

Die aktive Sonne, Kometen und Polarlichter

Unter magnetischem Einfluss

von Ulrich von Kusserow

Durch direkte Beobachtung mögliche Einblicke in die komplexen Strukturen der Sonnenkorona bei einer totalen Sonnenfinsternis, auf die langgestreckten Staub- und Gasschweife der vorbeiziehenden Kometen sowie auf die dynamisch sich entwickelnden farbenprächtigen Polarlichter faszinieren uns Menschen in besonderer Weise. Wer von uns weiß aber wirklich Genaueres über den so wichtigen Einfluss kosmischer Magnetfelder auf die Vielfalt der dabei ablaufenden physikalischen Prozesse? Internetlinks zu Videobeiträge im Anhang ergänzen die Aussagen der Abbildungen dieses Artikels in anschaulicher Weise mit Anregungen für den Schulunterricht.

Analog zum Begriff des irdischen Wetters, das die Ausprägung der Phänomene beschreibt, die den aktuellen, ortsabhängigen Zustand in den troposphärischen Atmosphärenschichten der Erde charakterisieren, kennzeichnet das Weltraumwetter die Phänomene, Verhältnisse und Veränderungen im interplanetaren Medium speziell in unserem Sonnensystem, die für uns Menschen vor allem im erdnahen Bereich von einigem Interesse sein können. Direkte Zeugen der Existenz, Ausprägung und Entwicklung des Weltraumwetters können wir Menschen werden, wenn wir die Sonnenkorona während einer totalen Sonnenfinsternis beobachten (**Bild 5**), die besonders langgestreckten und filigran strukturierten Plasmaschweife eines an der Sonne vorbeiziehenden Kometen bewundern (**Bild 1b**) oder wenn wir die dynamischen Strukturveränderungen besonders farbenprächtiger Polarlichterscheinungen (**Bild 1c**) verfolgen [1].

Wir Menschen besitzen zwar kein Sinnesorgan, das uns Magnetfelder direkt „sehen“ lässt. Wie dieser Artikel aufzeigen möchte, können wir aber zumindest indirekt Eindrücke von der Existenz und Wirkungsweise kosmischer Magnetfelder gewinnen. So lassen sich nicht nur die orts- und zeitabhängigen Veränderungen der Ausrichtung von Kompassnadeln im Erdmagnetfeld mit un-

serem Auge direkt verfolgen. Auch die zwischen Sonne und Erde zu beobachtenden Weltraumwetterphänomene zeigen uns deutlich den Einfluss magnetischer Prozesse für deren Entwicklung auf. So kann ein wesentlicher Einfluss solarer Magnetfelder anhand der speziellen Formgebung und Entwicklung der bei einem Koronalen Masseauswurf (**Bild 1a**) zu beobachtenden Strukturen vermutet werden. Auch die auffallend langgestreckt geradlinigen, gebündelten oder gewölbten Feinstrukturen, die in der Sonnenkorona während einer totalen Sonnenfinsternis, in kometaren Plasmaschweiften im interplanetaren Raum oder während der Entwicklung der Polarlichter in der Ionosphäre der Erde zu beobachten sind, sprechen deutlich für eine mögliche Einflussnahme solarer, heliosphärischer bzw. geologischer Magnetfelder.

Eigenschaften magnetischer Kraftfelder

Wir Menschen spüren die Kraft von Magneten sehr deutlich, wenn wir gleich- oder ungleichartige Pole von Stab- oder Hufeisenmagneten aufeinander zu bewegen, wenn diese sich dabei voneinander abstoßen bzw. anziehen. Dass magnetische Kraftfelder im Umfeld von Permanent- und Elektromagneten orts-

abhängig eine unterschiedliche Stärke aufweisen und als Vektorfelder zusätzlich auch durch eine jeweils spezielle Ausrichtung bzw. Orientierung charakterisiert sind, lässt sich leicht anhand der Verteilung von Eisenfeilspäne nachweisen (**Bild 2**).

Im Umfeld eines Stabmagneten gleichmäßig verteilt eingestreute Eisenfeilspäne ordnen sich in dessen Umgebung in sehr charakteristischer Weise um (**Bild 2a**). Das magnetische Feld dieses Permanentmagneten wirkt magnetisierend auf die Eisenteilchen und macht sie zu kleinen magnetischen Dipolen, die sich im Feld des Stabmagneten aneinandergereiht angenähert linienförmig orientiert ausrichten. Wie kleine Kompassnadeln geben ihre Ausrichtungen ortsabhängig auch die Ausrichtung des zugrundeliegenden dipolartigen Magnetfeldes an.

Im Gesamtbild lässt sich dessen Topologie anschaulich durch eine Vielzahl sogenannter magnetischer „Feldlinien“ beschreiben. Dort, wo viele dieser Linien eng beieinanderliegen, viele von ihnen ein normiert großes Flächenelement durchdringen, erweist sich die Flussdichte des magnetischen Vektorfeldes als besonders stark. Dort, wo nur wenige oder keine Linien sichtbar sind, ist die Stärke der Magnetflussdichte vergleichsweise wesentlich geringer. Auch wenn ein gezeichnetes Feldlinienbild mit relativ wenigen Feldlinien und größeren Lücken dazwischen es dem Beobachter anders suggerieren mag, gibt es natürlich in Wirklichkeit theoretisch unendlich viele solcher Feldlinien. Wie die Gravitationsfelder mit ihrem jeweils unendlich weit ausgedehnten Einflussbereich existieren auch die magnetischen Felder gemäß den Maxwellschen Gleichungen sehr weitreichend im Raumgebiet um permanente oder stromerzeugte Magneten.

In **Bild 2b** ist veranschaulicht, dass den magnetischen Feldlinien vereinba-

rungsgemäß eine Vorzugsorientierung zugeordnet wird, die den Weg eines fiktiven magnetischen Monopols mit einer isoliert existierenden Nordpolarität im Feld eines Magneten weist. Ein solcher Monopol würde vom Nordpol des Magneten abgestoßen, von dessen Südpol angezogen werden. Am Beispiel eines Hufeisenmagneten macht diese Abbildung aufgrund der Verteilung der Eisenatome deutlich, dass das dreidimensionale, überall im Raumgebiet um einen Magneten anzutreffende magnetische Feld, natürlich auch im Raum oberhalb des Magneten existent ist. Die magnetische Kraft des Hufeisenmagneten, die auf die aneinanderhängenden Eisenatome einwirkt, ist in nicht allzu großer Höhe über dem Magneten offensichtlich noch stark genug, um das Herunterfallen dieser Teilchen unter Einfluss der Gravitationskraft zu verhindern. Im inneren Bereich dieses Hufeisenmagneten sind die magnetischen Feldlinien weitgehend homogen verteilt, verlaufen nahezu geradlinig vereinbarungsgemäß vom Nord- zum Südpolbereich.

In **Bild 2c** ist die dipolartige Magnetfeldstruktur eines Elektromagneten, der durch Stromfluss durch eine mit einem Eisenkern versehene Spule wirksam wird, anhand der Verteilung der Eisenatome erkennbar. Diese ist vergleichbar mit der des Stabmagneten in **Bild 2a**.

Überall im Universum, insbesondere auch in der Sonne oder im Innern der Erde, werden Magnetfelder durch Dynamoprozesse, durch das Fließen elektrischer Ströme mehr oder weniger gut elektrisch leitfähiger Plasmamaterie oder flüssiger Metalle erzeugt. Stabmagneten oder durch das Fließen von Strömen in elektrischen Kabeln erzeugte Elektromagneten können hier aufgrund der hohen Temperaturen natürlich nicht existieren. In dem als Magnetohydrodynamik (MHD) bezeichneten Teilgebiet der Physik wird das Verhalten elektrisch leitender Fluide in magnetischen und elektrischen Feldern behandelt. Es war der schwedische Physiker *Hannes Alfvén* (1908–1995), der 1970 den Nobelpreis für „seine grundlegenden Leistungen und Entdeckungen in der Magnetohydrodynamik mit fruchtbaren Anwendungen in verschiedenen Teilen der Plasmaphysik“ erhielt. Er entwickelte erste Grundlagen zum tieferen Verständnis der Entstehung erdmagnetischer Stürme, von Polarlichtern sowie zur magnetisch vermittelten Kollimati-

on von Kometenschweif. Bereits 1943 hatte er in diesen Zusammenhängen auch das nach ihm benannte Theorem zur „Eingefrorenheit“ des Magnetflusses in unendlich gut elektrisch leitenden fluiden Medien entwickelt, wonach derartige Fluide und die in sie eingebetteten Magnetfelder gezwungen sein müssten, sich wie ineinander „eingefroren“ gemeinsam zu bewegen.

