

Raumsonden erforschen das heliosphärische Weltraumwetter im Sonnenwind (Teil 1)

von Ulrich von Kusserow

Der von der Millionen Grad heißen Korona ausgehende turbulente Sternenwind bestimmt die Formgebung sowie die Entwicklung unterschiedlichster physikalischer Prozesse in der die Sonne umgebenden Heliosphäre. Die vielfältigen Phänomene des sich in ihr abspielenden Weltraumwetters lassen sich von Satelliten aus besonders gut beobachten und teilweise sogar vor Ort vermessen. Für die Wissenschaftler erweist sich diese direkte Sonnenumgebung deshalb als ein exzellentes Labor zur Erforschung auch vieler, in entfernten stellaren und galaktischen Regionen wirksamer astrophysikalischer Prozesse.



Jupiters Nordlichter
(<https://www.youtube.com/watch?v=4dsjtQyb5fc>)



Weltraumwetterereignisse im Zusammenhang mit menschlicher Aktivität (<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/space-weather-events-linked-to-human-activity>)

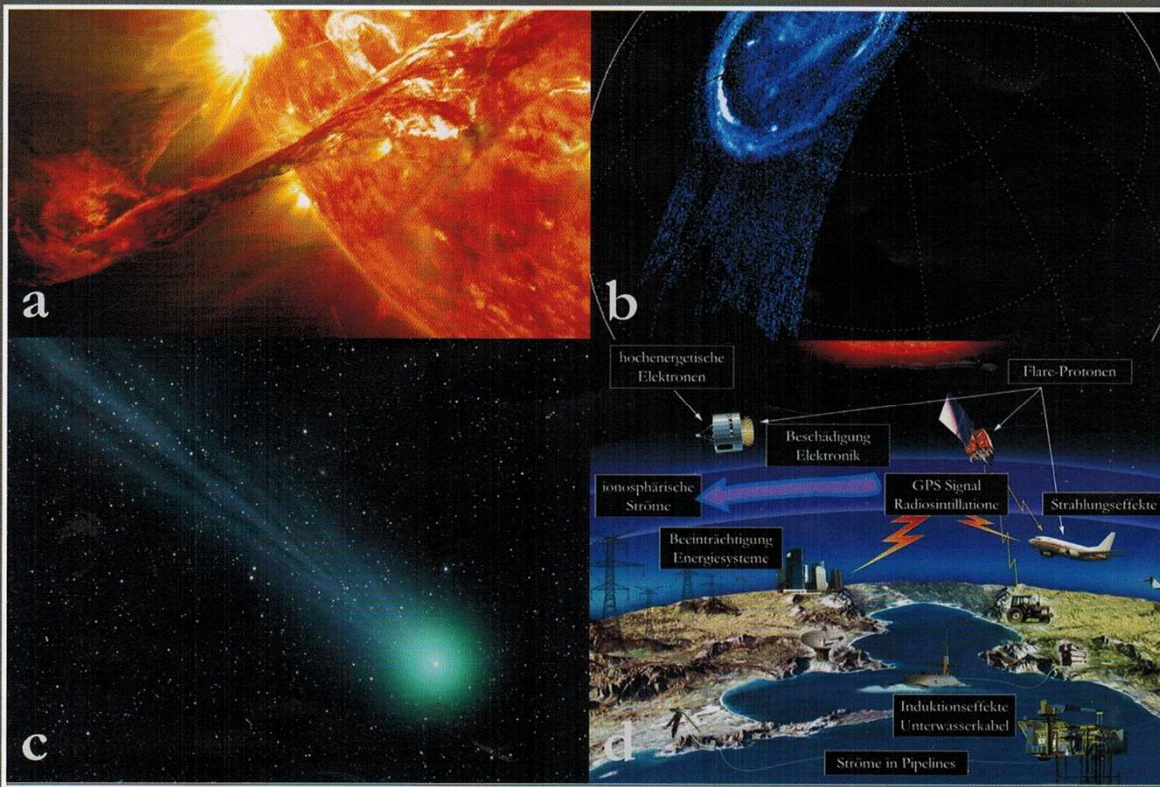
Besonders fasziniert blicken wir Menschen immer wieder in den Sternenhimmel über uns. Die heute mit Hil-

fe moderner Teleskope zunehmend höher auflösbaren, oft sehr riesigen Himmelsobjekte sind für uns natürlich nicht wirklich greifbar. Am liebsten würden wir mit einem Raumschiff direkt dort hinfliegen, um die vielfältigen und oft besonders komplexen kosmischen Strukturen vor Ort im Detail studieren und analysieren zu können. Leider erweist sich dies aber als sehr unrealistisch, denn wir Menschen werden unser Sonnensystem kaum jemals verlassen können. Auch die exakte Abfolge der im so weit entfernten Universum auf meist besonders langen Zeitskalen ablaufenden nicht-linearen Entwicklungsprozesse werden wir endgültig, basierend allein auf theoretischen Überlegungen, nicht wirklich tief begreifen können. Selbst wenn es deshalb für uns Menschen erhebliche natürliche Grenzen für die Möglichkeiten der Erkenntnisgewinnung gibt, so möchten wir doch zumindest mehr über die Hintergründe unserer sehr persönlichen Existenz erfahren. Da ist es allemal von besonderer Bedeutung, zumindest die in unserer direkten Lebensumgebung ablaufenden Prozesse näher kennenzulernen, direkter vor Ort zu vermessen und dadurch auch tiefer verstehen zu können.

