalen Magnetfelder in sogenannte „toroidale“ (azimutale) Feldstrukturen um. Am Boden der Konvektionszone transportiert das meridionale Förderband diese torusförmig, im Kreis verlaufenden Felder in dem im Vergleich zur Oberfläche verdichteten Plasma, aktuell nachgewiesen mit typischen Geschwindigkeiten von nur noch 4 m/s äquatorwärts. Magnetischer Auftrieb ausreichend starker Magnetfelder bewirkt danach den Seeschlangen *ähnlichen* Aufstieg und den typischerweise etwa 30 Tagen danach erfolgenden Durchstoß toroidaler Flussröhren durch die Sonnenoberfläche. Deren große magnetische Flussdichten behindern lokal den Aufstieg heißer Plasmamaterie, so dass sich hier die bipolaren Gruppen dunkler Flecken ausbilden. Die differentielle Rotation im Bereich der Sonnenoberfläche sorgt dann dafür, dass sich großräumige Magnetfeldstrukturen verscheren, kühlere Plasmaballen in ihnen einlagern, und sich so neue Protuberanzen ausbilden können, die dann wieder polwärts wandern.

Die regelmäßig erfolgende Umpolung der Polaritäten der solaren Magnetfelder lässt sich damit erklären, dass nach 11 Jahren verstärkt magnetischer Fluss der jeweils anderen Polarität polwärts transportiert wird. Bevorzugt wird dadurch der magnetische Fluss des nachfolgenden Fleckenbereichs polwärts transportiert und wandelt so die Polaritäten im Polbereich der Sonne alle 11 Jahre um. Um diesen komplexen Dynamoprozess wirklich ganz zu verstehen, ist es unbedingt erforderlich, die Entwicklung der poloidalen Feldstrukturen an den Polen der Sonne direkt zu



6 Modellvorstellungen zur Erzeugung von Sonneneruptionen, zur Wirkungsweise solarer Dynamoprozesse: Durch Rekonnexion, der Verschmelzung und Neuverbindung magnetischer Feldstrukturen, werden bei solaren Flares große Mengen an magnetischer Energie freigesetzt (6a, links). Als Protuberanzen bezeichnete solare Gaswolken können dadurch instabil werden und in Form gewaltiger Koronarer Masseauswürfe (CME) in den heliosphärischen Raum hinausgeschleudert werden (6a, rechts). Solare Magnetfelder werden auf unterschiedlichen Größen- und Zeitskalen in Dynamoprozessen erzeugt. Magnetische Induktionsprozesse sorgen dafür, dass sich diese Felder periodisch im Verlauf des im Durchschnitt etwa 11-jährigen solaren magnetischen Aktivitätszyklus umpolen (6b) (U. v. Kusserow)

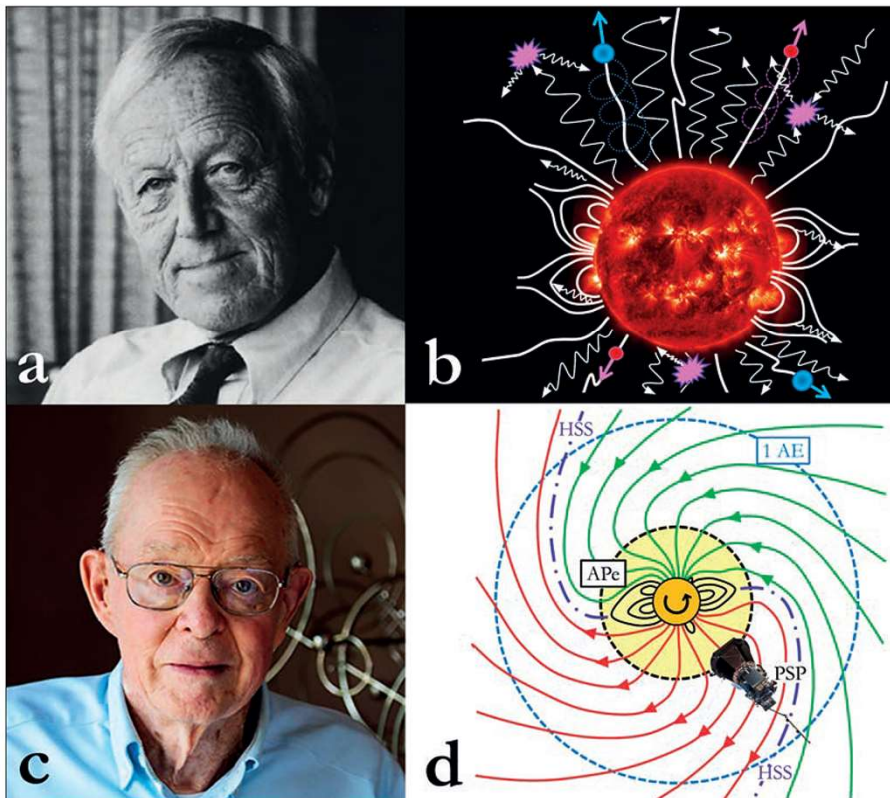
beobachten und zu verfolgen. Die Stärke dieser poloidalen Feldstrukturen bestimmt schließlich die Stärke des nachfolgenden Sonnenfleckenzyklus. Solar Orbiter wird in einigen Jahren durch die erstmalige Beobachtung des polnahen Magnetfelds neue entscheidende Erkenntnisse liefern.



Film: Unterschied zwischen Flares und Koronaren Masseauswürfen (CME); <https://www.nasa.gov/content/goddard/the-difference-between-flares-and-cmes>



Visualisierung: Sonnendynamo angeregt durch fließendes Plasma; <https://svs.gsfc.nasa.gov/3496>



7 Alfvén-Wellen und die Parker-Spirale: Hannes Alfvén, der 1972 den Physik-Nobelpreis für seine Entdeckungen und grundlegenden Leistungen in der Magnetohydrodynamik und Plasmaphysik erhielt (a). Abbildung der Sonnenkorona im ultravioletten Licht, die von Bord Solar Dynamics Observatory der Nasa erstellt wurde. Schematisch eingezeichnet sind darin u. a. Alfvén-Wellen (AW), deren Wechselwirkungsprozesse entscheidend zur Aufheizung der durch offene () und geschlossene () solare Magnetfelder strukturierten Sonnenkorona sowie zur Beschleunigung der Teilchen, der geladenen Elektronen () und Ionen () im Sonnenwind beitragen (b). Für seine Pionierarbeiten zur Modellierung des Sonnenwindes erhielt der 1927 geborene Eugene N. Parker 2020 den Crafoord Prize in Astronomie (c). Schematische Darstellung der Parker-Spirale, die sich außerhalb der gelb eingefärbten Sonnenkorona ausbildet, deren äußerer Bereich in wenigen Jahren von der Sondenonde Parker Solar Probe (PSP) der NASA durchflogen und erforscht wird. (d). (KTH/University of California, NASA/GSFC/U. v. Kusserow, John Zich/Univ. of Chicago, U. v. Kusserow/NASA)