Natürlich können wir Menschen auch die überall im Weltall wirksamen Magnetfelder [2] nicht sehen. Wie schön wäre es aber doch, wenn es eine spezielle Brille gäbe, mit Hilfe derer man die Topologie, also den strukturellen Verlauf der Magnetfelder oder zumindest eine Vielzahl der diesen Verlauf charakterisierenden Feldlinien sichtbar machen könnte. Der bekannte deutsche Astrophysiker *Rudolf Kippenhahn* (1926–2020) hat 1990 in seinem populärwissenschaftlichen Buch mit dem Titel „*Der Stern, von dem wir leben – Den Geheimnissen der Sonne auf der Spur*“ die Grundlagen der Plasmaphysik und Magnetohydrodynamik anschaulich erläutert [3]. Unterstützt durch die eindrucksvollen Zeichnungen seiner Tochter Evi beschreibt er darin die wunderbaren Erlebnisse eines Herrn Meyer im Zirkus Plasmaland, der von einem Wissenschaftler eine Spezialbrille aufgesetzt bekommt, mit der er tatsächlich magnetische Feldlinien in dem mit Plasmamaterie durchsetzten und mit starken Magneten bestückten Zirkus direkt sehen kann (**Bild 3**).

Bild 3a zeigt Herrn Meyer beim Betrachten des Feldlinienverlaufs eines Hufeisenmagneten. **Bild 3b** veranschaulicht, wie die Magnetfelder, die in den im Kreis umlaufenden und von ionisierter Materie durchsetzten Clown bzw. Hund eingefroren sind, aufgewickelt und nach Umlauf in entgegengesetzter Richtung wieder homogen verteilt werden. Die mutige, von Magnetfeldern und elektrisch sehr gut leitfähigem Plasma durchsetzte Artistin (**Bild 3c**) muss im Zirkuszelt den Sprung in die Tiefe nicht fürchten, weil die magnetische Spannung eines starken Magnetfeldes sie wie ein gespanntes Gummiband vor einem Sturz auf den Boden schützt. Und ein tollkühner, ohne ein ihn durchdringendes Magnetfeld gesicherter Artist springt hinunter in ein homogenes Magnetfeld und wird darin aufgefangen, weil der innewohnende magnetische Druck des Feldes den freien Fall zum Glück erfolgreich stoppt (**Bild 3d**).

Leider verunglückt der Artist in **Bild 3e**, weil er die ihn eigentlich schützenden Magnetfelder beim Hinunterspringen unvorsichtigerweise allzu stark verdreht hat. Dadurch können in einem schmalen Raumbereich Magnetfeldkomponenten so aufeinandertreffen, dass sich gleichstark aber entgegengesetzt orientierte Feldkomponenten gegenseitig lokal auslöschen. Bei dem dadurch einsetzenden, als magnetische Rekonstruktion bezeichneten Prozess müssen sich die dadurch an dieser Stelle zerschnittenen Feldstrukturen instantan neu verbinden, da magnetische Feldlinien nach der allgemein gültigen Maxwell'schen Theorie anders als elektrische Feldlinien stets in sich geschlossenen sein müssen. Der Artist stürzt ab, weil die ihn durchdringenden geschlossenen Magnetfeldlinien nicht mehr mit dem Magnet hoch oben in der Zirkuskuppel verbunden sind.

Im Zuschauerraum kratzt sich ein älterer Herr am Kopf (**Bild 3f**). Die sein Haar durchlaufenden magnetischen Feldlinien werden dadurch in Schwingungen versetzt, die sich in Feldrichtung als sogenannte Alfvén-Wellen ausbreiten. Diese Wellen spürt auch das junge Mädchen, das in der vorderen Reihe sitzt. Sie glaubt fälschlicherweise, dass es der neben ihr sitzende junge Mann gewesen sein muss, der sie so zärtlich und liebevoll am Kopf berührt hat.

Solare Magnetfelder

Die im Kernbereich der Sonne in Fusionsprozessen erzeugte Energie wird durch die Strahlungszone durch elektromagnetische Strahlung in der im äußeren Drittel des Sonneninneren darüber liegenden Konvektionszone durch Konvektionsströmungen transportiert. Während die Strahlungszone weitgehend starr rotiert, sorgen die Rotation der Sonne, Temperaturgradienten, konvektive Turbulenzen, Corioliskräfte und Drehimpulstransportprozesse für sogenannte differenzielle Rotation mit orts- und zeitabhängigen Winkelgeschwindigkeiten bzw. für meridionale Zirkulation in der Konvektionszone der Sonne in meridionaler Ebene vom Äquator zum Pol nahe der Sonnenoberfläche und zurück am Boden der Konvektionszone.

Existierende Magnetfelder werden hier aufgrund hoher elektrischer Leitfä-

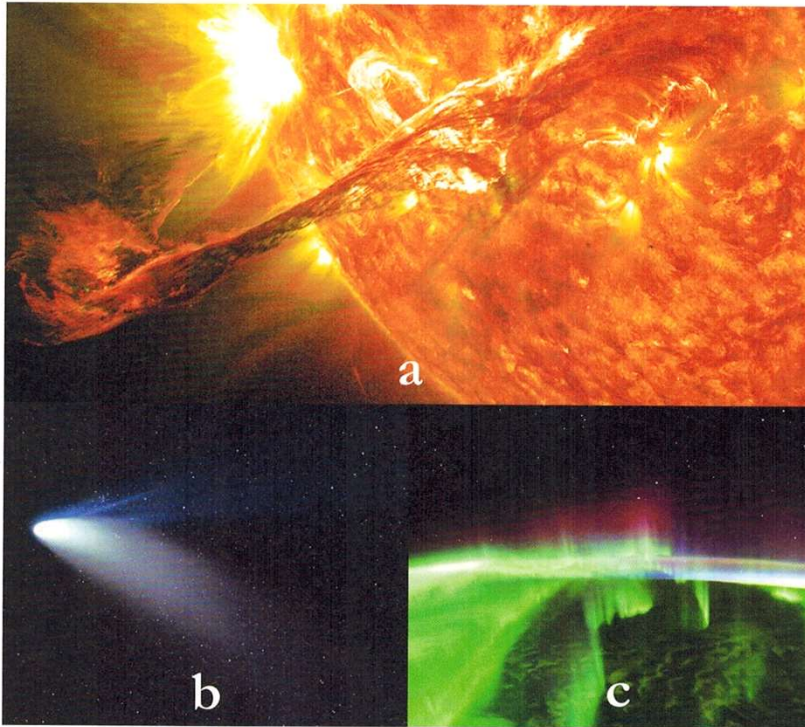
Bild 1	NASA SDO - Filament Eruption August 31, 2012 https://www.youtube.com/watch?v=nOfRWseCCs0 25 Jahre Hale-Bopp https://www.youtube.com/shorts/sd9NRW4wjqk Aurora over New Zealand https://www.youtube.com/watch?v=WDmNsX6Y2wo
Bild 2	Elektromagnetismus Experiment: Ausrichtung von Magneten https://www.youtube.com/watch?v=fWG-ZFgmMSg Elektromagnetismus Experiment: Eisenspäne im Magnetfeld https://www.youtube.com/watch?v=VdyKZy0xFyw Elektromagnetismus Experiment: Magnetfeld einer Spule, Eisenspäne https://www.youtube.com/watch?v=exozn6jPAkg
Bild 3	Plasmamaterie im Magnetfeld https://www.youtube.com/watch?v=zbPHmJVMsYw Eingefrorene Magnetfeldlinien https://www.youtube.com/watch?v=muAJOzi0JsM Magnetische Rekonnexionsprozesse in resistiven Medien https://www.youtube.com/watch?v=fyb3Ef_vSO4
Bild 4	Functional Principle of the Alpha-Omega Dynamo https://www.youtube.com/watch?v=jlKONnZb5Fo The Dynamic Solar Magnetic Field with Introduction https://www.youtube.com/watch?v=hH9u5ql0MGw A Decade of Sun https://www.youtube.com/watch?v=l3QQQu7QLoM Formation and Evolution of Magnetic Sunspot Groups https://www.youtube.com/watch?v=3A79qeHHmUI X3.1 flare, October 24, 2014 http://www.zam.fme.vutbr.cz/~druck/SDO/Pm-nafe/2014_10_24/0-info.htm Filament eruption, August 31, 2012 http://www.zam.fme.vutbr.cz/~druck/SDO/Pm-nafe/2012_08_31/0-info.htm Numerische Simulation zur Ausbreitung eines Interplanetaren Koronalen Masseauswurfs https://www.youtube.com/watch?v=1-QNd3150_c
Bild 5	Eclipse Photography Homepage Miloslav Druckmüller http://www.zam.fme.vutbr.cz/~druck/Eclipse/index.htm Total Solar Eclipse 2020, Argentina http://www.zam.fme.vutbr.cz/~druck/Eclipse/Ecl2020a/0-info.htm Wide-Field Imager for Parker Solar Probe (WISPR) https://wispr.nrl.navy.mil/ Numerical Simulation of an Interplanetary Coronal Mass Ejection. 2004 https://www.youtube.com/watch?v=1-QNd3150_c
Bild 6	Astrophotography Home page of Miloslav Druckmüller http://www.zam.fme.vutbr.cz/~druck/Astro/index.htm Comet NEOWISE seen from Earth and Space – You can see it too! https://www.youtube.com/watch?v=c1AiltGYewQ Astronomy Fun: Comet Lovejoy 2015 - Stargazing trip from Dallas, Texas to Atoka, Oklahoma https://www.youtube.com/watch?v=hY8CMGQ52Kk
Bild 7	Earth's Magnetism In Action https://svs.gsfc.nasa.gov/12249/ How do electrons close to Earth reach almost the speed of light? https://www.gfz-potsdam.de/en/press/news/details/how-do-electrons-close-to-earth-reach-almost-the-speed-of-light/ NASA Probing Secrets of Van Allen Radiation Belt https://www.youtube.com/watch?v=zsieKt3DI0A
Bild 8	THEMIS/ASI Nights – High Resolution https://svs.gsfc.nasa.gov/3590 Colliding auroras produce an explosion of light https://phys.org/news/2009-12-colliding-auroras-explosion.html Colliding Auroras (2008.02.29) https://www.youtube.com/watch?v=0HF5ey_ol-U
Bild 9	Extrem helles Polarlicht 10.10.2024 Deutschland – AURORA BOREALIS https://www.youtube.com/watch?v=djmc934niy8 Aurora Borealis - SEVERE G5 Geomagnetic Storm May 2024 https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=kWWECPp0MWY
Bild 10	Flares, Solare Eruption und Koronaler Masseauswurf https://www.youtube.com/watch?v=valfux6vTg8 Entstehung und Entwicklung der Kometenschweife https://www.youtube.com/watch?v=y9AQf-Jnh3l Erdmagnetosphärische Stürme und Polarlichter https://www.youtube.com/watch?v=0DTF8_A5iwM