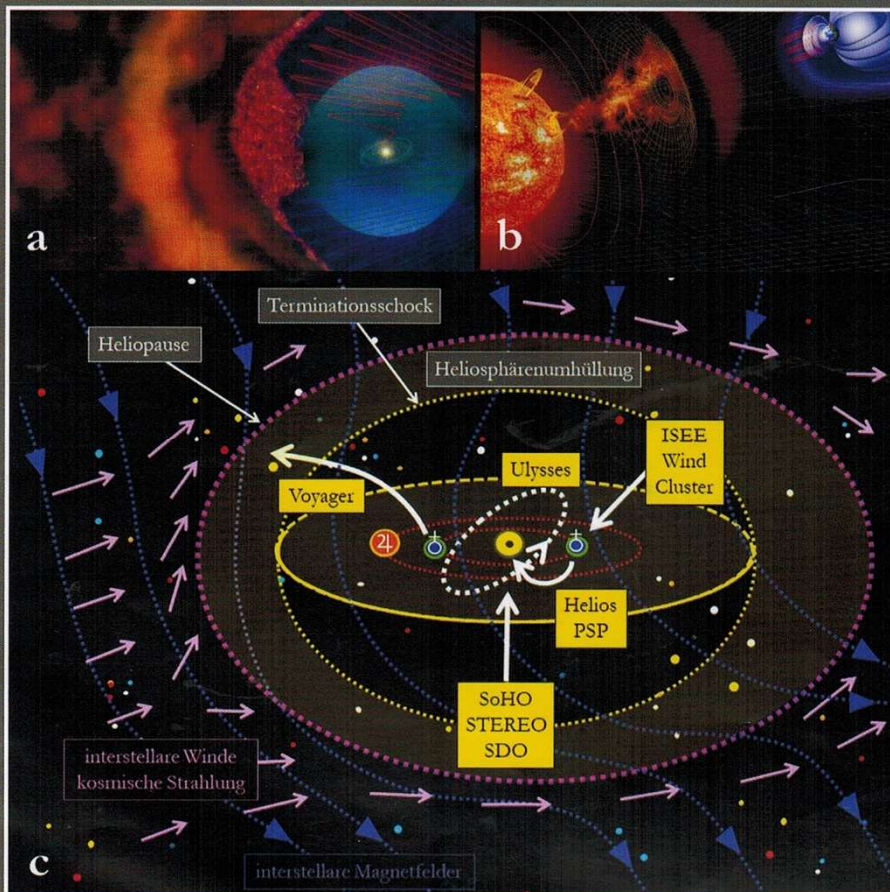
Wir genießen die Aufgänge und Untergänge der Sonne, des für uns so besonderen Zentralsterns unseres Sonnensystems, der die einzigartige Entwicklung von Leben auf dem Planeten Erde ermöglicht. Ehrfurchtsvoll verfolgen wir die Relativbewegungen von Mond und Sonne im Verlaufe faszinierender Sonnen- oder Mondfinsternisse. Uns Menschen beeindruckt die dynamischen Entwicklungen der über den Himmel oft großräumig verteilten farbenprächtigen Polarlichter (**Bild 1b, 2. Umschlagseite**), und wir bestaunen den Vorbeizug von Kometen mit ihren besonders langgestreckten Schweifen (**Bild 1c**). Wir wissen heute, dass sich diese spektakulären Himmelsphänomene unter dem Einfluss des aus der heißen Sonnenatmosphäre stetig abströmenden Sonnenwindes in charakteristischer Weise ausbilden und entwickeln. Diese im Verlauf solarer Eruptionen (**Bild 1a**) besonders komplex strukturierten und dynamisch variablen Sternwinde sind es, die für die Ausbildung und Formgebung der blasenförmigen Heliosphäre, des Einflussbereiches der Sonne im interstellaren Raum, verantwortlich sind.

Wahrscheinlich mehr als 99 % der sichtbaren Materie des Universums befindet sich im Plasmazustand. Die darin mehr oder weniger stark ionisierten Gaspartikel strömen durch den interplanetaren Raum unseres Sonnensystems fluidartig in dichteren Medien und nahezu kollisionsfrei in dünneren Medien, meist turbulent verwirbelt und von magnetischen Feldstrukturen durchsetzt. Der in der Sonnenatmosphäre aufgeheizte und beschleunigte Sonnenwind sowie die aus dem interstellaren Raum eindringende kosmische, teilweise auch elektrisch neutrale Partikelstrahlung bestimmen das

Zum Beitrag auf Seite 43



1 Auslösung und dynamische Auswirkungen des Weltraumwetters: Sonneneruption am 31. August 2012 (1a), Jupiters Nordlichter im UV-Licht beim Vorbeiflug der Juno Sonde am 11. September 2016 (1b), langgestreckte Schweifstrukturen des Kometen Lovejoy am 25. Januar 2015 (1c), für uns Menschen gesellschaftlich relevante Auswirkungen des Weltraumwetters (1d) (SDO/NASA/GSFC, NASA/JPL-Caltech/SwRI, M. Druckmüller, NASA)



3 Satelliten erforschen die Auswirkungen des Sonnenwinds in der Heliosphäre der Sonne: Turbulenzen in der äußeren Umhüllung schützen die Heliosphäre vor allzu starkem Eintrag kosmischer Partikelstrahlung (3a), Sonnenwinde bestimmen das Weltraumwetter in der Magnetosphäre der Erde (3b), Raumsonden erforschen die physikalischen Prozesse in der inneren und äußeren Heliosphäre (3c). (NASA/GSFC/CI Lab, NASA, U. v. Kusserow)

ders komplex strukturierten Sonnenfleckengruppe beobachteten Flare-Ereignis (**Bild 2c**) und den daraufhin zeitlich verzögert auftretenden, auffallend intensiven Schwankungen des Erdmagnetfeldes vermutete. Als Flares werden einzelne oder kontinuierlich sich wiederholende, blitzartig verstärkt einsetzende Aufhellungen bezeichnet, die seltener im sichtbaren Licht, häufiger im ultravioletten Spektralbereich registriert werden können. Bei solchen Flare-Prozessen, die oft auch von massereichen koronalen Materieauswürfen hinaus in den interplanetaren Raum begleitet sind, werden gewaltige Mengen an magnetischer Energie freigesetzt, einzelne Teilchen unter Umständen sogar auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. 1896 postulierte der norwegische Physiker *Christian Birke-land* (1867–1917), dass solche geladenen Teilchenströme auch für die Anregung von Atomen zur Aussendung von Polarlichtern verantwortlich sein müssten. Schließlich war es der deutsche Astro- und Plasmaphysiker *Ludwig Biermann* (1907–1986), der 1951 begründet davon ausging, dass auch die typische Ausrichtung der Gasschweife von Kometen in nahezu sonnenabgewandter Richtung durch einen von der Sonne ausgehenden, stetigen Partikelstrom verursacht sein müsste.

1959 führte der heute 92-jährige *Eugene Parker* den Begriff des Sonnenwindes ein und entwickelte eine erste, anfangs noch umstrittene Theorie zur Erklärung dieses von der Sonnenatmosphäre ausgehenden Teilchenwindes. Erstmals ging er dabei von einer konstant expandierenden Sonnenkorona aus. In seinen Modellrechnungen konnte er auch die Existenz der Spiralförmigen heliosphärischer Stromschichten nachweisen, die sich zwischen den offenen Magnetfeldstrukturen mit unterschiedlicher Ausrichtung ausbilden, die, von den beiden Polregionen der rotierenden Sonne ausgehend, in die Heliosphäre hinauslaufen.

Diese nach dem amerikanischen Physiker benannte „Parker-Spirale“ bildet sich aus, weil sich die sie topologisch formenden Magnetfeldstrukturen nahezu wie eingefroren mit dem radial aus der Sonnenatmosphäre nach außen abströmenden ionisierten, elektrisch besonders gut leitfähigen Plasma hinausbewegen, und sich die Fußpunkte dieser magnetischen Feldstrukturen

aufgrund der Rotation der Sonne umlaufend davon wegbewegen. Der direkte Nachweis eines Ionenflusses im interplanetaren Medium gelang im selben Jahr erstmals durch Messungen von Bord der sowjetischen *Luna*-Satelliten. 1961 registrierte die amerikanische *Explorer 10*-Mission in bis zu 42,3 Erdradien Entfernung von der Erde einen direkt von der Sonne ausgehenden Plasmastrom mit einer mittleren Geschwindigkeit von 300 km/h. Die tatsächliche Existenz des Sonnenwindes als kontinuierlichem Strom von Plasmamaterie mit Geschwindigkeiten in der Regel zwischen 400 km/h und 700 km/h sowie größer als 1250 km/h in Sturmböen konnte schließlich erstmals 1962 durch Messungen von Bord der amerikanischen *Mariner-2*-Sonde nachgewiesen werden.