Alfvén-Wellen und die Heizung der Sonnenkorona, der Sonnenwind und die Parker-Spirale ([19]–[22])

Vor rund 50 Jahren erforschten die beiden deutsch-amerikanischen *Helios* Sonden (Bild 4a) zwar bereits den Sonnenwind in der inneren Heliosphäre vor Ort bis zu einer Entfernung von etwa 0,3 AE von der Sonne. Von dort aus konnten diese Sonnensonden nur mit ihren in-situ-Messungen allerdings noch nicht die Entstehung, Heizung und effektive Beschleunigung des „jungen“ Sonnenwindes bis in die äußere Korona der Sonne verfolgen. In diesem Zusammenhang stellten sich natürlich die Fragen, bis wohin die magnetisch strukturierte Sonnenkorona eigentlich definitionsgemäß reicht, von wo ab der dünne, nahezu kollisionsfreie und vom Magnetfeld durchdrungene Sonnenwind weitgehend radial gerichtet ist, d. h. etwa strahlenförmig von der Sonne im Zentrum in den interplanetaren Raum abströmt, und wo genau und in welcher Weise er beschleunigt wird.

Mit der Sonnenkorona bezeichnen Laien und selbst begeisterte Amateu-

rastronomen meist nur den sichtbaren leuchtenden Kranz, den sie auf Aufnahmen bzw. selbst bei der Beobachtung einer Sonnenfinsternis oberhalb der vom Mond verdunkelten Sonnenoberfläche erblicken können. Dieser Sonnenkranz reicht in der Regel aber höchstens bis zu einigen Sonnenradien über die Sonne hinaus und entsteht dadurch, dass das von der Sonnenphotosphäre ausgesandte weiße Licht an den Elektronen in der Korona gestreut wird, welche dadurch für das Auge des Beobachters sichtbar wird. Bei dieser elastischen, nach seinem Entdecker benannten Thomson-Streuung findet kein Energieübertrag vom Photon auf das Elektron statt. Diese Art der Streuung tritt nur auf, solange die Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung ausreichend groß ist im Vergleich zur Abmessung der von ihr „getroffenen“ Teilchen.

Unter der Korona der Sonne verstehen Wissenschaftler, aber auch gut informierte Laien, allerdings definitionsgemäß den gesamten über 1 Million Kelvin heißen äußeren, ausgedehnten Atmosphärenbereich der Sonne, der sich deutlich oberhalb der Photosphä-

re, der Chromosphäre sowie der darüberliegenden so bezeichneten Transit-Region befindet. In dieser schmalen Übergangsregion nimmt die Materiedichte auf kurzen Längenabmessungen plötzlich stark ab, steigen die voneinander abweichenden Temperaturen unterschiedlicher Teilchenspezies sowie die, hier im wesentlich durch die freie Beweglichkeit der Elektronen, bestimmte Wärmeleitfähigkeit des Plasmas steil an. Dass die Sonne mit der Korona eine so heiße äußerste Atmosphärenschicht besitzt, die überraschenderweise mehr als 180 Mal so heiß ist wie die im sichtbaren Licht die Sonnenoberfläche kennzeichnende Photosphäre, erkannte 1941 der schwedischer Astrophysiker *Bengt Edlén* (1906–1993) mit Hilfe intensiver spektroskopischer Untersuchungen. Die Entdeckung von Emissionslinien, die hoch ionisiertem Eisen, Nickel und Kalzium zugeordnet werden konnten, sowie die aufgrund des starken Dopplereffektes auftretenden großen Breiten dieser Spektrallinien waren eindeutige Indizien für sehr hohe koronale Temperaturen. Dieser neue Sachverhalt wurde bereits damals intensiv erörtert: wie

lässt sich eine so hohe Aufheizung der Sonnenkorona überhaupt erklären, und wie weit reicht sie eigentlich in den interplanetaren Raum hinaus?

Seit nunmehr fast 80 Jahren bemühen sich die Heliosphysiker intensiv um ein tieferes Verständnis der relevanten physikalischen Prozesse, die für die so starke Aufheizung der Sonnenkorona verantwortlich sein könnten. „Warum ist es dort so heiß“ erweist sich dabei in Wirklichkeit als eine etwas zu einfache Frage. Anders als in der Erdatmosphäre oder auch in der tieferliegenden Photosphäre der Sonne herrscht in der extrem dünnen Sonnenkorona nämlich kein thermodynamisches Gleichgewicht. Die Elektronen, Protonen, Alpha-Teilchen und seltenen Ionen schwererer Elemente stoßen nur wenig aneinander und bewegen sich deshalb relativ unabhängig voneinander. Das hat sehr unterschiedliche Geschwindigkeiten zur Folge, deren Häufigkeitsverteilungen nicht unbedingt symmetrisch, isotrop oder glockenförmig wie bei der sogenannten Gaußverteilung verlaufen. Der uns Menschen gewohnte Temperaturbegriff verliert dadurch in der äußeren Sonnenatmosphäre seine klare Bedeutung. Wenn die Sonnenphysiker von der heißen Korona sprechen, dann drücken sie damit eigentlich nur aus, dass die Teilchen sich dort überraschenderweise auch mit besonders hohen, nichtthermischen Geschwindigkeiten bewegen. Die Klärung des Korona-Heizungsproblems erfordert also eher die Beantwortung der Frage, durch welche physikalischen Prozesse die dort anzutreffenden Teilchen so stark beschleunigt werden können.

Es sind die in Dynamoprozessen im Sonneninneren, auf wesentlich kleineren Längenskalen sehr wahrscheinlich auch in Oberflächenbereichen der Sonne erzeugten magnetischen Felder, die die Struktur- und Dynamik der Plasmazustände in allen Atmosphärenschichten der Sonne entscheidend bestimmen. Dies gilt sowohl für die im Verlauf des Sonnenfleckenzyklus zunehmend näher zum Äquator gelegenen Aktivitätsgebiete mit ihren eher geschlossenen magnetischen Feldstrukturen als auch für die polnahen Gebiete mit ihren offenen, in den interplanetaren Raum hinausreichenden Feldstrukturen (**Bild 7b**). In den tiefen Atmosphärenschichten der Sonne sind es zum Beispiel explosive Rekonnexionsprozesse, die auf ganz unterschiedlichen Größen- und Zeitskalen in kleinen verwirbelten oder großen organisierten Magnetfeldstrukturen für die starke Beschleunigung einzelner Teilchen oder größerer Plasmawolken sorgen und damit zumindest lokal oder auch großräumig die Aufheizung der Materie verursachen.

nexionsprozesse, die auf ganz unterschiedlichen Größen- und Zeitskalen in kleinen verwirbelten oder großen organisierten Magnetfeldstrukturen für die starke Beschleunigung einzelner Teilchen oder größerer Plasmawolken sorgen und damit zumindest lokal oder auch großräumig die Aufheizung der Materie verursachen.