Tabelle 1: Video- und Datenmaterial zu den Abbildungen dieses Artikels

higkeit wie eingefroren mit der strömenden Plasmamaterie mitbewegt. Vermittelt durch magnetische Induktion sorgen Dynamoprozesse dabei selbstorganisiert für eine fortlaufende Regenerierung pe-

riodisch im Verlauf von Aktivitätszyklen oszillierender solarer Magnetfelder für die Umwandlung kinetischer Energie in magnetische Energie ([4]). Bei dynamischen Prozessen in der strahlungsdomi-

nierten Sonnenatmosphäre bewirkt die Freisetzung der hier gespeicherten magnetischen Energie wieder für deren Umwandlung in Bewegungsenergien, wodurch effektive Heizvorgänge, die



1 „Augenzeugen“ des Weltraumwetters im magnetischen Sonnensystem. **a** Mit Kameras von Bord des Solar Dynamics Observatory (SDO) der NASA im UV-Licht gemachte Aufnahme eines am 31. August 2012 in der Sonnenatmosphäre ausgelösten gewaltigen Koronalen Masseauswurfs. **b** 1997 vom Erdboden aus erstellte Aufnahme des hellleuchtenden Halos um den Kern sowie der von diesem ausgehenden langgestreckten Gas- und Schweifstrukturen des Kometen Hale-Bopp. **c** „Tanzende“ Polarlichter, aufgenommen von der Internationalen Raumstation ISS aus. SDO/AIA NASA/GSFC, H. Leue, ESA/A. Gerst

Strömung von Plasmamaterie sowie die Beschleunigung hochenergetischer Teilchen bewirkt werden können.

Bild 4a zeigt eine Gesamtaufnahme der aktiven Sonne, die mit einer Kamera des Solar Dynamics Observatory (SDO) der NASA im ultravioletten Licht erstellt, und deren Qualität danach mit einem besonders leistungsfähigen, von *Miloslav Druckmüller* entwickelten Bildbearbeitungsprogramm optimiert wurde. Das dabei benutzte Filter lässt Licht der Spektrallinie mit der Wellenlänge 17,1 nm durch, das von ionisierten Eisenatomen (Fe IX) emittiert wird, die bei Temperaturen von etwa 600 000 °C bereits acht ihrer Elektronen verloren haben. Der Vergleich dieser beeindruckenden Aufnahme mit den Aufnahmen der Feldlinienstrukturen in Bild 2 lässt den Beobachter darauf schließen, dass die Sonnenaktivität entscheidend durch magnetische Prozesse beeinflusst sein muss.

Natürlich können Eisenfeilspäne den Verlauf der solaren Magnetfelder in der Millionen Grad heißen Sonnenkorona nicht nachzeichnen. Hier sind es die Fe IX-Ionen, die unter Einfluss der Lorentzkraft um die Magnetfeldlinien spiralförmig herum gyrieren, die ultraviolettes

Licht aussenden, und die so indirekt die komplexen Topologien solarer Magnetfeldstrukturen präzise skizzieren können. Magnetfelder existieren in der Sonnenatmosphäre natürlich überall. Aber nur dort, wo dichtere Plasmawolken mit genügend vielen elektrisch geladenen Teilchen vorhanden sind, und wo die Temperaturen sich als ausreichend hoch erweisen, können sich diese Felder im Licht der von Eisenionen ausgesandten Strahlung zu erkennen geben.

Bild 4b zeigt einen Ausschnitt aus einem solaren Aktivitätsgebiet mit auffallend dipolaren Magnetfeldstrukturen oberhalb dunkler Sonnenfleckpaare, die allerdings nur in optisch sichtbaren Wellenlängenbereichen deutlich sichtbar sind. Sogenannter magnetischer Austrieb hat dafür gesorgt, dass hier magnetische Flussröhren seeschlangengleich durch die Sonnenoberfläche stoßen. Nach dem Alfvén-Theorem der Eingefrorenheit magnetischer Feldlinien verhindern diese Magnetfelder das Einströmen heißen Plasmas im Bereich der Flecken. Dadurch ist es hier kühler, wodurch diese Fleckengebiete deutlich dunkler erscheinen.

Bild 4c veranschaulicht eine Vielzahl der in die Sonnenatmosphäre aufragenden

den magnetischen Feldstrukturen mit bogenförmigen Topologien im Umfeld solarer Eruptionen, wo in sogenannten Flares große Mengen an Energie freigesetzt werden und gewaltige Koronale Masseauswürfe (CME) erfolgen (siehe auch Bild 1a). Ausgelöst werden diese Aktivitäten immer wieder durch magnetische Rekonnexionsprozesse, durch die ursprünglich stabile Verhältnisse mehr oder weniger plötzlich instabil werden können. ([5],[6])

Die Korona und der Sonnenwind

Mit bloßem Auge kann der Beobachter bei einer totalen Sonnenfinsternis zumindest einen ersten Eindruck von den Verhältnisse in der inneren Korona der Sonne gewinnen, dabei vielleicht sogar auf den möglichen Einfluss magnetischer Felder schließen. Die von *Miloslav Druckmüller* und *Andreas Möller* während der Sonnenfinsternis 2020 in Argentinien erstellte Aufnahme (**Bild 5**, auf der 2. Umschlagseite) veranschaulicht die Topologien koronaler magnetischer Felder bis hinaus in einen Abstand von vier Sonnenradien oberhalb der Sonnenoberfläche. In Zeiten geringerer Sonnenaktivität, näher zum Sonnenfleckennminimum hin, erkennt man darauf typische strahlenförmige Magnetfeldstrukturen, die aus polnahen Gebieten im Bereich sogenannter Koronaler Löcher austreten, und entlang derer Teilchen des schnellen Sonnenwindes auf Geschwindigkeiten von bis zu 900 km/s durch Rekonnexionsprozesse, Turbulenzen oder magnetohydrodynamische Wellen beschleunigt werden können. ([7], [8], [9])

Rötlich eingefärbt heben sich die im Englischen als „*prominences*“ bezeichneten und von solaren Magnetfeldern gestützten Plasmawolken über dem verdeckten Sonnenrand hervor. Diese Protuberanzen sind durch helmförmige Magnetfeldstrukturen vor dem Aufstieg in die äußere Korona geschützt. Einsetzende magnetische Rekonnexion kann aber bewirken, dass hier plötzlich gewaltige Mengen an gespeicherter magnetischer Energie in Form sogenannter Flares freigesetzt werden. Infolgedessen wird zumindest ein Teil einer solchen Protuberanz instabil und es erfolgt ein Koronaler Masseauswurf hinaus in den Interplanetaren Raum (siehe auch **Bild 10a**). Im linken Teil der Abbildung