Der Sonnenwind weist eine durchweg geringe Teilchendichte auf, besteht im Wesentlichen aus Protonen, Elektronen, zu etwa 5 % aus den als α -Teilchen bezeichneten Heliumkernen sowie geringen Spuren unterschiedlicher Ionen von Kohlenstoff-, Stickstoff-, Sauerstoff-, Neon-, Magnesium-, Silizium-, Schwefel- und Eisenatomen. In Form fast durchweg ionisierter, magnetisierter und turbulent verwirbelter, anfangs noch inkompressibler Plasmamaterieströme die unterschiedlich schnellen, dichten, etwas abweichend voneinander zusammengesetzten Komponenten des solaren Sternwindes zunächst mit Unterschallgeschwindigkeit stetig und in alle Richtungen aus der heißen Sonnenatmosphäre hinaus.

Messungen zeigen, dass die langsamen und dichteren Sonnenwindströme, die vorwiegend in Bereichen geschlossener solarer Magnetfeldstrukturen mit darüberliegenden typischen wimpelförmigen „Helmet Streamer“-Strukturen (**Bild 2c**) freigesetzt werden, ihre Geschwindigkeit zwischen 5 und 25 Sonnenradien Entfernung auf 300 km/s verdoppeln können. Der schnelle Sonnenwind mit photosphärischer Zusammensetzung, der aus den meist eher polnah gelegenen und vor allem im Röntgenlicht gut identifizierbaren sogenannten koronalen Löchern (**Bild 2c**) austritt, wird schon im Bereich bis zu 2,5 Sonnenradien Entfernung sehr stark, anschließend bis in 20 Sonnenradien Entfernung weiter auf etwa 700 km/s beschleunigt. Schon nach wenigen Sonnenradien Entfernung breiten sich al-

le Sonnenwindkomponenten mit Überschallgeschwindigkeit aus, erweist sich das ansonsten weitgehend kollisionsfreie Sonnenwindmedium dann jedoch als kompressibel.



Heliosphäre: eine riesige Blase, geformt durch den Sonnenwind (<https://www.youtube.com/watch?v=jDyqMakJxzc>)



Die Satelliten STEREO, ACE und Wind beobachten die Auswirkungen eines koronalen Masseauswurfs der Sonne im Dezember 2008. (<https://www.youtube.com/watch?v=cZC1mbpKrDw>)

Dort, wo er in einer Entfernung zwischen etwa 75 und 90 Astronomischen Einheiten erstmals eine Beeinflussung durch den von außen einwirkenden Druck des interstellaren Mediums spürt, wird der Sonnenwind im Bereich des sogenannten Terminationschocks (**Bild 3a, c, 2. Umschlagseite**) wieder auf Unterschallgeschwindigkeit abgebremst. Diese abrupte Abbremsung der Sonnenwindpartikel führt hier zur Ausbildung einer Stoßfront. Im Bereich der sich nach außen anschließenden sogenannten Heliosphärenumhüllung verringert sich die Windgeschwindigkeit dann durch Interaktion mit dem interstellaren Medium zunehmend weiter. Der magnetisierte Teilchenstrom wird mehr und mehr zusammengedrückt und dabei turbulent mit den von außen einströmenden interstellaren Partikeln durchmischt. Dort, wo der Druck des Sonnenwindes schließlich mit dem Druck der von den umgebenden Ster-

nen ausgehenden Sternwinde übereinstimmt, wo der Sonnenwind also keinen gerichteten Einfluss mehr auf das interstellare Medium nehmen kann, befindet sich die theoretische Grenze unseres Sonnensystems in der sogenannten Heliopause. Die hier durch Auftreffen der Winde verursachten Störungen können daher relativ schnell an die Umgebung übermittelt werden, so dass sich keine abrupte Schockfront ausbilden kann.

Interstellare Winde umströmen die nach neuesten Erkenntnissen eher ovale oder kleeblattförmig, wohl aber nicht kometenschweifartig geformte Heliosphäre. Aus dem fernen Universum z. B. nach Supernovaexplosionen in das Sonnensystem vordringende hochenergetische kosmische Partikelstrahlung kann in den turbulent verwirbelten und magnetisierten blasenartigen Strukturen innerhalb der Heliosphärenumhüllung effektiv abgebremst und umgelenkt werden. Außerhalb der Heliopause bildet sich durch die von außen einströmenden und abgebremsten Sternwinde zwar eine Bugwelle, offensichtlich aber keine Bugstoßwelle aus. Erst vor Kurzem hat die Auswertung von Satellitendaten nämlich ergeben, dass die Geschwindigkeit des Sonnensystems relativ zu dem interstellaren Medium mit 23,2 km/s geringer ausfällt als die in diesen Bereichen anzutreffende Schallgeschwindigkeit von 26,3 km/s.

Neben Erkenntnissen über die im Außenbereich der Heliosphäre ablaufenden Vorgänge sind die Sonnenwindforscher, Helio- und Plasmaphysiker vor allem daran interessiert, die physikalischen Vorgänge beim Auftreffen des Sonnenwindes auf andere Hindernisse wie die Magnetosphären oder Ionosphären der Planeten und Kometen tiefer zu verstehen. Sie erforschen natürlich vorrangig auch den dynamischen Einfluss des durch den Sonnenwind geprägten Weltraumwetters auf die Magneto- und Ionosphäre sowie auf tiefere Atmosphärenschichten unseres Planeten Erde. Dafür ist es unbedingt erforderlich, die Heizungs- und eruptiven Prozesse in der Sonnenatmosphäre sowie die Beschleunigungs- und Wechselwirkungsprozesse im Sonnenwind in der inneren Heliosphäre (**Bild 3b**) und deren mögliche Auswirkungen auf unsere menschliche Gesellschaft genauer zu studieren und danach gründli-

cher zu verstehen. Erst dies ermöglicht verlässliche Vorhersagen über mögliche Gefährdungspotenziale solarer Prozesse für uns Menschen.

Magnetische Stürme und das Weltraumwetter ([1], [4], [5], [6], [7], [8])

Die sich periodisch im Verlaufe des im Mittel 11,2-jährigen Sonnenfleckenzyklus mehr oder weniger regelmäßig ändernde Sonnenaktivität wird durch eine Vielzahl dynamischer Prozesse bestimmt, die sich im heißen, turbulenten und von magnetischen Feldstrukturen durchsetzten Plasma im Inneren und in der Atmosphäre der Sonne entwickeln (**Bild 2**). In Sonnenfleckenruppen, deren Auftrittshäufigkeit und aktuelle heliographische Breitenlage den jeweiligen Zeitpunkt des solaren Aktivitätszyklus auffallend deutlich charakterisieren, durchstoßen magnetische Flussröhren die an diesen Stellen kühler und damit dunkler erscheinenden Bereiche der Sonnenoberfläche.