Alfvén-Wellen-Bewegung;
<https://www.youtube.com/watch?v=DKKydwERFE>



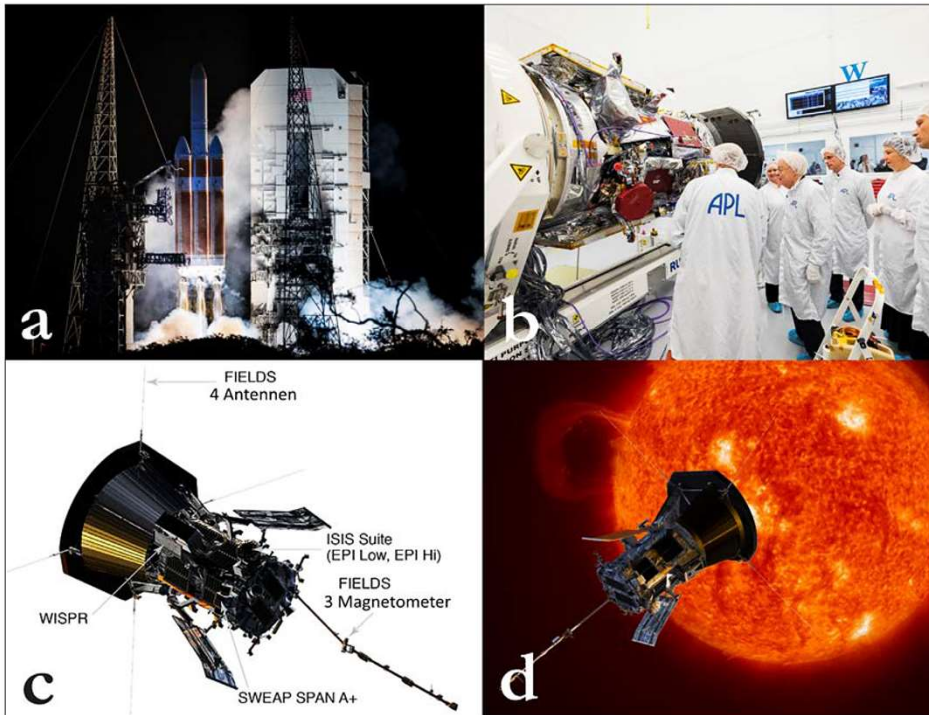
Wissenschaftler ahmen den spiralförmigen Sonnenwind in einem Labor nach; <https://www.youtube.com/watch?v=codkYGXlnZI>

Zu jedem Zeitpunkt existieren auf der Sonne nahezu hunderttausend eruptive Spikulen dieser manchmal mehr als 10.000 km langen, röhrenartigen, magnetisch gestützten und mehrere Millionen Grad heißen Plasmastrukturen, die auf typischen Zeitskalen von etwa fünf Minuten zur Aufheizung der Chromosphäre der Sonne beitragen können. 1987 schlug der heute 93 Jahre alte Eugene Newman Parker (**Bild 7c**) vor, dass auch die Sonnenkorona durch unzählige winzige sogenannte „Nanoflares“ erwärmt werden könnte. Konvektive Gasbewegungen an der brodelnden Sonnenoberfläche sorgen dafür, dass die aus dem Sonneninneren infolge magnetischen Auftriebs immer wieder aufsteigenden Magnetfelder miteinander komplex verflochten werden, wobei sie beträchtliche Energien freisetzen und dabei das Fließen von elektrischen Strömen induzieren, die die Aufheizung der Plasmamaterie ermöglichen könnten. Auch wenn die Relevanz dieser Nanoflare-Prozesse für die Koronaheizung heute von einigen Wissenschaftlern in Frage gestellt wird, so werden doch magnetische Rekonnexionsprozesse zumindest für die Aufheizung und das Aufleuchten großer koronaler magnetischer Bögen und deren

chromosphärischer Fußpunkte verantwortlich gemacht.

Auch wenn die jeweilige Relevanz der für die Aufheizung der Sonnenkorona infrage kommenden unterschiedlichen physikalischen Prozesse heute noch nicht endgültig geklärt ist, so ist auf jeden Fall durch Beobachtungen gesichert, dass der dynamische Magnetismus der Sonne mehr als ausreichend viel Energie zur Verfügung stellt, um die Aufheizung ihrer äußeren Atmosphärenschichten zu gewährleisten. Durch die aus ihrem Inneren stetig aufsteigenden Magnetfelder sendet die Sonne, periodisch im Rhythmus von etwa fünf Minuten oszillierend, auch immer wieder Schallwellen mit weit mehr als der erforderlichen Energie hinauf in die Chromosphäre. Zu zeigen, dass darüber hinaus Wellenmoden entscheidend durch das Magnetfeld bestimmt werden können, ist einer der großen Verdienste des schwedischen Physikers Hannes Alfvén (1908–1995) (**Bild 7a**). Er erhielt 1972 den Physik-Nobelpreis für seine grundlegenden Leistungen in der Magnetohydrodynamik und Plasmaphysik, u. a. insbesondere für die Entdeckung des heute nach ihm benannten Wellentyps. Diese niederfrequenten Alfvén-Wellen stellen eine der möglichen Arten magnetohydrodynamischer Wellen dar, bei der ausgelenkte Ionen als Reaktion auf die Rückstellkraft schwingen, die durch die magnetische Spannung innerhalb der Feldlinien erzeugt wird. Sie breiten sich in magnetisierten Plasmen mit der von der magnetischen Flussdichte \vec{B} und der Materiedichte ρ abhängenden Alfvén-Geschwindigkeit $\vec{v}_A = \vec{B} / \sqrt{(\mu_0 \cdot \rho)}$ (μ_0 magnetische Feldkonstante) aus. Dieser Wellentyp kann daran erkannt werden, dass die gemessenen Fluktuationen der jeweiligen Komponenten der Geschwindigkeits- und der Magnetfeldvektoren zeitlich eng miteinander korreliert sind.

Neben den linearen Alfvén-Wellen, die in der Sonnenatmosphäre auch in Form von Scherungs- bzw. Torsionswellen auftreten, gibt es noch die kompressiblen langsamen und schnellen magnetosonischen Wellen. Bei diesen teilweise rein longitudinalen Wellen wirkt neben der magnetischen Spannung zusätzlich auch der Gradient des thermischen Gasdrucks als Rückstellkraft. Auch sogenannte nichtlineare Alfvén-Wellen, deren Amplituden nach außen wegen der zunehmend dünner werdenden Son-