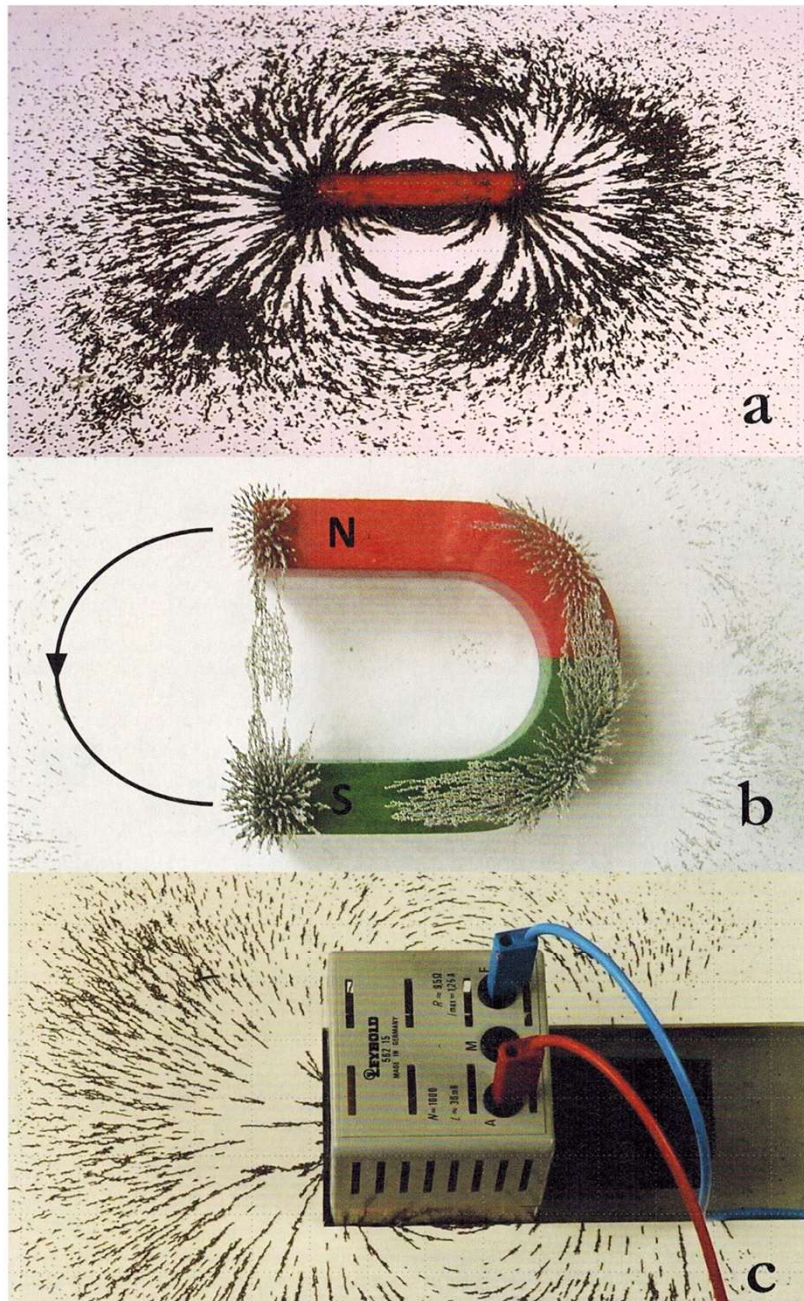
erkennt man typische großräumige Strukturen eines gerade stattfindenden Auswurfs einer solchen Plasmawolke. Die miteinander interagierenden Magnetfeldstrukturen in der Korona über den äquatornaher gelegenen Aktivitätsgebieten treiben den langsameren Sonnenwind mit typischen Geschwindigkeiten der Teilchen von bis zu 400 km/s.

Kometen und ihre Schweife

Asteroiden ähnliche Himmelsobjekte, die sich aus den äußeren kalten Bereichen des Sonnensystems, wo Wasserstoff- und Kohlenstoff-Verbindungen zu Eis werden, auf ihren elliptischen oder parabelförmigen Orbits der Sonne nähern, stellen ein Hindernis für den abströmenden magnetisierten Sonnenwind dar. Diese, aus Gas, Eis, Staub sowie lockerem, kohlenstoffhaltigem Gestein bestehenden, meist nur wenige Kilometer großen „schmutzigen Schneebälle“ werden als Kometen bezeichnet, um deren Kern herum sich eine durch Ausgasung erzeugte Millionen Kilometer große Koma ausbildet. Nähern sich diese Objekte der Sonne um mehr als zwei Astronomische Einheiten (AE), dann können sich besonders eindrucksvolle, 10 bis 500 Millionen Kilometer lange diffuse und leicht gekrümmte Staub- sowie wesentlich stärker gebündelte, geradlinig strukturierte Plasmaschweife ausbilden. In **Bild 6a** ist zu erkennen, dass der hellbräunlich leuchtende, unter Einfluss des solaren Strahlungsdrucks entstandene Staubschweif des Kometen NEOWISE aufgrund der Massenträgheit darin enthaltener, weitgehend ungeladener Partikel hinter der Bewegung des Kopfes des Kometen auf seinem Orbit um die Sonne zurückbleibt.

Die bläulich leuchtenden Plasmaschweife der Kometen besitzen demgegenüber eine Orientierung, die weitgehend entgegengesetzt zur Richtung zur Sonne weist. Dieser Schweif besteht aus positiven Molekül-Ionen, vor allem aus CO^+ , N_2^+ und CO_2^+ , die durch starke Sonneneinstrahlung ionisiert wurden. Für die bläuliche Farbgebung ist das CO^+ -Ion verantwortlich, das Photonen aus dem Sonnenlicht absorbiert und bei Wellenlängen von 420 nm im blauen Wellenlängenbereich des elektromagnetischen Spektrums wieder reemittiert.

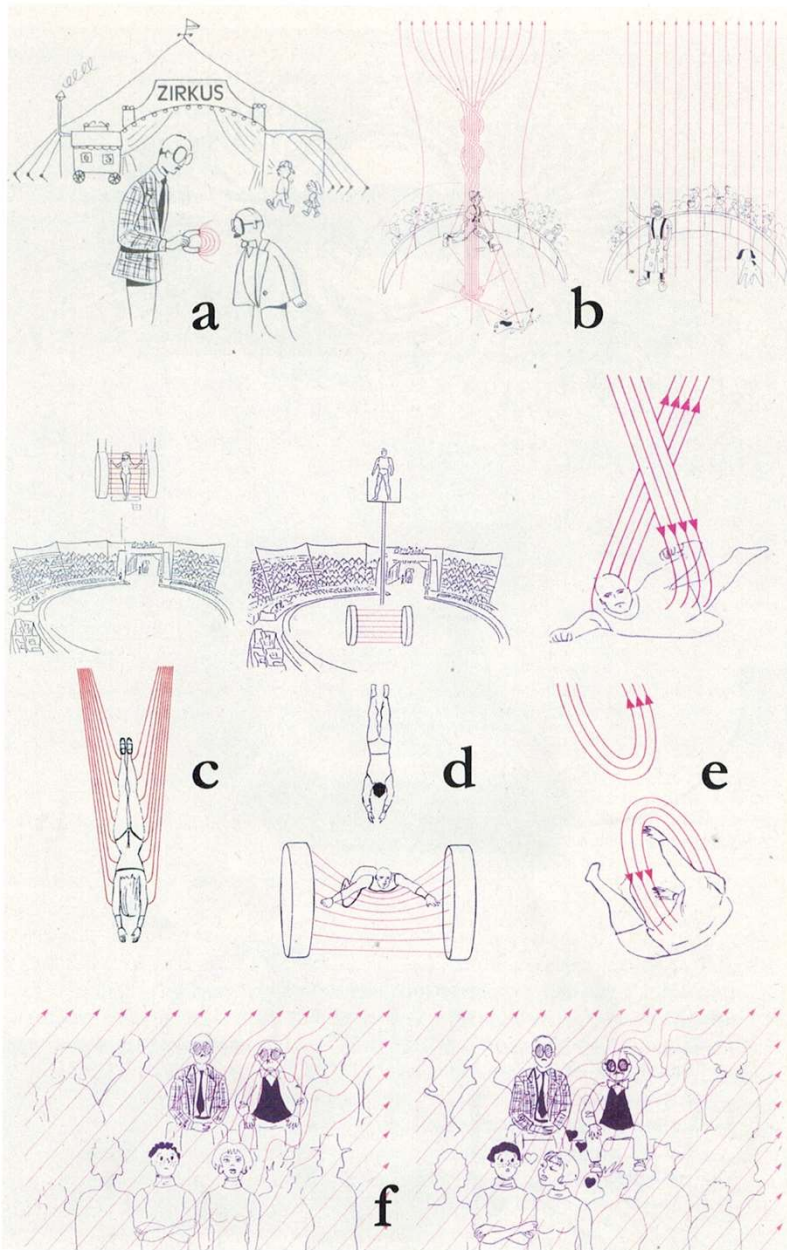
Bis in etwa zehn Sonnenradien Entfernung von der Sonnenoberfläche rotieren



2 Visualisierung der Ausrichtung und Stärke magnetischer Felder im Umfeld von Permanent- und Elektromagneten. **a** Dipolartige Ausrichtung und unterschiedliche Verdichtung der Eisenfeilspäne im Magnetfeld eines Stabmagneten. **b** Veranschaulichung der räumlichen Ausrichtung und Verteilung von Eisenfeilspänen im Magnetfeld eines Hufeisenmagneten. Magnetische Feldlinien werden vereinbarungsgemäß mit einer Ausrichtung vom Nord- (N) zum Südpol (S) eines Magneten versehen. **c** Dipolartige Ausrichtung der Eisenteilchen im Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule. Matthias Kohl (Hochschule Koblenz), U. v. Kusserow, Matthias Kohl (Hochschule Koblenz)

die hier noch relativ starken koronalen Magnetfelder, die außerhalb der Ekliptik im Wesentlichen radial nach außen verlaufen (siehe **Bild 5**, 2. Umschlagseite), weitgehend starr mit der Sonne mit und bestimmen die Bewegung der an sie gebundenen geladenen Teilchen. Weiter außerhalb, dort wo sich die magnetische Flussdichte zunehmend verringert, dominiert dagegen der Druckeinfluss der

Sonnenwindpartikel immer stärker gegenüber dem des magnetischen Feldes. Aufgrund ihrer Massenträgheit strömen die Partikel geradlinig nach außen ab, während sich die innere Sonnenkorona unter ihnen wegdreht. Die aufgrund ausreichend hoher elektrischer Leitfähigkeit in diese Materie wie eingefroren mitbewegten Magnetfeldlinien wickeln sich dadurch spiralförmig auf.