Durch mehr oder weniger großräumig organisierte, in die Atmosphäre aufragende magnetische Feldstrukturen gelingt die Stabilisierung unterschiedlich massereicher, als Protuberanzen bezeichneter Materiewolken gegen den Einfluss der im Vergleich zur Erde 28-fach stärker wirksamen Gravitationskraft auf der Sonne. Einsetzende magnetische Rekonnexionsprozesse, bei denen sich die Topologien magnetischer Feldstrukturen abrupt verändern, lösen Instabilitäten aus, die gewaltige solare Eruptionen, Flareprozesse, nachfolgend aufsteigende eruptive Protuberanzen sowie koronale Masseauswürfe hinaus in den interplanetaren Raum zur Folge haben können. Im Verlauf solcher magnetischen Stürme kann ein Großteil vorher gespeicherter magnetischer Energien in kinetische und thermische Energien umgewandelt werden, Teilchen werden dabei unter Umständen auf extrem hohe Geschwindigkeiten beschleunigt.

Im jeweils nachfolgenden Zyklus der Sonnenaktivität kehren sich die globalen magnetischen Polaritätsverhältnisse überall auf der Sonne um, so dass der magnetische Aktivitätszyklus der Sonne eine mittlere Periodenlänge von etwa 22,4 Jahren aufweist. Ebenso wie die sich zusätzlich noch über we-

sentlich längere Zeiträume mehr oder weniger periodisch ändernde Stärke der Sonnenaktivität kann auch dieser Sachverhalt einen wesentlichen Einfluss auf die Entwicklung des Weltraumwetters in der Heliosphäre nehmen.

Die bei koronalen Masseauswürfen (**Bild 1a**) ausgeworfenen, von Magnetfeldern durchsetzten Materiewolken sowie die bei Flareprozessen freigesetzte, teilweise recht hochenergetische elektromagnetische und Partikelstrahlung wechselwirken in der äußeren Sonnenkorona und in der inneren Heliosphäre in besonders komplexer Weise mit den unterschiedlichen Komponenten des magnetisierten Sonnenwindes. Später auch beim Auftreffen auf die Magnetosphären der Planeten Merkur, Erde, Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun, auf die Ionosphären etwa der Venus, des Mars, von Planetenmonden oder Kometenkernen bilden sich dabei verstärkt Turbulenzen, Schockfronten und elektrische Stromschichten aus, ermöglichen sogenannte Dissipations- und magnetische Rekonnexionsprozesse die Aufheizung, Beschleunigung und Lenkung von Plasmaströmen. Im dadurch modifizierten Sonnenwind bilden sich in ausreichend großer Sonnennähe dynamisch sich entwickelnde Plasmaschweife hinter Kometenkörpern aus (**Bild 1c**), variiert die Formgebung und Stärke der Polarlichterscheinungen, deren Entwicklung in den Ionosphären der von Magnetkäfigen umgebenen und geschützten Planeten zu beobachten sind (**Bild 1b**).

Die besonders hochenergetische Strahlung der aktiven Sonne, bei der hochenergetische Elektronen schon nach etwas mehr als 10 Minuten die Erde erreichen können, sowie die kosmische Partikelstrahlung aus dem fernen Universum können tief in unsere Erdatmosphäre eindringen. Sie bewirken die mögliche Aufheizung und Ausdehnung der in etwa 80 bis 500 km Höhe über der Erdoberfläche gelegenen Thermosphäre. Sie beeinflussen die Ausprägung der die Lebensentwicklung auf unserem Planeten schützenden Ozonschicht sowie die physikalischen Prozesse in der in etwa 15 bis 50 km Höhe befindlichen Stratosphäre, die für die Klimaentwicklung auf der Erde relevant sind.

Die nach einem koronalen Masseauswurf demgegenüber verzögert erst

nach etwa 2 bis 4 Tagen auf den erdmagnetischen Käfig auftreffenden magnetisierten interplanetaren Materiewolken induzieren elektrische Ströme, die Magnetfeldkomponenten erzeugen, die sich dem durch Dynamoprosesse im Erdinneren erzeugten globalen erdmagnetischen Feld überlagern. Geomagnetische Stürme setzen verstärkt vor allem dann ein, wenn das Erdmagnetosphärenfeld und das sonnenseitig mit ihm wechselwirkende Magnetfeld des Sonnenwindes entgegengesetzt orientierte Feldkomponenten aufweisen. Magnetische Rekonnexionsprozesse setzen dann nachfolgend wiederholt vor allem auch in der äquatorial gelegenen Plasmaschicht des sonnenabgewandten Magnetosphärenschweif der Erde ein. Teilchen dringen dabei verstärkt und energetisierend in den Van-Allen-Strahlungsgürtel der Plasmasphäre ein. Polarlichter können unter diesen Bedingungen sogar außerhalb des üblichen polnahen Polarlichtovals wesentlich näher zum Äquator hin in der Erdionosphäre, etwa 100 bis 200 km über dem Erdboden, erzeugt werden.

Das aufgrund der variablen Sonnenaktivität durch den magnetisierten Sonnenwind, Flares, Sonneneruptionen, koronale Masseauswürfe, hochenergetische solare Teilchen und elektromagnetische Strahlung sowie kosmische Strahlung und neutrale Partikel aus dem fernen Universum getriebene Weltraumwetter hat sowohl technische als auch biologische Auswirkungen für die menschliche Gesellschaft auf dem Planeten Erde (**Bild 1d**).

Hochenergetische Strahlung kann durch Auslösung fehlerhafter Signale, durch elektrische Aufladung der Raumfahrzeuge sowie durch Strahlungsschäden die Elektronik an Bord von Raumfahrzeugen schädigen oder zerstören. Durch sie aufgeheizte dichtere Atmosphärenschichten dehnen sich aus, lassen die in ihren Einflussbereich gelangten Satelliten aufgrund einsetzender Reibungsprozesse abbremsen und sie tiefer sinken, wonach sie ihre eigentlichen Aufgaben ohne erneuten Energieaufwand möglicherweise nicht mehr erfüllen können.

Radiowellensignale in der Ionosphäre sowie GPS-Signale könnten verzerrt und dadurch fehlerhaft, Fernfunksignale entscheidend gestört und die Kommunikation im Hochfrequenz-

bereich unterbrochen werden. Hochenergetische Strahlungsexposition kann gesundheitliche Folgen für Menschen im kommerziellen Flugverkehr, außerhalb schützender Atmosphären und Magnetosphären besonders verheerende, für nicht ausreichend gesichert abgeschirmte Weltraumastronauten sogar tödliche Folgen haben. Und die in der Regel wesentlich kürzeren transpolaren Flugverbindungen können nur bei geeignetem Weltraumwetter genutzt werden. Die dadurch gegebenenfalls erforderliche Nutzung längerer Flugrouten erfordert dann einen höheren Finanzaufwand für die Fluggesellschaften.