8 Parker Solar Probe (PSP) erforscht den Sonnenwind in der äußeren Sonnenkorona: Am 12. August 2018 startete die PSP-Raumsonde der NASA mit der besonders leistungsstarken Delta IV Heavy/ Star-48BV-Rakete von Cape Canaveral ihren Flug in die innere Heliosphäre. (a). Eugene N. Parker, nach dem diese Sonnensonde benannt wurde, begutachtete die Instrumente von PSP im Applied Physics Laboratory (APL) der Johns Hopkins University in Laurel (Maryland, USA) (b). Mit Hilfe von drei in-situ-Messinstrumentengruppen (FIELDS, ISIS, SWEAP) und einem Kamerasystem (WISPR) wird der magnetisierte Sonnenwind in der äußeren Heliosphäre der Sonne erforscht (c). Die Animation zeigt ein Bild der Raumsonde vor einer Aufnahme der dynamisch aktiven Sonne im ultravioletten Licht (d) (NASA/Johns Hopkins APL/Ed Whitman, NASA/Johns Hopkins APL/Ed Whitman, NASA/JPL, NASA/Johns Hopkins APL/Steve Gribben)

nenkorona anwachsen, werden dort angeregt und können gedämpft und reflektiert werden oder durch Zerfall Tochterwellen ausbilden, die die Korona in alle möglichen Richtungen durchlaufen, miteinander kollidieren, Turbulenz erzeugen, dissipieren und ihre Energie auf die negativ geladenen Elektronen (e^-) und positiven Ionen (i^+) übertragen. Viele Sonnenphysiker gehen heute davon aus, dass die Heizung der offenen äußeren Korona im Wesentlichen durch Alfvén-Wellen erfolgt (**Bild 7b**), die in der Übergangszone auch durch magnetische Rekonnexionsprozesse angeregt werden können.

Als Sonnenkorona ließe sich danach formal die Zone der Sonnenatmosphäre festlegen, in der bevorzugt eine fortschreitende Heizung des Plasmas, insbesondere auch der schweren Ionen, auf mehr als eine Millionen Grad erfolgt. Dort, wo die Heizung der Korona vor allem durch Wechselwirkungsprozesse und Dissipation von Alfvén-Wellen nicht mehr effektiv genug erfolgt, würde dann in Abhängigkeit von der Stärke der Sonnenaktivität der äußere, zeitlich im Rhythmus des solaren Aktivitätszyklus variierende Rand der Korona anzutreffen sein. Eugene Parker konnte 1958 als erster anhand von Modell-

rechnungen zeigen, dass der Großteil der Korona durch die starke Gravitationskraft zwar noch an die Sonne gebunden bleibt, dass aber aufgrund der radial abnehmenden Gravitationskraft aus den äußersten Atmosphärenschichten überschallschnell und stetig ein von ihm erstmals als „Sonnenwind“ bezeichneter Teilchenstrom in den interstellaren Raum entweichen müsste.

Parker wurde erst kürzlich (im Jahr 2020) mit dem renommierten Crafoord-Prize in Astronomie für seine bahnbrechenden und grundlegenden Untersuchungen des Sonnenwinds, aber auch für die Erforschung der Magnetfelder auf stellaren und galaktischen Skalen ausgezeichnet. Er war es auch, der im Rahmen der Dynamotheorie (Bild 6b) die Erzeugung poloidaler Magnetfelder durch den sogenannten α -Effekt erklärte, der die Verdrehung aufsteigender toroidaler Felder durch Corioliskräfte in der rotierenden Sonne charakterisiert, sowie den magnetischen Auftrieb zur Erklärung der Sonnenfleckentstehung vorschlug. Weiterhin beschäftigte er sich mit der kosmischen Strahlung, deren Einfluss auf das Weltraumwetter, sehr wahrscheinlich auch auf das Erdklima, und er modellierte 1956 erstmals magnetische Rekonnexionsprozesse.

Bei 1 AE, also in etwa 210 Sonnenradien Entfernung von der Sonne, strömt der Sonnenwind bezogen auf die Sonne im Zentrum nahezu radial, geradlinig in alle Richtungen hinaus. Die Sonne rotiert jedoch zusammen mit ihren atmosphärischen magnetischen Feldstrukturen mit Umlaufperioden zwischen etwa 25 Tagen (am Äquator) und 35 Tagen (in den Polgebieten) differenziell. Daher werden die an die Magnetfelder gebundenen Plasmateilchen, die den Sonnenwind weiter außen speisen sollen, bis zu einem bestimmten Abstand (noch gefangen in dem bis dorthin relativ starr an die Sonne gekoppelten Magnetfeld der Korona) mit der Sonne umlaufen. In einer 1958 veröffentlichten theoretischen Arbeit über die „Dynamik des interplanetaren Gases und der Magnetfelder“ hatte Parker in diesem Zusammenhang vorhergesagt, dass sich das heliosphärische Magnetfeld aufgrund der Drehung der Sonne, beginnend in einer bestimmten Entfernung von ihr, dabei in Form einer archimedischen Spirale aufwickelt (**Bild 7d**). Im Umfeld der Ekliptik müssten dadurch elektrische Heliosphärische Stromschichten (HSS) zwischen den entgegengesetzt orientierten offenen Magnetfeldern entstehen, deren dreidimensionale Struktur

die Form eines „schwingenden Rocks einer Ballerina“ um die Sonne annehmen könnte. Bereits ein Jahr vorher hatte *Hannes Alfvén* die Form des heute als Parker-Spirale bezeichneten heliosphärischen Magnetfelds anhand der von ihm untersuchten leicht gewölbten Ausrichtungen von Kometenschweifvorhergesagt.

Solange die mittlere Strömungsgeschwindigkeit der in der Sonnenatmosphäre aufgeheizten und nach außen laufenden Teilchen noch wesentlich kleiner als die Alfvén-Geschwindigkeit ist, solange können reflektierte Alfvén-Wellen Störungssignale gegebenenfalls bis zurück zur Sonnenoberfläche transportieren. Es besteht dadurch weiterhin eine enge Welle-Teilchen-Kopplung und eine Verbindung der koronalen Heizungsprozesse mit der Sonnenoberfläche. Erst in Entfernungen von der Sonne, außerhalb der sogenannten Alfvén-Fläche (definiert durch die Alfvén-Punkte (APE) im Bild 7d), von wo ab die Strömungsgeschwindigkeiten der Teilchen die lokalen Alfvén-Geschwindigkeiten zunehmend übersteigen, geht die Kopplung der Alfvén-Wellen mit der Sonnenatmosphäre verloren. Jenseits der Alfvén-Punkte schreitet die Heizung zwar fort, schwächt sich aber wahrscheinlich ab. Hier befindet sich somit der äußere Rand der Sonnenkorona, der je nach Stärke der jeweiligen Sonnenaktivität im Verlaufe des Fleckenzyklus etwa zwischen 10 bis 15 Sonnenradien Entfernung von der Sonnenoberfläche liegt.

Jenseits dieser kritischen Punkte haben sich auch die Flussdichten der heliosphärischen Magnetfelder soweit verringert, dass der magnetische Druck zunehmend kleiner wird als der von den abströmenden Teilchen aufgrund ihrer kinetischen Energien ausgeübte Staudruck. Hier endet sozusagen die aufgeheizte Sonnenkorona, hier beginnt der Sonnenwind, in dem einzelne Teilchen allerdings noch weiterhin beschleunigt werden können. „Eingefroren“ in die jetzt frei abströmenden Teilchen, bilden sich von hier ab die charakteristischen Magnetfeldstrukturen in Form der Parker-Spirale aus. All diese Prozesse lassen sich recht anschaulich vergleichen mit dem, was in einem rotierenden Kinderkarussell passiert. Solange die Kinder (die Teilchen) sich noch im Innern (in der Korona) eines rotierenden Karussells

(der rotierenden Sonne) befinden, so lange passiert nichts. Erst, wenn ein Kind plötzlich abspringt (ein Teilchen den Alfvén-Punkt überschreitet), fliegt es geradlinig radial, unter Umständen stürzend (im Sonnenwind) nach außen.