3 Herr Meyer im Zirkus Plasmaland. **a** Beobachtung magnetischer Feldlinien mit Hilfe einer fiktiven Brille, **b** Eingefrorenheit magnetischer Feldlinien in einem extrem gut elektrisch leitfähigen Medium. **c** Magnetische Spannung und **d** magnetischer Druck ermöglichen im Zirkus „Unmögliches“. **e** Magnetische Rekonnexion könnte für Artisten im „magnetischen Plasmazirkus“ gefährlich werden. **d** Magnetische Wellen bewirken „Fantastisches“. *Evi Kippenhahn/DIVA*

Wenn sich die Koma eines in große Sonnennähe vordringenden Kometen ausreichend stark aufgeheizt hat, können die Magnetfelder im Sonnenwind aufgrund des Prinzips der Eingefrorenheit nicht in sie eindringen. Diese magnetischen Feldstrukturen stauen sich dann vor dem Kometenkopf und falten sich um diesen herum unter Ausbildung eines sonnenabgewandten, langgestreckten magnetischen Schweifs. Geladene Ionen strömen dabei entlang der geradlinig ausgerichteten Magnetfeldlinien in den kometaren Magnetosphärenschweif ab. **Bild 6b** zeigt die besonders komplexe, langgestreckte Struktur des bläulichen Ionenschweifs des Kometen Lovejoy, dessen Kometenkern überraschenderweise einen Durchmesser von nur etwa 500 m aufweist. Wenn dabei Magnetfeldkomponenten entgegengesetzter Orientierung lokal aufeinandertreffen, kann es am Kometenkopf oder im Plasmaschweif zu Abrissen kommen. Ansätze solcher einsetzenden Instabilitäten lassen sich in dieser Abbildung im Zentralbereich des Kometenschweifs beobachten. (**Bild 10b**).

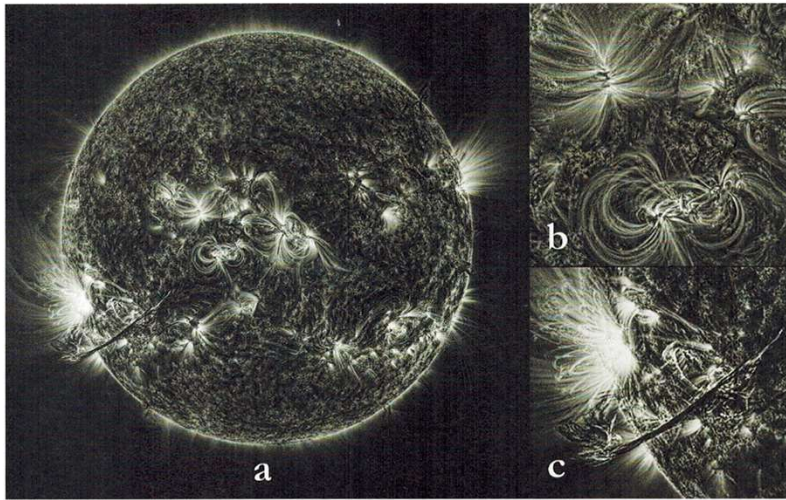
Wenn sich die Koma eines in große Sonnennähe vordringenden Kometen ausreichend stark aufgeheizt hat, können die Magnetfelder im Sonnenwind aufgrund des Prinzips der Eingefrorenheit nicht in sie eindringen. Diese magnetischen Feldstrukturen stauen sich dann vor dem Kometenkopf und falten sich um diesen herum unter Ausbildung eines sonnenabgewandten, langgestreckten magnetischen Schweifs. Geladene Ionen strömen dabei entlang der geradlinig ausgerichteten Magnetfeldlinien in den kometaren Magnetosphärenschweif ab. **Bild 6b** zeigt die besonders komplexe, langgestreckte Struktur des bläulichen Ionenschweifs des Kometen Lovejoy, dessen Kometenkern überraschenderweise einen Durchmesser von nur etwa 500 m aufweist. Wenn dabei Magnetfeldkomponenten entgegengesetzter Orientierung lokal aufeinandertreffen, kann es am Kometenkopf oder im Plasmaschweif zu Abrissen kommen. Ansätze solcher einsetzenden Instabilitäten lassen sich in dieser Abbildung im Zentralbereich des Kometenschweifs beobachten. (**Bild 10b**).

Beschleunigungsprozesse im Erdmagnetfeld

Dort, wo der Sonnenwind und die in ihm eingelagerten Magnetfelder, in Zeiten hoher Sonnenaktivität verstärkt auch unter Einfluss Interplanetarer Koronaler Masseauswürfe etwas schräg auf den erdmagnetischen Schutzkäfig treffen, wird die Ausbreitung magnetohydrodynamischer Wellen angeregt. Wie bei Kometen in großer Sonnennähe bildet sich auch im Fall der Erde, abgewandt von der Sonne, ein langgestreckter Magnetosphärenschweif aus. Insbesondere in polnahen Gebieten, dort wo die Feldlinien des im Innenbereich angenähert dipolartigen Erdmagnetfeldes zunehmend stärker geneigt zur Erdoberfläche austreten, können hochenergetische Sonnenwindpartikel entlang der Magnetfeldlinien tiefer in höhere Atmosphärenschichten vordringen. Dies kann auch im äquatorialen Bereich geschehen, wenn die Magnetfelder des Sonnenwindes zu bestimmten Zeiten in bestimmten Gebieten gleichstarke magnetische Flussdichten und vor allem Feldkomponenten mit einer entgegengesetzt orientierten Polarisierung im Vergleich zu der der erdmagnetischen Feldstrukturen aufweisen. Magnetische Rekonnexion sorgt dann dafür, dass sich magnetische Feldstrukturen öffnen, instantan neu verbinden, dadurch auch die Ausbildung der Schweifstrukturen bewirkt wird. Teilchen können bei diesen Prozessen stark beschleunigt werden und tiefer in die elektrisch geladene Ionosphäre der Erde eindringen.

Bild 7a (auf der 2. Umschlagseite) soll veranschaulichen, wie sich die aus dem Sonnenwind eingeschleusten oder durch Stoßprozesse vor Ort ionisierten elektrisch geladenen Elektronen und Ionen spiralförmig gyrierend um die Feldlinien der Magnetosphäre, gefangen in einer Art „magnetischen Flasche“ mit beidseitigen Öffnungen, hin- und her von Pol zu Pol bewegen. Wenn solche Teilchen bereits von Anfang an genügend kinetische Energie besitzen, oder sie in der Nähe der „Flaschenhälse“ zusätzlich noch beschleunigt werden, dann können sie bis in tiefere ionosphärische Bereiche vordringen und hier die besonders häufig anzutreffenden Sauerstoffatome oder Stickmoleküle dazu anregen, farbenprächtige Polarlichter zu erzeugen.

Es war der US-amerikanische Astrophysiker und Raumfahrtpionier *James*



4 Identifizierung komplexer Topologien der mit Plasmamaterie durchsetzten Magnetfeldstrukturen in der Sonnenatmosphäre in Aufnahmen des Solar Dynamic Observatory (SDO), die 2012 im Licht des achtfach ionisierten Eisens gemacht wurden. **a** Gesamtbild der magnetischen Sonne. **b** Ausschnitt aus einem solaren Aktivitätsgebiet mit Sonnenfleckengruppen, oberhalb derer dipolartige Magnetfelder in koronale Atmosphärenschichten aufragen. **c** Ausschnitt aus dem Bereich der im Umfeld der in Bild 1a abgebildeten Sonneneruption. Im Hintergrund sind eine Vielzahl bogenförmiger Magnetfeldstrukturen oberhalb von Sonnenfleckengruppen zu beobachten. NASA/SDO/AIA/M. Druckmüller (PM-NAFE)

Alfred Van Allen (1914–2006), der 1978 anhand der mit Hilfe des amerikanischen Satelliten Explorer 1 gewonnenen Daten nachwies, dass sich die besonders hochenergetischen Teilchen aus dem Sonnenwind sowie die von außerhalb des Sonnensystems eindringenden Teilchen der Kosmischen Partikelstrahlung verstärkt in speziellen Strahlungsgürteln in der inneren Region des Erdmagnetfeldes ansammeln (**Bild 7b** auf der 2. Umschlagseite). Der Innere Van-Allen-Gürtel enthält in 1000 bis 12.000 km Höhe über dem Erdboden hohe Konzentrationen von Elektronen mit Energien von Hunderten von keV sowie besonders energiereiche Protonen mit mehr als 100 MeV, die im hier relativ starken Magnetfeld gefangen sind. Der äußere Van-Allen-Gürtel, dessen Ausdehnung zwischen 13.000 bis 60.000 km Höhe in starker Abhängigkeit von der Sonnenaktivität schwankt, ist dagegen mit hochenergetischen Elektronen mit Energien zwischen 0,1–10 MeV gefüllt.