Auch die bei stürmischem Weltraumwetterbedingungen bewirkten schnellen bodennahen Änderungen des Erdmagnetfeldes sowie die damit einhergehende Induktion elektrischer Ströme können schwerwiegendere Folgen haben. Durch Erdverbindungen in Stromnetzen können große Spannungsdifferenzen zum unkontrollierbaren Fluss elektrischer Ströme führen, der Schutzrelais auslösen, Transformatoren beschädigen, gegebenenfalls sogar verzweigtere Stromversorgungssysteme über längere Zeiträume stören oder sogar unbrauchbar machen kann. Infolge induzierter stärkerer Ströme könnten auch Rohrleitungen und Unterseekabel durch einsetzende Korrosionsprozesse längerfristig beschädigt werden. Selbst wissenschaftliche Forschungsarbeiten oder z. B. horizontale Bohrungen für die Öl- und Gasförderung könnten durch die Auswirkungen extremen Weltraumwetters behindert werden.

Auch wenn dieser Sachverhalt in seiner Vielfalt und erst recht im Detail wissenschaftlich immer noch nicht wirklich geklärt ist, so nehmen die Sonne und das Weltraumwetter natürlich auch deutlichen Einfluss auf das Erdklima und die Wetterbedingungen nicht nur auf unserem Planeten. Veränderungen des Strahlungsflusses in die Erdatmosphäre können vermutlich das Ausmaß der klimarelevanten Wolkenbildungsprozesse verändern. Schwankungen des Strahlungsflusses im extremen UV-Bereich beeinflussen das Klima dabei in besonders subtiler indirekter Weise. Sie bestimmen sehr wahrscheinlich insbesondere auch die Balance zwischen den in der Regel besonders folgenreichen El Niño- und La Niña-Ereignissen.



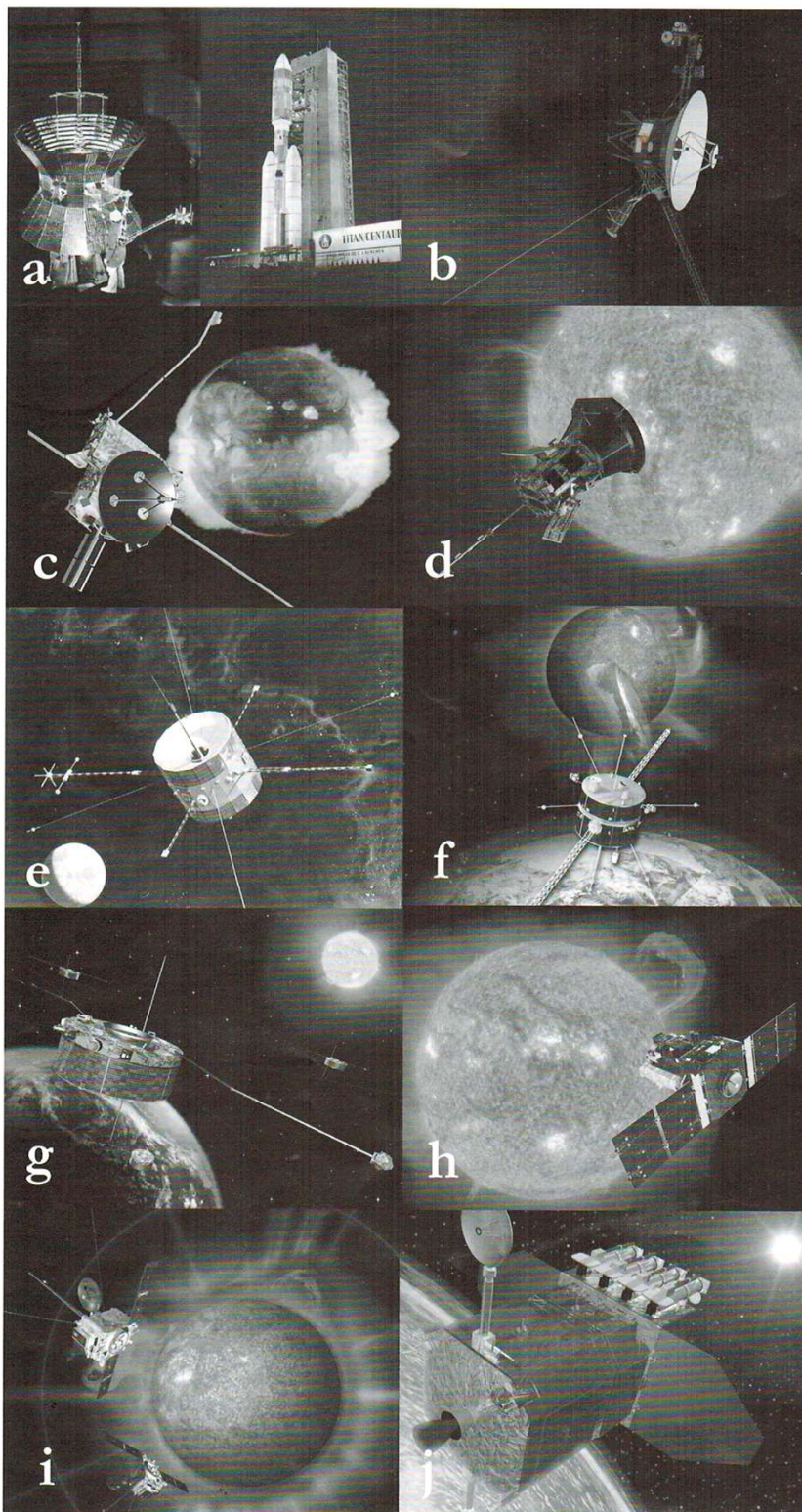
Weltraummissionen, die die Zusammenhänge im Sonne-Erde-System erforschen. (https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/missions/index.html)



Die vielfältigen Ansichten eines gewaltigen koronalen Masseauswurfs (<https://svs.gsfc.nasa.gov/11558>)

Heliosphärische Satellitenmissionen ([9], [10])

In den vergangenen knapp 60 Jahren wurden die in der Heliosphäre der Sonne ablaufenden physikalischen Prozesse mit Hilfe umfangreichen Datenmaterials analysiert, das durch Fernbeobachtung bzw. In-situ-Messungen von Bord einer Vielzahl unbemannter Raumsonden gewonnen wurde. Satelliten besuchten bzw. durchqueren auch heute noch die äußeren Randbereiche unseres Sonnensystems. In den Magnetosphären bzw. Ionosphären der Planeten, Monde und Kometen sowie in der inneren Heliosphäre werden von ihnen aus räumlich und zeitlich inzwischen zunehmend höher aufgelöste Vermessungen der Dichteverteilungen, Geschwindigkeiten unterschiedlichster Teilchenarten, der Temperaturen sowie magnetischer und elektrischer Felder durchgeführt. Mit Hilfe der von Sonnensatelliten aus durch Fernbeobachtung gewonnenen, spektral besonders hochaufgelösten Daten gelingen heute zunehmend genauere Analysen der Vielzahl filigraner Feinstrukturen sowie besonders dynamischer Entwicklungen in den unterschiedlichen Atmosphären-