Parker Solar Probe erforscht den Sonnenwind in der äußeren Sonnenkorona ([23]–[25])

Schon 1958 gab es ein erstes Konzept der US-amerikanischen National Academy of Science (NAC), die die Erforschung der Teilchen sowie elektrischen und magnetischen Felder innerhalb des Merkur-Orbits in großer Nähe der Sonne mit Hilfe einer Sondenmission vorsah. Aber erst sechzig Jahre später am 12. August 2018 erfolgte der Raketentart der Parker Solar Probe (PSP) Mission der NASA (**Bild 8a**), die sich auf ihren insgesamt 24 Orbits der Sonne im Jahre 2024 bis auf 9,86 Sonnenradien nähern soll, dabei in großer Sonnennähe Geschwindigkeiten von bis zu 690.000 km/h erreichen könnte. Erstmals im Zeitalter der Raummissionen wurde diese Sondenmission zu Ehren eines noch lebenden Wissenschaftlers sehr berechtigt nach dem so verdienstvollen *Eugen N. Parker* benannt. Zum ersten Mal soll eine Sonde sogar auch durch die äußere Korona fliegen und dabei die dortigen Heizungsprozesse des Plasmas, die Beschleunigung der langsamen und schnellen Sonnenwindströme, den Einfluss solarer Eruptionen sowie die Verteilung von Staubpartikeln in der inneren Heliosphäre erforschen (**Bild 8d**).

Bild 8b zeigt *Eugene Parker* im März 2017 bei der Besichtigung der Instrumente (**Bild 8c**) der PSP-Sonde, deren Funktionsweisen und Aufgaben ihm u. a. von *Nicola Fox*, der Direktorin der Abteilung für Heliophysik der NASA in Washington, *Thomas Zurbuchen*, dem Administrator der wissenschaftliche Missionen der NASA sowie *Ralph Semmel*, dem Direktor des Johns Hopkins Applied Physics Laboratory (APL), erklärt werden. Die mit dem Namen FIELDS bezeichnete Gruppe von Instrumenten, mit Hilfe derer insbesondere die elektromagnetischen Felder im Sonnenwind untersucht werden, besteht aus verschiedenen Magnetometern und Plasmasensoren. Mit ihnen können sowohl magnetische und elektrische Felder als auch Plasmadichten und Temperaturen, Radiowel-

len sowie der Energiefluss elektromagnetischer Wellen gemessen werden. SWEAP (Solar Wind Electrons Alphas and Protons) zählt die Elektronen, Protonen und Heliumionen und misst deren jeweilige Geschwindigkeitsverteilungen mit zwei elektrostatischen Analysatoren sowie einer sogenannten Faraday Cup. ISOIS (Integrated Science Investigation of the Sun, ☉ steht als Symbol für die Sonne) vermisst mit zwei unabhängigen Instrumenten für energiereiche Teilchen (EPI-Hi und EPI-Lo) die Eigenschaften von Elektronen, Protonen und schwerer Ionen bei höheren bzw. niedrigeren Energien. Die beiden optischen Teleskope des Wide-field Imager for Solar Probe (WISPR) erstellen Bilder des Sonnenwindes in der inneren Heliosphäre, später auch in der äußeren Korona, und ermöglichen damit die Analyse der Staubverteilung in größerer Nähe zur Sonne. Mit Hilfe von HeliosPSP (Heliospheric Origins with Solar Probe Plus) werden Theorie- und Modelluntersuchungen durchgeführt, die eine Maximierung des wissenschaftlichen Ertrags der Solar Probe Mission ermöglichen sollen.



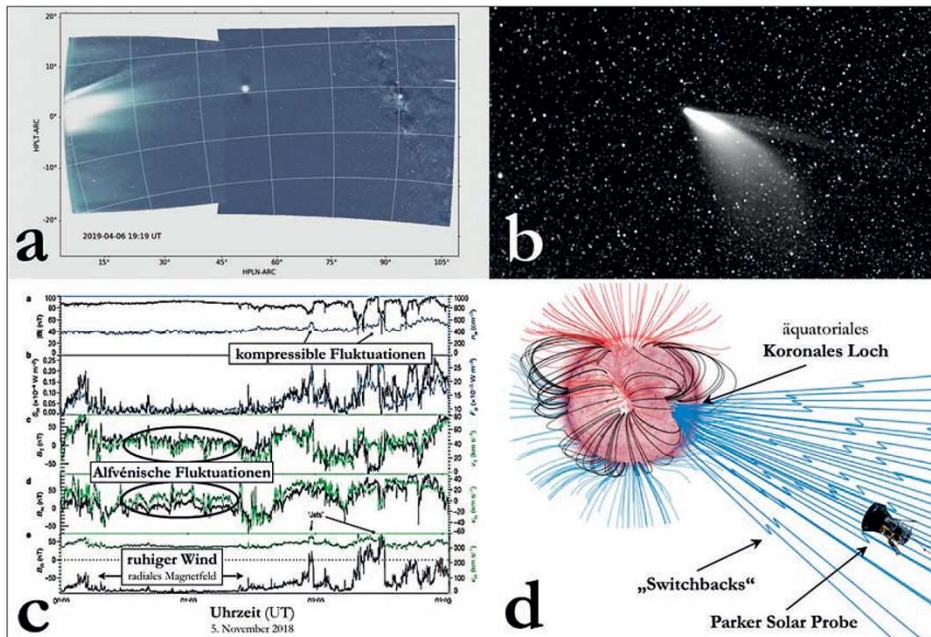
Die Parker Solar Probe Mission der NASA startet, um die Sonne zu beobachten; <https://www.youtube.com/watch?v=AlyuSwRSVHU>



NASA Parker Solar Probe Update: Ein Jahr später mit *Eugene Parker*; https://www.youtube.com/watch?v=agYB8E2AHOI&feature=emb_logo



Die Widmungstafel für *Eugene Newman Parker* an der PSO-Sonnensonde; https://www.youtube.com/watch?v=8bKk_yvmdGU&feature=emb_logo



9 Erste Ergebnisse der Parker Solar Probe Mission: Die zwei Teleskope von Parker Solar Probe blicken seitlich hinter dem Hitzeschild des Raumfahrzeugs hervor und beobachten die Strukturen, die sich in der Sonnenkorona und Heliosphäre entwickeln. (a). Die aufbereiteten Daten des WISPR-Instruments zeigen den breiten Staubschwanz sowie den langgestreckten, schmalen Ionenschwanz des Kometen NEOWISE am 5. Juli 2020 (b). Mit den FIELDS- und SWEAP-Instrumenten gewonnene Daten veranschaulichen die Entwicklung unterschiedlicher physikalischer Größen: Plasmadichte und Magnetfeldstärke, Energieflüsse, sowie die drei Komponenten von Geschwindigkeit und Magnetfeld im Sonnenwind. (c). Schematische Darstellung typischer „Switchback“-Strukturen des solaren Magnetfelds während des ersten Perihel Durchgangs von PSP, die im Umfeld eines äquatorialen Koronales Lochs entstanden sind (d). (NASA/JHUAPL/Naval Research Lab/Parker Solar Probe, NASA/Johns Hopkins APL/Naval Research Lab/Parker Solar Probe/Guillermo Stenborg, S. D.