Unter anderem der ungewöhnlich starke Sonnensturm im Mai 2024 sorgte für Ausbildung eines dazwischenliegenden dritten Gürtels mit Teilchen, die ursprünglich aus dem äußeren Gürtel stammten und durch den Einfluss starker Interplanetarer Koronaler Masseauswürfe nach innen „gefedert“ wurden. **Bild 7b** veranschaulicht typische Partikelkonzentrationen in den Van-Allen-Strahlungsgürteln sowie die Flugbahnen ultrarelativistischer Elektronen, die durch Welle-Teilchen-Wechsel-

wirkungen mit sogenannten „Plasmasphärischen Zischwellen“ entlang magnetischer Feldlinien besonders stark beschleunigt werden können.

Immer wieder wird fälschlicherweise davon ausgegangen, dass die hochenergetischen Teilchen aus dem Sonnenwind und der Kosmischen Strahlung bereits so viel Energie besitzen, dass sie sehr direkt Atome zur Aussendung von Polarlichtern anregen können. In der Regel bedarf es dafür jedoch zusätzlicher Beschleunigung der in den Van-Allen-Gürteln gespeicherten Teilchen, insbesondere durch magnetische Rekonnexion, Plasma- oder magnetohydrodynamische Wellen. (**19**)

Polarlichter in der Ionosphäre der Erde

Mithilfe der Mission THEMIS (Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms) begann die NASA 2007 die Erforschung magnetischer Teilstürme, den Energiefreisetzungprozessen in der Erdmagnetosphäre, die auch für die Entstehung der Polarlichter von zentraler Bedeutung sind. Sie setzen dafür nicht nur fünf Satelliten ein, um die Turbulenzen, magnetischen Rekonnexions- und Beschleunigungsprozesse sowohl im sonnenzugewandten magnetischen Schutzkäfig als auch im Magnetschweif der Erde vom Weltraum aus zu erforschen. Mit Kameras von Bodenstati-

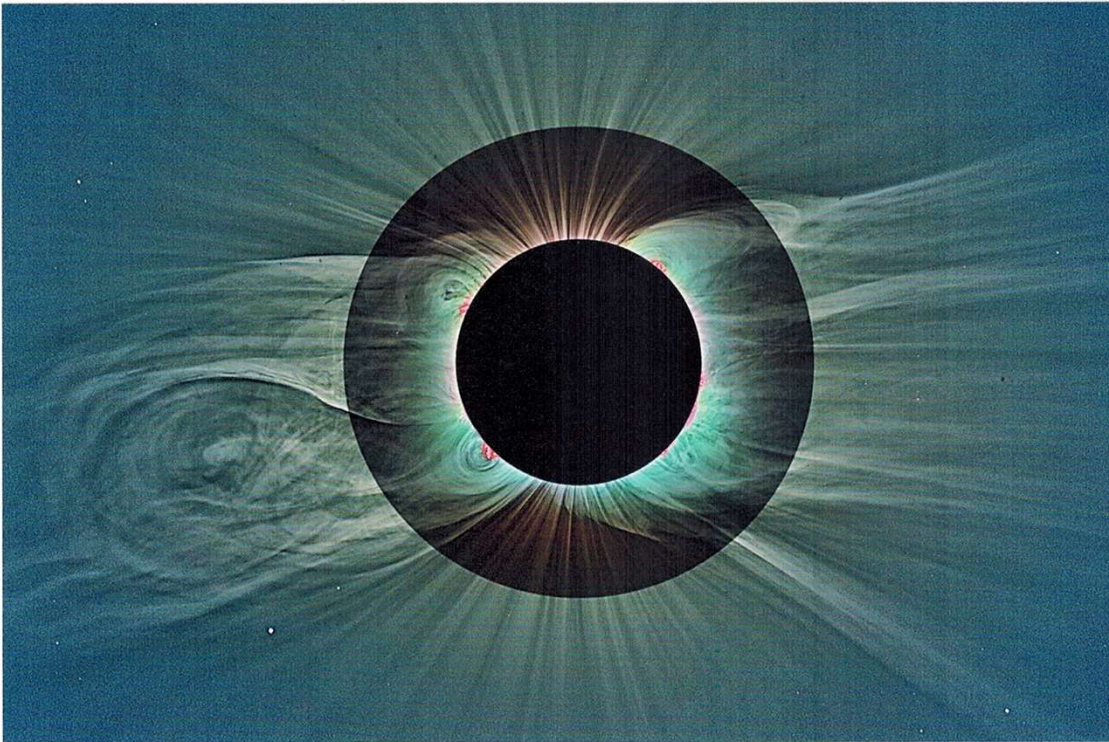
onen aus verfolgen sie darüber hinaus auch die zeitliche Entwicklung der von hier aus jeweils zu beobachtenden Polarlichterscheinungen (**Bild 8a**). Durch erdmagnetische Feldstrukturen geformte und gelenkte benachbarte Polarlichtbänder können sich offensichtlich aufeinander zubewegen, miteinander kollidieren und durch magnetische Rekonnexionsprozesse für besonders spektakuläre Leuchterscheinungen sorgen (**Bild 8b**).

Beschleunigte hochenergetische Teilchen können im Bereich des polnahen Polarlichtovals tiefer in die Ionosphäre der Erde eindringen, weil hier die Magnetfeldstrukturen fast senkrecht zur Erdoberfläche verlaufen. Sie haben in mittleren Höhen von 120 km über dem Erdboden genügend Energie, um Elektronen in Sauerstoffatomen auf ein Energieniveau anzuheben, von dem aus beim Rücksprung Photonen mit Wellenlängen von 557,5 nm emittiert werden, deren Emission der Beobachter als grünliches Licht registriert (**Bild 9a**).

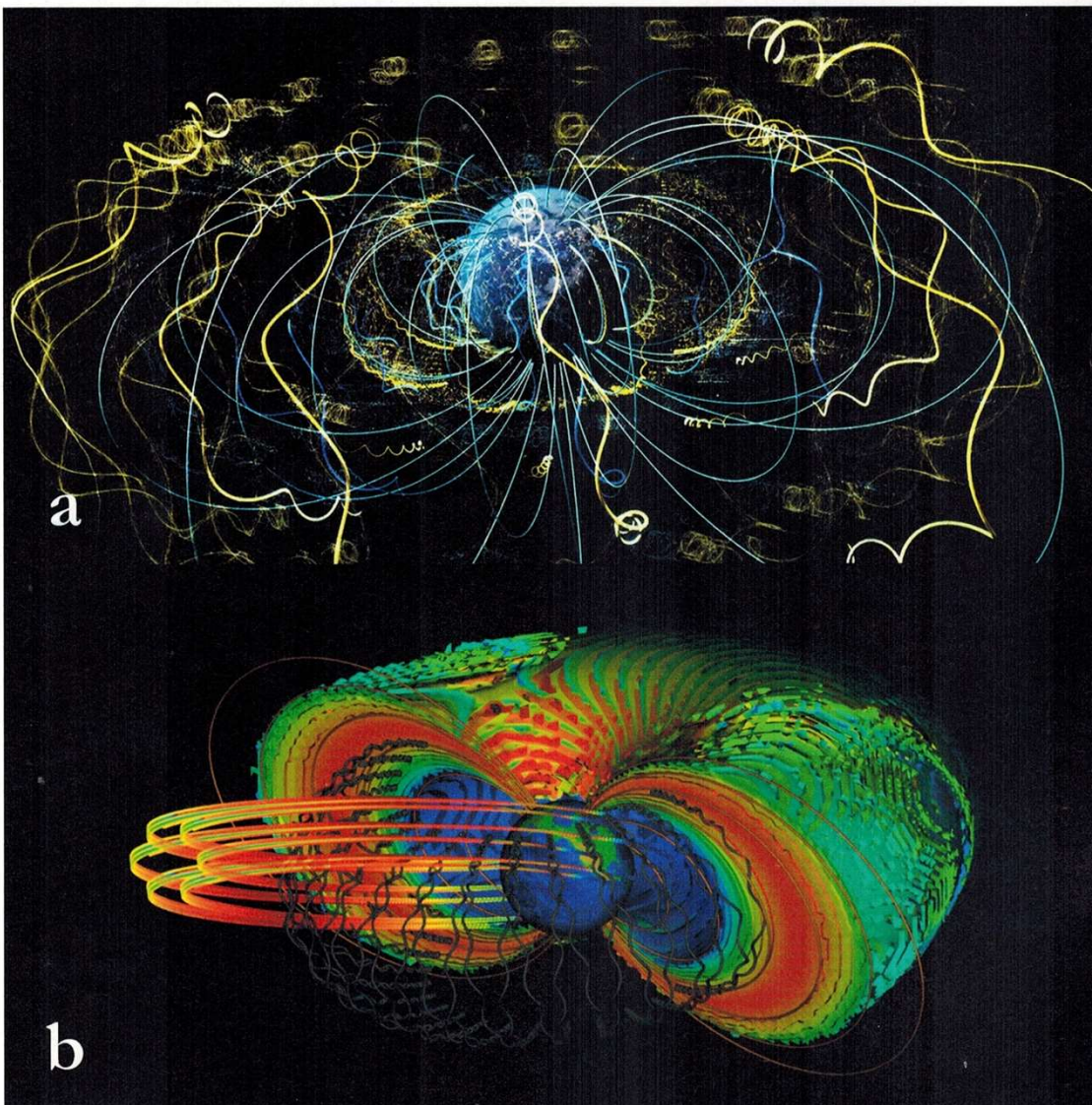
In zunehmend näher zum Äquator gelegenen Gebieten können Polarlichter sehr selten beobachtet werden, da die erdmagnetischen Feldstrukturen hier starke horizontale Komponenten aufweisen, so dass die Teilchen hier nicht genügend tief in die Ionosphäre eindringen können. Rekonnexionsprozesse im Magnetosphärenschweif können in Zeiten starker Sonnenaktivität allerdings dafür sorgen, dass dabei ausreichend beschleunigte Teilchen von der sonnenabgewandten Seite entlang im Schweif zusammengedrückter magnetischer Feldlinien zumindest in Höhen zwischen 240 und 320 km in die Ionosphäre vordringen können (siehe dazu **Bild 10c**). Diese Teilchen regen Sauerstoffatome zur Aussendung rötlichen Lichts bei Wellenlängen von 630 nm bzw. 636 nm an (**Bild 9b**). Magnetfelder und ionosphärische Stromsysteme sorgen dabei für unterschiedliche, jeweils sehr charakteristische Strukturierungen der Polarlichterscheinungen.