4 Raumsonden erforschen die Eigenschaften und die Entstehung des Sonnenwindes: Helios (4a), Ulysses (4c), Parker Solar Probe (4d) in der inneren, Voyager (4b) in der äußeren Heliosphäre, ISEE (4e), Wind (4f) und Cluster (4g) im Bereich der Erdmagnetosphäre, SOHO (4h), STEREO (4i) und SDO (4j) in der Sonnenatmosphäre. (DFVLR/NASA, NASA, NASA/ESA/NRC, NASA/APL, NASA/ESRO/ESA, NASA, ESA/NASA (2), NASA (2))

schichten der Sonne. Und in Zukunft werden mit *Parker Solar Probe* und *Solar Orbiter* zwei besonders leistungsfähige Satelliten die entscheidenden Heizungs- und Beschleunigungsprozesse, charakteristischen Strukturen, Turbulenzen und Entwicklungen im Sonnenwind in der äußeren Korona bzw. inneren Heliosphäre bis zum nächsten solaren Aktivitätsmaximum im Detail studieren.

Zwei 1972 bzw. 1973 gestartete amerikanische *Pioneer*-Satelliten waren die ersten Raumsonden, die nach ihrem Vorbeiflug am Jupiter weiter außen gelegene Bereiche der Heliosphäre bis zu einer Entfernung von 67 AE zur Erde erforschten. Sie studierten die in der Sonnenumgebung beschleunigten Partikel des Sonnenwindes, die aus der Milchstraße in die Heliosphäre eindringende kosmische Partikelstrahlung und verließen anschließend das Sonnensystem. Die 1977 gestarteten beiden *Voyager*-Missionen (Bild 4b) der NASA erkundeten nicht nur die Planeten Jupiter und Saturn, *Voyager 2* darüber hinaus auch Uranus und Neptun. Bei ihrer Durchquerung des Terminationschocks, der Heliomhüllung und Heliopause lieferten sie in den letzten beiden Jahrzehnten vor allem auch besonders aufschlussreiche Daten über die am äußersten Rand unseres Sonnensystems anzutreffenden Strukturen und ablaufenden dynamischen Prozesse. Der 2006 gestartete *New Horizon*-Satellit studierte 2015 beim Vorbeiflug das Pluto-System und wird in Zukunft noch weiter entfernte Kuipergürtel-Objekte besuchen. Von Bord dieses Satelliten gewonnene Daten bestätigten darüber hinaus 2018 auch die Existenz eines bereits von den *Voyager*-Satelliten 1992 entdeckten „Wasserstoffwall“ an der Außengrenze unseres Sonnensystems. Durch Analyse der Strahlung von energetischen neutralen Atomen durch den 2008 gestarteten *Interstellar Boundary Explorer (IBEX)*-Satelliten gelang schließlich die Vermessung der Relativgeschwindigkeit des Sonnensystems bezüglich des interstellaren Mediums sowie der Nachweis, dass die vermutlich klebblattähnliche blasenförmige Heliosphäre im Außenbereich keine wirkliche abrupte Stoßfront aufweist.

1974 bzw. 1976 starteten die beiden deutsch-amerikanischen Satelliten-Missionen *Helios A* und *B* (Bild 4a) und näherten sich der Sonne bis auf 0,31 AE

bzw. 0,29 AE. Über einen Zeitraum von 10 Jahren erforschten sie die innere Heliosphäre, beginnend in einem Minimum der Sonnenaktivität bis über das folgende Maximum hinaus. Die Sonnenwindforscher gewannen dabei eine Fülle wichtiger Daten, mit Hilfe derer sie die Turbulenzentwicklungen, Dissipations- und Heizungsprozesse, die Ausbreitung und Wechselwirkung magnetischer Wellen, die Entwicklung bewegter Schockfronten sowie die Beschleunigung von Teilchen im nahezu kollisionsfreien Plasma des Sonnenwindes erstmals im Detail genauer analysieren konnten.

Ulysses (Bild 4c) war die 1990 gestartete Sonde der Europäischen Weltraumorganisation ESA sowie der NASA, die erstmals aus der Planetenebene hinaus die Polregionen der Sonne vermessen konnte. Zentrale Aufgaben dieser 19 Jahre erfolgreich Daten sammelnden Mission waren es, die Entwicklung der jeweils unterschiedlichen Eigenschaften des Sonnenwindes im Aktivitätsminimum bzw. Maximum zu studieren, die damit einhergehende Entwicklung der Sonnenkorona und des polnahen Sonnenmagnetfelds zu verfolgen sowie den Einstrom der kosmischen Strahlung zu vermessen. Im August 2018 startete schließlich die *Parker Solar Probe* (PSP) -Mission (Bild 4d) der NASA, die sich der Sonne bei insgesamt 24 geplanten Umläufen zunehmend stärker nähern und im Jahre 2025 einen Abstand von weniger als 10 Sonnenradien erreichen wird. Ziele dieser Mission sind es, den Energiefluss zu verfolgen, der die Korona erwärmt und den Sonnenwind beschleunigt, die Struktur und die Dynamik der Magnetfelder an den Quellen des Sonnenwindes zu verfolgen, sowie die entscheidenden Mechanismen verlässlicher zu bestimmen, die die energetischen Teilchen im Sonnenwind beschleunigen.

Von 1962 bis 1973 startete die NASA insgesamt 10 *Mariner*-Sonden, um die Umgebung des Mars, der Venus und des Merkur zu erkunden. Unter anderem wurden dabei das interplanetare Magnetfeld, dessen Fluktuationen sowie die jeweils anzutreffenden Teilchenpopulationen und Eigenschaften der von der Sonne ausgesandten Partikel vermessen. Der 1989 gestartete amerikanische *Galileo*-Satellit erforschte mehr als zehn Jahre lang den Jupiter, dessen Magnetosphäre und Monde. Und

acht Jahre später begann der Flug der *Cassini-Huygens*-Sonde der NASA, ESA sowie der italienischen Weltraumagentur ISA zum Saturn und dessen Monden. Im Verlauf seiner 20-jährigen Mission untersuchte dieser Satellit auch die Magnetosphäre des Saturn sowie die physikalischen und elektrischen Eigenschaften der Atmosphäre des Mondes Titan. Von 2004 bis 2015 studierte der *Messenger* (*Mercury Surface, Space Environment, Geochemistry, and Ranging*) -Satellit unter anderem auch das Magnetfeld des Merkur.