Die Parker Solar probe Mission der NASA; <https://www.youtube.com/watch?v=XBudjihQKsw>

In der äußeren Sonnenkorona ist es in etwa zehn Sonnenradien Abstand von der Sonnenoberfläche durch die Strahlung der Sonne auf jeder exponierten Fläche (also auch auf PSP) noch extrem heiß, und es herrschen hier vor Ort Plasmatemperaturen von fast 1 Million Kelvin. Es ist daher unmöglich, von hier aus die Sonnenoberfläche mit Hilfe von Teleskopen direkt zu beobachten. Die drei Gruppen von Messapparaturen, die die Eigenschaften des an der Sonnensonde vorbeiströmenden Sonnenwindes in situ vermessen, mussten deshalb hinter einem besonders wirksamen Schutzschirm (Bild 7 c, d) installiert werden, hinter dem die Temperaturen in der Raumsonde maximal nur etwa 30°C betragen. Lediglich zwei Kameras blicken seitlich bzw. etwas schräg nach vorne am Schutzschild vorbei und können den Vorbeiflug der Sonnenwind- und Staubpartikel bildlich dokumentieren. Der hexagonal geformte schützende

Sonnenschirm der 1 m × 3 m × 2,3 m großen Sonnensonde PSP, der einen Durchmesser von 2,7 m und eine Dicke von 11,4 cm aufweist, wurde aus gut isolierendem Carbon-Verbundwerkstoff hergestellt und ist zusätzlich versehen mit einer weißen, reflektierenden Oberflächenschicht aus Aluminiumoxid.

Bei großer Annäherung an die Sonne werden die Photovoltaik-Sonnenpaddel zur Energieerzeugung für den Betrieb der Sonde hinter den Schutzschirm zurückgeklappt. Eine kleinere Photovoltaik-Anlage versorgt dann auch die Pumpen, die den Durchfluss einer Kühlflüssigkeit durch den Schild ermöglichen und so den Schutz des Betriebs der Instrumente gewährleisten. Von Lichtsensoren gesteuert, muss der Schutzschirm dabei stets exakt zur Sonne gerichtet sein. PSP ist wohl das autonomeste Raumschiff, das jemals geflogen wurde, denn im Bereich des Perihels, dem sonnennächsten Punkt seines jeweiligen Orbits, ist der Funkkontakt zur Erde für einige wenige Tage vollständig unterbrochen.

Jede Sonde, die von der mit durchschnittlicher Geschwindigkeit von 108.000 km/h um die Sonne kreisenden Erde startet, besitzt selbst nach der Beschleunigung durch eine Rakete und dem Erreichen der Fluchtgeschwindigkeit von der Erde nur eine kleine zusätzliche Geschwindigkeit, die zu der sehr

großen Erdgeschwindigkeit vektoriiert addiert wird. Mit einem charakteristischen Drehimpuls umläuft die Sonde danach wie ein Planet die Sonne auf einer Ellipsenbahn. Um im Verlauf ihrer Mission besonders nahe an die Sonne zu gelangen, wurde die Sonnensonde Parker Solar Probe mit der sehr starken Delta IV Heavy/ Star-48BV Rakete gestartet. Damit die Heliophysiker die innere Heliosphäre und äußere Korona möglichst lange in ganz unterschiedlichen Entfernungen von der Sonne vermessen und beobachten können, erweist es sich als sinnvoll, mehrfache, durch Schwerkraft bewirkte Umlenkungen am Planeten Venus einzuplanen. Durch die dabei erfolgenden Richtungsänderungen zur Sonne hin, durch den Austausch von Bewegungsenergie mit der Venus, durch die damit einhergehende Veränderung der Geschwindigkeit sowie des Abstandes von der Sonne und damit auch des Bahndrehimpulses der Sonde, durch all diese Effekte wird sich Parker Solar Probe in ihrem Perihel der Sonne immer stärker nähern. Über fast sieben Jahre hinweg wird diese Sonde auf ihren bisher 24 eingeplanten elliptischen Orbits dabei insgesamt sieben Mal die Unterstützung durch die Schwerkraft des Planeten Venus ausnutzen.

Die wissenschaftlichen Zielsetzungen der Mission lassen sich in vier Teilbereiche auflisten. Zum einen geht es

Koronalen Masseauswürfe bildlich dargestellt und zusammen mit den in-situ-Instrumenten analysiert werden können. Mit Hilfe dieser Instrumente wurde schon jetzt gezeigt, dass die Staubdichte zur Sonne hin merklich abnimmt, und daher wie erwartet davon auszugehen ist, dass die Staubpartikel spätestens in der inneren Korona durch häufige Kollisionen mit schnellen und heißen Ionen vollständig zerstört werden. Gespannt warten heute schon viele Wissenschaftler auf die Auswertung der Daten, die PSP bei den beiden folgenden Umläufen um die Sonne in einem Abstand von etwa 20 Sonnenradien vermutlich am 27. September 2020 bzw. am 17. Januar 2021 sammeln wird.

Parker Solar Probe hat also bisher schon einige interessante und überraschende Erkenntnisse über die Magnetfelder des jungen, „unberührten“ Sonnenwindes gewonnen. Erstmals konnte der Sonnenwind in einem Bereich beobachtet werden, wo er gezwungen durch die magnetischen Felder der inneren Heliosphäre, anscheinend noch etwas mehr als vermutet mit der Sonne rotiert. Und dies offensichtlich mit überraschend großer und nach außen zunehmender azimuthaler Geschwindigkeit bis in eine Entfernung von mehr als 32 Millionen Kilometern, also bis zu einem Abstand von mehr als 45 Sonnenradien von der Sonnenoberfläche entfernt. Manche Heliophysiker glauben allerdings nicht an die Richtigkeit dieser Interpretation der Messungen und damit nicht an die Möglichkeit, dass die Alfvén-Punkte in einer derartig großen Entfernung von der Sonne liegen könnten oder, bildlich gesprochen, 'dass der Radius des rotierenden Karussells derartig groß ist, und die von ihm abspringenden Kinder erst von dort aus radial aus dem Karussell fliegen würden'.