Modellvorstellungen zum Einfluss magnetischer Rekonnexion

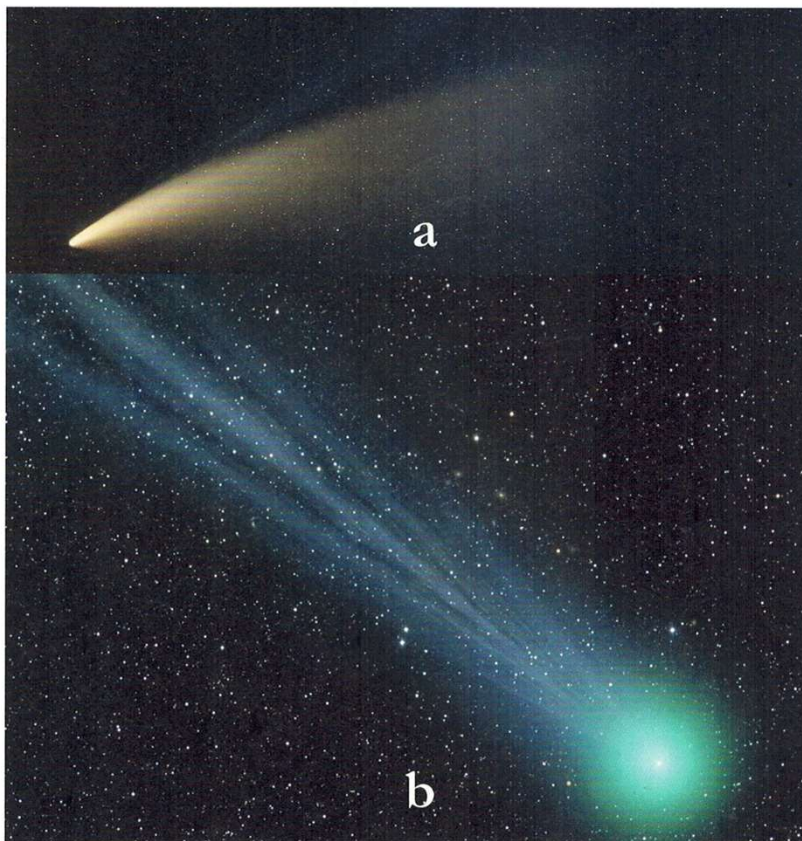
In **Bild 10** ist die Einflussnahme magnetischer Rekonnexionsprozesse auf solare Eruptionen in der aktiven Sonne, auf das Einsetzen von Instabilitä-



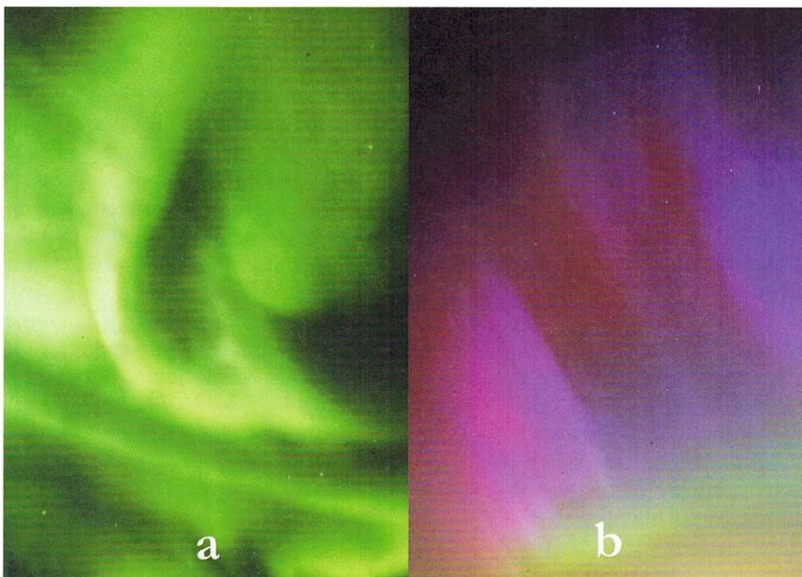
5 Blick in die Sonnenkorona, auf Koronale Masseauswürfe und den ausströmenden Sonnenwind während der totalen Sonnenfinsternis im Jahre 2020. In die Aufnahme integriertes rötlich und grünlich eingefärbtes Datenmaterial zeigt die Verteilung von 9-fach bzw. 13-fach ionisierten Eisenionen in der innersten Sonnenkorona. *M. Druckmüller/A. Möller*



7 Beschleunigung geladener Teilchen in der Erdmagnetosphäre. **a** Sonnenwindpartikel werden im erdmagnetischen Feld eingefangen, durch magnetische Lorentzkraft beschleunigt und auf Spiralbahnen um die Magnetfeldlinien gelenkt. **b** In dieser schematischen Abbildung veranschaulichen farbige Konturen die Intensitäten der Partikelkonzentrationen in den Van-Allen-Strahlungsgürteln der Erde. Graue Linien zeichnen typische Flugbahnen relativistischer Elektronen nach, konzentrische Kreislinien die der Flugbahnen wissenschaftlicher Satelliten, die diese für Satelliten und Menschen gefährliche Weltraumregion durchqueren. *NASA, I. Michaelis/Y. Shprits (GFZ)*



6 Langgestreckte Staub- und Gasschweife der Kometen. **a** Der 2020 mit bloßem Auge beobachtbare helle Komet NEOWISE C/2020 zeigt einen stark aufleuchtenden diffus verteilten Staubschweif sowie einen schwächer leuchtenden, geradlinig langgestreckten, filigraner strukturierten und von der Sonne weg gerichteten Gasschweif. **b** Der mit geladener Plasmamaterie gefüllte Schweif des 2015 beobachteten Kometen Lovejoy C/2014Q2 zeigt besonders langgestreckte Filamentstrukturen, die unter magnetischem Einfluss geformt werden. *M. Druckmüller, P. Aniol/M. Druckmüller*



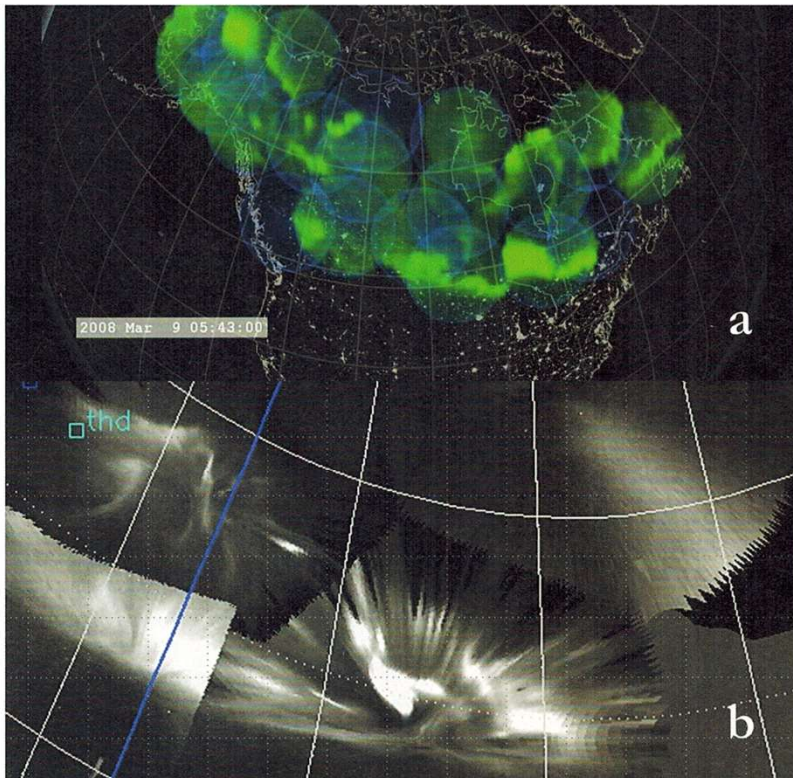
8 Polarlichter, die in der von Magnetfeldern durchsetzten Erdionosphäre durch Aussendung elektromagnetischer Strahlung von Sauerstoffatomen erzeugt wurden. **a** Die im finnländischen Enontekiö in Zeiten höherer Sonnenaktivität im März 2013 gemachte Aufnahme zeigt grünliche, unter erdmagnetischem Einfluss stark verwirbelte Polarlichterscheinungen, die in etwa 120 km Höhe erzeugt wurden. **b** Am 10. Mai 2024 konnte diese Aufnahme knapp zwei Tage nach einer gewaltigen solaren Eruption in Leipzig gemacht werden, auf der rötlich-pinke, in etwa 300 km Höhe entstandene Polarlichter in Gestalt eines „magnetischen“ Vorhangs zu sehen sind. Besonders hochenergetische Elektronen konnten dabei sogar tiefer in das Erdmagnetfeld vordringen und ermöglichten dort zusätzlich die Aussendung gelblich-grüner Polarlichter. *A. Hahmann/M. Heinrich*