Zwischen 1977 und 1987 studierten die beiden *International Sun-Earth Explorer* (*ISEE*, Bild 4e) im Rahmen einer kooperativen Mission der NASA und der European Space Research Organisation (ESRO, später ESA) erstmals die Interaktionen des Sonnenwindes mit dem Erdmagnetfeld. *ISEE 2* war außerdem die erste Sonde, die einen Kometen besuchte und durch dessen Plasmaschweif flog. Die 1994 gestartete, immer noch besonders erfolgreich Daten generierende *Wind*-Mission (Bild 4f) erforscht die Eigenschaften des Plasmas und der Radiowellen in der Erdmagnetosphäre sowie im anströmenden Sonnenwind, studiert die sich darin ausbildenden Schockfronten, vielfältigen Wellenmoden und deren Interaktionen miteinander. Im Verbund untersuchten die vier *Cluster*-Satelliten (Bild 4g) der NASA und der ESA von 2000 bis 2018 über fast zwei Sonnenaktivitätszyklen hinweg ebenfalls das Erdmagnetfeld, die erdmagnetischen Stürme sowie das Weltraumwetter im erdnah verwirbelten Sonnenwind.

Die 2007 gestarteten fünf *THEMIS* (*Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms*) -Satelliten erforschen heute noch die Energiefreisetzungprozesse in der Erdmagnetosphäre, die darin häufiger aufeinanderfolgenden magnetischen Teilstürme sowie die magnetischen Phänomene, die verstärkte Polarlichterscheinungen auslösen. Die beiden 2012 gestarteten *Van Allen Probes* A und B untersuchen heute die Variabilitäten in den Van-Allen-Strahlungsgürteln. Seit 2015 sammeln die vier *Magnetospheric Multiscale Mission* (*MMS*) -Sonden gezielt und im Verbund Informationen zur Mikrophysik magnetischer Rekonnexionsprozesse, über Turbulenzen und Teilchenbeschleunigungsprozesse, die sich heute auch in vielen astrophysika-

lischen Plasmen im wesentlich weiter entfernten Universum immer wieder als von zentraler Bedeutung erweisen. 2013 wurden die drei *Champ*-Satelliten gestartet, um Multi-Point-Messungen des geomagnetischen Feldes durchzuführen. Durch diese Messungen lässt sich dessen zeitliche Entwicklung bestimmen, wodurch sich neue Einblicke in das Erdsystem, insbesondere auch in das Innere sowie das Klima der Erde, gewinnen lassen.

In den vergangenen fast 30 Jahren wurden die Entwicklung solarer Magnetfeldstrukturen von der Photosphäre bis zur Korona sowie die Entwicklung des Sonnenwindes in der inneren Heliosphäre bis teilweise in Erdnähe von einigen besonders leistungsfähigen Sonnensatelliten zunehmend höher aufgelöst registriert. Mit Hilfe des japanisch-amerikanischen *Yohkoh*-Satelliten konnten zwischen 1991 und 2001 das Verhalten der Sonnenkorona im Röntgenlicht untersucht und die magnetischen Aktivitäten im Zusammenhang mit Flare-Prozessen analysiert werden. Das *Solar and Heliospheric Observatory* (*SOHO*, Bild 4h) studiert die Sonne erfolgreich bereits seit 1995. *SOHO* registriert eine Vielzahl von Daten, die Auskunft sowohl über die Verhältnisse im Sonneninneren als auch über die vielfältigen Prozesse im magnetisch strukturierten Plasma innerhalb der gesamten Sonnenatmosphäre und der angrenzenden Heliosphäre geben. Mit diesem Satelliten konnten bereits die Flugbahnen von mehr als 1500 Kometen verfolgt und wertvolle Echtzeitdaten für die Vorhersage des Weltraumwetters gewonnen werden. Gestartet 1998, untersuchte der amerikanische *Transition Region and Coronal Explorer* (*TRACE*) zwei Jahre lang hochauflösend insbesondere die bogenförmigen koronalen Magnetfeldstrukturen in der Sonnenatmosphäre. Seit 1997 können mit dem *Advanced Composition Explorer* (*ACE*) die Beschleunigung und das Verhalten hochenergetischer Teilchen im Sonnenwind studiert werden. *Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager* (*RHESSI*) ist der Name des 2002 gestarteten NASA-Satelliten, dessen Messungen im Gammastrahlen- und angrenzenden Röntgenstrahlenbereich die Analyse hochenergetischer Aufheizungs- und Beschleunigungsprozesse im Verlaufe solarer Flares ermöglicht.

Mit Hilfe der beiden 2006 gestarteten *STEREO* A- und B-Satelliten (**Bild 4i**) des *Solar Terrestrial Relations Observatory* konnten bis 2014 teilweise stereoskopische, also dreidimensionale Aufnahmen solarer Eruptionen und massiver Sonnenwindstürme erstellt werden. Zurzeit besteht mit *STEREO* B zwar keine Verbindung mehr; mithilfe aktueller Daten des *STEREO* A-Satelliten gelingt aber weiterhin die Analyse der Entwicklung solarer magnetischer Feldstrukturen, des Sonnenwindplasmas bis in Erdnähe sowie einigermaßen verlässliche Vorhersagen des Weltraumwetters. Mit Daten des im gleichen Jahr gestarteten japanisch-amerikanisch-britischen Satelliten *Hinode* werden bis heute die Wechselwirkungen zwischen dem solaren Magnetfeld und dem Plasma der Sonnenkorona im sichtbaren und im extrem ultravioletten Licht sowie im Röntgenbereich untersucht. Im Rahmen des „Living with a Star (LWS)“ Programms der NASA erforscht das besonders leistungsfähige *Solar Dynamics Observatory (SDO, Bild 4j)* seit 2010 die zeitliche Veränderung der Sonnenatmosphäre räumlich und zeitlich hoch aufgelöst in verschiedenen optischen und ultravioletten Wellenlängen. Mit Hilfe der umfangreich zur Verfügung gestellten Daten dieses Satelliten werden die Entstehung des Sonnenmagnetfeldes in Dynamoprozessen, atmosphärische Heizungsprozesse, die Speicherung und Freisetzung magnetischer Energien sowie die Beschleunigungsprozesse des Sonnenwindes untersucht.