In der inneren Heliosphäre wurde außerdem die Existenz einer überraschend großen Anzahl sogenannter magnetischer „switchbacks“ (**Bild 9d**) registriert. Unter diesen verstehen die Heliophysiker in Gruppen auftretende magnetische Feldstrukturen, deren Richtung sich beim Durchflug von Parker Solar Probe umkehrt, wobei deren Lebensdauern zwischen wenigen Sekunden und einigen Minuten liegen. Sie treten beispielsweise an den Rändern äquatorialer koronaler Löcher auf, dort wo als „interchange reconnection“ bezeichnete Prozesse zwischen offenen

und geschlossenen magnetischen Feldstrukturen Teilchen beschleunigen. Die Energie der Sonnenwindpartikel ist in diesen Strukturen, in denen sich die Ausrichtung der Felder plötzlich lokal umkehrt, offensichtlich größer als in den sie umgebenden Hintergrundfeldern. Die Wissenschaftler möchten in Zukunft unbedingt klären, ob es sich bei den switchbacks möglicherweise aber nur um Alfvén'sche Fluktuationen mit größeren Amplituden handelt, die sich im Verlauf nichtlinearer Prozesse aufteilen und zurückkippen. Spielen sie in irgendeiner Weise eine entscheidende Rolle für die Beschleunigung des Sonnenwindes?

Ein kurzer Ausblick ([27]–[29])

Die Parker Solar Probe Mission wird sich der Sonne auf ihren Orbits immer weiter nähern und wertvolle Daten zur Beantwortung der in diesem Artikel aufgelisteten Fragen über die Eigenschaften und Entwicklungen des jungen Sonnenwindes liefern. Im nachfolgenden Teil 3 dieser Artikelserie werden die neuesten Erkenntnisse detaillierter vorgestellt, die bis dahin basierend auf den Beobachtungs- und Messergebnissen dieser Sonnensonde sowie der Anfang 2020 gestarteten Solar Orbiter Mission gewonnen werden konnten. Unterstützt auch durch die Sonnensonden SOHO, STEREO und HINODE sowie hochauflösende bodengestützte Sonnentelkope wie das 1,5-m-GREGOR-Teleskop auf Teneriffa, das 1,6-m-Goode-Solar-Teleskop (GST) sowie das 4-m-Inouye-Solar-Teleskop (DKIST) in den Vereinigten Staaten, vor allem aber durch die Ergebnisse analytischer Modell- und numerischer Simulationsrechnungen werden die Heliophysiker in den kommenden Jahren hoffentlich noch sehr viel besser erklären können, wo und durch welche Prozesse der heliosphärische Sonnenwind entsteht, wie er geheizt und beschleunigt wird, wie die ihn beeinflussenden solaren Magnetfelder erzeugt werden, und wie diese miteinander wechselwirken. Erst dadurch lässt sich das heliosphärische Weltraumwetter, dessen Verständnis sich für uns Menschen nicht nur als wissenschaftlich interessant, sondern möglicherweise sogar als überlebenswichtig erweist, noch besser erklären und zuverlässiger als bisher vorhersagen.

Essay: Warum Weltraumplasma-physik?

Immer wieder stellt der interessierte Laie dem Wissenschaftler die Fragen „Warum erforscht man die Sonne und den erdnahen Weltraum? Was lernen wir davon für unser Leben hier auf der Erde?“ Nun, die einfachste Antwort ist, weil die Sonne da ist und zweifellos durch ihr abgestrahltes Licht die Quelle allen Lebens auf der Erde ist! Das hatten schon die Menschen in frühen Hochkulturen erkannt, und deshalb die Sonne als Gott angebetet. Natürlich ist es besonders die menschliche Neugier, die uns immer wieder dazu treibt Neuland zu betreten und Unerforschtes zu erkunden mit dem Wunsch, die Welt in allen ihren Aspekten zu verstehen und eventuell Teile davon für uns nutzbar zu machen. Dies tut die Menschheit seit ihren kulturellen Anfängen, und damit einhergehend hat sie immer schon voll Staunen auch den Nachthimmel beobachtet und sich für die Sterne interessiert.

Zu Beginn des vergangenen Jahrhunderts haben wir mit Hilfe der Atom-spektroskopie gelernt, dass die Sonne ein starkes Magnetfeld besitzt, das sich im 11-jährigen Zyklus umpolt. Die Sonne ist der einzige Stern, der mit seinem Planetensystem uns zugänglich ist, und sie wird seit Jahrhunderten vom Erdboden aus und seit etwa siebzig Jahren auch mit optischen Teleskopen auf Satelliten und Raumsonden beobachtet im gesamten Bereich der elektromagnetischen Strahlung von der harten Gamma- und Röntgenstrahlung, über das ultraviolette, sichtbare und infrarote Licht bis hin zu Mikrowellen und Radiowellen. Dachte man früher der Raum zwischen Sonne und Planeten sei leer, also gähnendes Vakuum, so wissen wir heute durch die moderne Weltraumforschung, dass er nicht nur von Strahlung erfüllt ist, sondern auch von zahlreichen massiven kleinen Partikeln (Elektronen und Ionen) verschiedenster Energien und in geringer Zahl von neutralen Atomen und Staubteilchen. Dazu kommen schwache Magnetfelder und niederfrequente elektromagnetische Wellen.

Kontinuierlich strömt aus der hohen ionisierten Atmosphäre der Sonne, der eine Millionen Grad heißen Korona, die bei einer Sonnenfinsternis als heller Kranz sichtbar wird, der

Sonnenwind in alle Raumrichtungen von der Sonne ab mit Geschwindigkeiten von vielen Hundert Kilometern pro Sekunde. Er kommt erst weit draußen bei etwa dem hundertfachen Abstand der Erde von der Sonne zum Stillstand durch den sanften Gegendruck des dünnen interstellaren Gases. Diese vom Sonnenwind und von ihm mitgeschleppten Magnetfeld der Sonne erzeugte riesige Plasmablase nennen wir die Heliosphäre, die das Sonnensystem umhüllt und gegen das interstellare Medium abschirmt.

Noch einmal stellt sich uns die Frage, warum wir all das wissen wollen, und weshalb wir die Sonne, ihre Planeten und die Heliosphäre mit erheblichem technischem und finanziellem Aufwand erforschen? Ganz sicher und legitimer Weise um ihrer selbst willen, aber mehr noch, weil wir nur in unserem kosmischen Zuhause, nämlich der Heliosphäre, mit Raumsonden, Teleskopen und robotischen Fahrzeugen und Sonden auf Planeten und kleinen Körpern (wie Monden, Kometen und Asteroiden) diese Objekte an Ort und Stelle sowie durch Fernerkundung genau und hochaufgelöst untersuchen können. Die gewonnenen Erkenntnisse haben exemplarischen Charakter für das Verständnis anderer naher Sterne und ihrer Planetensysteme (davon gibt es heute schon mehr als 4000 nachgewiesene).

Von zentraler Bedeutung ist bei all dieser Forschung die Plasmaphysik, denn die Sonne ist ein heißer Ball aus ionisiertem Wasserstoff, in dem durch ihre Rotation (mit einer Periode von etwa 25 Tagen) in der Konvektionszone ein Dynamo angeworfen wird, der ihr sich zeitlich veränderndes Magnetfeld erzeugt. Dies ist der Grund für die magnetische Aktivität der Sonne, die letztlich auch für den Sonnenwind verantwortlich ist und die Sonnenstürme, die mit Eruptionen von Magnetfeldblasen und Plasmawolken einhergehen und die Heliosphäre erschüttern. Diese Phänomene verursachen im erdnahen Raum und der Hochatmosphäre der Erde das Weltraumwetter, welches starken Einfluss auf Stationen, Satelliten und technische Einrichtungen am Erdboden ausüben kann. Vorhersagen des Weltraumwetters werden im Zeitalter von ISS, GPS, dem baldigen erneuten bemannten Flug zum Mond und den vielen weltraumgestützten Erdbeobachtungen immer wichtiger.

Die rechtzeitige Vorhersage des Weltraumwetters ist eine sehr nützliche Anwendung der Ergebnisse der Weltraumforschung! Aber darüber hinaus ist die Plasmaphysik der Sonne und Heliosphäre von exemplarischer Bedeutung für das Verständnis der physikalischen Vorgänge in anderen Sternen und ihren Astrosphären sowie bei der Bildung von kompakten Objekten aus heißen Plasmawolken und von Akkretionsscheiben und den von ihnen ausgehenden Winden oder Jets. In diesem Sinne stellen Sonne und Heliosphäre ein großes Plasmalabor für den Astrophysiker dar, in dem er Musterprozesse studieren kann, die überall im Universum stattfinden, dort aber nicht zugänglich sind und nicht direkt oder genau beobachtet werden können. Wie einst vor hundert Jahren die Laborphysik der Strahlung von atomaren Gasen den Schlüssel zum Verständnis der Quantenmechanik und damit auch der Sternatmosphären lieferte, so gibt heute die in-situ-Plasmaphysik im Weltraum und an der Sonne Aufschluss über die Plasmaprozesse in Sternen, von denen zum Beispiel der Dynamoprozess oder die Rekonnexion von magnetischen Feldlinien eminent wichtig sind.

Aber auch für die fundamentale Plasmaphysik in ihrer atomistischen Form, als kinetische Theorie der Elektronen und Ionen mit den dazugehörigen elektromagnetischen Feldern und Stößen zwischen den Teilchen, stellen die Heliosphäre und Magnetosphären der Planeten natürliche Plasmen dar, die so weder in Laboren noch Fusionsreaktoren auf der Erde erzeugt werden können. Ferner ist die Plasmadiagnostik und detaillierte Vermessung von Teilchen, Wellen und Turbulenz im Weltraum in Raum und Zeit hochaufgelöst möglich, ohne das Plasma dort durch Einbringen von Messgeräten wesentlich zu verändern. Damit hat man die Möglichkeit Grundlagenforschung zu betreiben, die richtungsweisend ist für andere Teilbereiche der Plasma- und Astrophysik. Dies allein ist aus Sicht der beteiligten Wissenschaftler Grund genug für ihre Forschung und rechtfertigt die Aufwendungen, wobei man konstatieren darf, dass Weltraumforschung viele neue Technologien befördert hat, gerade wegen der besonderen Herausforderungen die der Weltraum mit sich bringt.

Literatur:

- [11] Cosmos-Indirekt, Physik-Schule: Sonnenwind. <https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Sonnenwind>
- [12] Cranmer, S. R.: Solar-Wind Origin, 2019; <https://oxfordre.com/physics/view/10.1093/acrefore/9780190871994-e-18?print=pdf>
- [13] ESA: Ulysses factsheet; https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Ulysses_factsheet
- [14] McComas D. J. u.a.: Ulysses' return to the slow solar wind. *Geophysical Research Letters* 25(1), I 1998; https://www.researchgate.net/publication/237954866_Ulysses%27_return_to_the_slow_solar_wind
- [15] Khabarova, O. V.: Evolution of the solar wind speed with heliocentric distance and solar cycle. *Surprises from Ulysses and unexpectedness from observations of the solar corona*, 2018; <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1806/1806.09604.pdf>
- [16] Kneer, F. u.a. (Hrsg.): *Perspektiven der Erforschung von Sonne und Heliosphäre in Deutschland*. Copernicus GmbH, Katlenburg-Lindau, 2003; <https://www2.mps.mpg.de/dokumente/publikationen/perspektiven/Perspektiven.pdf>
- [17] Peter H.; Schlichenmaier R.; Roth, M. *Vom Kern zur Corona – Das Magnetfeld spielt eine entscheidende Rolle bei den sichtbaren Strukturen auf der Sonne*. *Physik Journal* 6 Nr. 3, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2007; https://www.researchgate.net/publication/41625233_Vom_Kern_zur_Corona
- [18] v. Kusserow, U.: *Chaos, Turbulenzen und kosmische Selbstorganisationsprozesse*. Springer-Verlag GmbH Deutschland, 2018; <https://ulrich-von-kusserow.de/index.php/buecher>
- [19] Russell, A. J. B.: *75th Anniversary of Existence of Electromagnetic-Hydrodynamic Waves*, 2018; <https://arxiv.org/pdf/1711.04876.pdf>
- [20] McComas D. J.: *Understanding coronal heating and solar wind acceleration: Case for in situ near-Sun measurements*, 2006; <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2006RG000195>
- [21] Schwenn, R.; Marsch E. (Hrsg.): *Physics of the Inner Heliosphere I – Large Scale Phenomena*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1990
- [22] Schwenn, R.; Marsch E. (Hrsg.): *Physics of the Inner Heliosphere II – Particles, Waves and Turbulence*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1991
- [23] NASA Pressemappe: *Parker Solar Probe – A Mission to Touch the Sun*, 2018; http://parkersolarprobe.jhuapl.edu/The-Mission/docs/SolarProbe_PK_WEB.pdf
- [24] PSP – The Mission; <http://parkersolarprobe.jhuapl.edu/The-Mission/index.php#Where-Is-PSP>
- [25] *Parker Solar Probe: A Mission to Touch the Sun*; http://parkersolarprobe.jhuapl.edu/The-Mission/docs/SolarProbe_PK_WEB.pdf
- [26] *NASA Parker Solar Probe News Center*; <http://parkersolarprobe.jhuapl.edu/News-Center/index.php>
- [27] Müller D. u.a.: *Solar Orbiter: Exploring the Sun-Heliosphere Connection*, 2012 <https://arxiv.org/pdf/1207.4579.pdf>
- [28] *The Solar Orbiter mission – Science overview* <https://arxiv.org/pdf/2009.00861.pdf>
- [29] *Solar Orbiter – Science Exploration*; https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Solar_Orbiter

Ulrich von Kusserow

Besselstr. 32–34
28203 Bremen
E-Mail: uvkusserow@t-online.de

Dr. Eckart Marsch

Johann-Fleck-Str. 18
24106 Kiel
E-Mail: eckart.marsch@web.de