Im 2. Teil dieses Artikels, der in einer der folgenden Ausgaben dieser Zeitschrift erscheint, werden die beiden aktuellen Satellitenmissionen ausführlicher vorgestellt, die in den nächsten Jahren die Vorgänge in der äußeren Korona bzw. der inneren Heliosphäre vor Ort erforschen. Bis dahin liegen bereits erste wissenschaftliche Erkenntnisse der amerikanischen *Parker Solar Probe*-Mission (**Bild 3d**) vor, die in diesem zweiten Artikel im Detail diskutiert werden sollen. Anschließend wird über die *Solar Orbiter*-Mission der ESA berichtet, die im Februar 2020 gestartet werden könnte. Allgemeines Ziel dieser Mission ist die Beantwortung der Frage, wie die Sonne und der von ihr ausgehende Wind die Heliosphäre formt und im Verlaufe des solaren Aktivitätszyklus variabel strukturiert. Dafür wird

sich dieser Satellit im Laufe von sieben Jahren auf einem exzentrischen Orbit mit einer Neigung von bis zu 25% gegenüber der Ekliptik innerhalb der Merkurbahn der Sonne bis auf etwa 60 Sonnenradien (0,284 AE) nähern. Abschließend sollen die Möglichkeiten verlässlicher Weltraumwettervorhersagen erläutert sowie die herausragende Bedeutung der in der Heliosphäre der Sonne in situ gewonnenen, grundlegenden wissenschaftlichen Erkenntnisse für die gesamte astrophysikalische Forschung herausgestellt werden.

Literatur:

- [1] v. Kusserow, U.: Magnetischer Kosmos – To B or not to B. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2013; <https://ulrich-von-kusserow.de/index.php/buecher>
- [2] Obridko, V. N.; Vaisber, O. L.: On the History of the Solar Wind Discovery. Solar System Research, Pleiades Publishing Inc., 2017; https://www.researchgate.net/publication/315599688_On_the_history_of_the_solar_wind_discovery
- [3] Schwenn, R.; Schlegel, K.: Sonnenwind und Weltraumwetter. In: Spektrum der Wissenschaft, 2000; https://www2.mps.mpg.de/dokumente/publikationen/pa/pa_0107_weltraumwetter.pdf
- [4] MPS: Das Weltraumwetter und seine Auswirkungen, 1998; https://www2.mps.mpg.de/dokumente/publikationen/pa/pa_9809_weltraumwetter.pdf
- [5] Scherer, K.; Fichtner, H.: Das Klima aus dem All, 2007; www.pro-physik.de/details/articlePdf/1105283/issue.html
- [6] Heibel, K.: Das Weltraumwetter im Physikunterricht. Masterarbeit Humboldt-Universität zu Berlin, 2017; <http://www.aip.de/en/research/research-area-cmf/cosmic-magnetic-fields/solar-physics/optical-solar-physics/publications/constanze-heibel-master-thesis>
- [7] NOAA Space Weather Prediction Center: A Profile of Space Weather, 2010; https://www.swpc.noaa.gov/sites/default/files/images/u33/primer_2010_new.pdf
- [8] NOAA: Space Weather – Storms from the Sun; https://www.swpc.noaa.gov/sites/default/files/images/u33/swx_booklet.pdf
- [9] Amsif, K.: Sun, Heliosphere, Magnetospheres. National Centre for Space Studies, Paris 2016; https://sciences-techniques.cnes.fr/sites/default/files/drupal/201609/default/st_cospar_2016_soleil_heliosphere_magnetospheres.pdf
- [10] Scholarpedia: Solar Satellites, 2018; http://www.scholarpedia.org/article/Solar_Satellites

Bei **Wikipedia** finden sich außerdem geeignete deutsche (aber auch englische) Übersichtsartikel u. a. zu den Themenbereichen: „Sonne“, „Sonnenaktivität“, „Sonnenwind“, „Heliosphäre“ und „Weltraumwetter“ sowie über die unterschiedlichen heliosphärischen Satellitenmissionen.

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

ASTRONOMIE+RAUMFAHRT im Unterricht

Hervorgegangen aus der Fachzeitschrift
„Astronomie in der Schule“,
gegründet von Helmut Bernhard

REDAKTION

Friedrich Verlag GmbH

Dr. Jürgen Hamel (v. i. S. D. P.)
Nikolaus-Dierling-Str. 5, 18317 Saal
Telefon (03 82 27) 59 98 00
E-Mail: JuergenHamel@t-online.de
www.astronomie-und-raumfahrt.de

HERAUSGEBER- UND REDAKTIONSBEIRAT
Dr. Michael Geffert, Dr. Simon F. Kraus,
Dipl.-Päd. Peter Kriesel, Dr. Klaus Lindner,
Dr. Ilka Petermann, Dr. Ina Stricker,
Martin Reble, Prof. Dr. Oliver Schwarz,
Prof. Dr. Wolfram Winneburg

LEKTORIN

Sigrid Reppow

REDAKTIONSASSISTENZ

Katrin Franke, Telefon (0511) 40004-228
E-Mail: franke@friedrich-verlag.de

VERLAG

Friedrich Verlag GmbH,
Luisenstraße 9, 30159 Hannover,
www.friedrich-verlag.de

GESCHÄFTSFÜHRUNG

Hubertus Rölling

PROGRAMMLEITUNG

Kai Müller-Weuthen

ANZEIGENMARKETING

Bettina Wohlers
Adresse siehe Verlag
Telefon (05 11) 4 00 04-243
Telefax (05 11) 4 00 04-975
E-Mail: wohlers@friedrich-verlag.de

VERANTWORTLICH FÜR DEN ANZEIGENTEIL

Markus Brand (v. i. S. D. P.),
Adresse siehe Verlag

Anzeigenpreisliste gültig ab 01.01.2019

LESERSERVICE

Telefon: 0511 – 4 00 04-150
Telefax: 0511 – 4 00 04-170
E-Mail: leserservice@friedrich-verlag.de

REALISATION

Stefan Zielasko

DRUCK

Zimmermann Druck+Verlag GmbH,
Widukindplatz 2, 58802 Balve

ASTRONOMIE+RAUMFAHRT erscheint 6x jährlich für EUR 68,00 zzgl. Versand EUR 12,00. Die Mindestabodauer beträgt ein Jahr. Eine Kündigung ist schriftlich bis vier Wochen nach Erscheinen des letzten Heftes innerhalb des aktuellen Bezugszeitraums möglich, ansonsten verlängert sich der Bezug um weitere 12 Monate. Es gelten unsere aktuellen Allgemeinen Geschäftsbedingungen. Auslandspreise auf Anfrage. Bei Umzug bitte Nachricht an den Verlag mit alter und neuer Anschrift sowie der Kundennummer (siehe Rechnung). ASTRONOMIE+RAUMFAHRT ist zu beziehen durch den Buch- und Zeitschriftenhandel oder direkt vom Verlag. Bei Nichtlieferung infolge höherer Gewalt oder Störungen des Arbeitsfriedens bestehen keine Ansprüche gegen den Verlag.

© Beiträge sind urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte vorbehalten. Auch unverlangt eingesandte Manuskripte werden sorgfältig geprüft. Unverlangt eingesandte Bücher werden nicht zurückgeschickt. Die als Arbeitsblatt oder Material gekennzeichneten Unterrichtsmittel dürfen bis zur Klassenstärke vervielfältigt werden.

Nicht in allen Fällen war es uns möglich, den Rechteinhaber ausfindig zu machen. Berechtigte Ansprüche werden selbstverständlich im Rahmen der üblichen Vereinbarungen abgeklärt.

Best. Nr.: 536174; ISSN 1437-8641