ten in den Schweifstrukturen der Kometen sowie in der Magnetosphäre der Erde zur Veranschaulichung noch einmal skizziert.

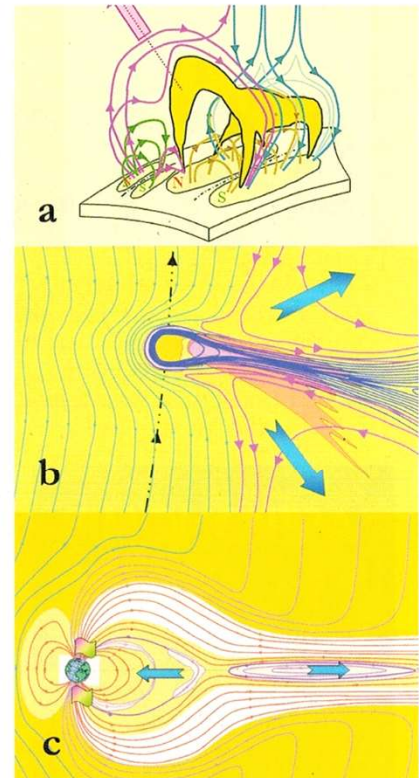
Bild 10a veranschaulicht, wie der Aufstieg einer magnetischen Flussröhre (Feldlinien farblich hellgrün kodiert) dafür sorgen kann, dass Rekonnexionsprozesse die helmförmigen Feldstrukturen (Feldlinien pink eingefärbt) instabil machen, die normalerweise den Aufstieg magnetisch gegenüber gravitativem Einfluss gestützter Protuberanzen durch die Einwirkung magnetischer Druck- und Spannkraftkräfte verhindern. Teile einer anfangs über lange Zeiträume stabil gelagerten magnetisierten Plasmawolke können dadurch aufsteigen. Häufiger erfolgt dabei ein Koronaler Masseauswurf hinaus in den interplanetaren Raum.

In **Bild 10b** wird gezeigt, dass in der Kometenkoma einsetzende Rekonnexion zu einem Abriss und schweifseitigen Auswurf der in ihr gestauten Feldstrukturen (pink eingefärbte Feldlinien) führen können, wenn die auf den Kometenkopf zuströmenden magnetischen Feldstrukturen im Sonnenwind ihre Polarität plötzlich geändert haben (hellgrün eingefärbte Feldlinien). Darüber hinaus kann es auch im Schweif des Kometen immer dann zu einem Abriss kommen, wenn sich die darin nahezu parallel zueinander, aber entgegengesetzt orientierten magnetischen Feldlinien, intern selbstorganisiert oder extern getriggert, allzu nahekommen.

Gleiches gilt auch für die Erdmagnetosphäre mit ihrem zur Sonne gewandten magnetischen Schutzkäfing sowie ihrem sonnenabgewandten langgestreckten Magnetosphärenschweif (**Bild 10c**). Ändert sich die Polarität der Magnetfelder im anströmenden Sonnenwind, kann magnetische Rekonnexion hier für den plötzlichen Abriss, das Umklappen und den Transport magnetischer Feldstrukturen in den Schweifbereich sorgen. Nicht nur verstärkte Polarlichterscheinungen in höheren geographischen Breiten im Bereich des üblichen Polarlichtovals sind dann die Folge. Durch das Zusammenpressen der Schweifmagnetfelder verstärkt sich darüber hinaus auch der magnetische Druck in den Schweiffeldern. Wenn hier Rekonnexionsprozesse einsetzen, werden zum einen Teilchen entlang erdmagnetischer Feldlinien beschleunigt, die in niedrigeren geographischen Breiten



9 Die Entwicklung von Polarlichtern über Nordamerika lässt sich von sogenannten All-Sky Imager (ASI) Bodenstationen aus mit 20 Kameras verfolgen. **a** Die Abbildung zoomt auf die Erde, veranschaulicht die Platzierung der Bodenstationen, ihre jeweilige Himmelsabdeckung sowie die zu beobachtenden, sich zeitlich dynamisch entwickelnden Polarlichtstrukturen. **b** Großskalige Vorhänge aus Polarlichtern können kollidieren und erzeugen unter magnetischem Einfluss spektakuläre Lichtausbrüche. NASA/GSFC Scientific Visualization Studio
A. Hahmann/M. Heinrich



10 Modellvorstellungen zum Einfluss magnetischer Rekonnexionsprozesse auf Weltraumwetterphänomene im Sonnensystem, **a** bei der Auslösung Koronaler Masseauswürfe, **b** von Abrissen und Energiedissipation in Kometenschweif und **c** beim Auswurf von Plasmoiden im Schweif der Erdmagnetosphäre sowie zur Teilchenbeschleunigung, die für die Erzeugung von Polarlichtern in niedrigeren geographischen Breiten erforderlich ist. U. v. Kusserow

in die Erdionosphäre eindringen können, wodurch Polarlichter erzeugt werden, die zeitweise sogar von Deutschland aus beobachtet werden können (siehe Bild 9b). Zum andern werden auch als Plasmoide bezeichnete Plasmawolken mit in sich geschlossenen Feldstrukturen in entgegengesetzter Richtung aus den Schweifstrukturen hinausgeworfen.

Der Themenbereich dieses Artikels über die aktive Sonne, Kometenschweife und Polarlichter eignet sich in besonderer Weise nicht nur aufgrund des hohen Motivationsgehaltes für eine fächerübergreifende Behandlung im Schulunterricht (Physik, Chemie, Geographie) sowohl im Sekundarbereich I als auch im Sekundarbereich II. Selbst im Primarbereich sind die Grundschüler sehr fasziniert, wenn sie Bilder und Filmsequenzen von beeindruckenden Sonnenfinsternissen, Kometen und Polarlichtern sehen. Viele Schüler möchten sicherlich gerne mehr über die Hintergründe dieser, von ihnen unter Umständen sogar persönlich selbst zu

beobachtenden großräumigen und dynamischen kosmischen Prozesse und über den „so anziehenden“ magnetischen Einfluss darauf erfahren. ([10], [11])

Literatur

- [1] von Kusserow, U., Marsch, E.: Magnetisches Sonnensystem – Solare Eruptionen, Sonnenwinde und Weltraumwetter. Springer-Verlag GmbH Deutschland 2023 <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-65401-9>
- [2] von Kusserow, U.: Magnetischer Kosmos – To B or not to B. Springer Spektrum 2013. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-34757-3>
- [3] Kippenhahn, R.: Der Stern, von dem wir leben – Den Geheimnissen der Sonne auf der Spur. Deutsche Verlags-Anstalt (DVA) 1990
- [4] von Kusserow, U., Mikelskis, H.: Vom Technischen Generator zum Kosmischen Dynamo – Elemente einer didaktischen Aufbereitung. 2002 https://ulrich-von-kusserow.de/images/Beitraege/Buecher/MagnetischesSonnensystem/Vom_Technischen_Generator_zum_Kosmischen_Dynamo_-_Elemente_einer_didaktischen_Aufbereitung_U_von_Kusserow.pdf
- [5] von Kusserow, U.: Kosmische Dynamos und magnetische Rekonnexionsprozesse (Teil 1) <https://ulrich-von-kusserow.de/index.php/artikel>
- [6] von Kusserow, U.: Kosmische Dynamos und magnetische Rekonnexionsprozesse (Teil 2) https://ulrich-von-kusserow.de/images/Beitraege/Artikel/ON262_10_Dynamos_2.pdf

- [7] von Kusserow, U.: Raumsonden erforschen das heliosphärische Weltraumwetter im Sonnenwind (Teil 1) ASTRONOMIE+RAUMFAHRT im Unterricht 174, 6/2019 https://ulrich-von-kusserow.de/images/Beitraege/Artikel/Raumsonden_erforschen_das_heliospharische_Weltraumwetter_im_Sonnenwind_Teil_1.pdf
- [8] von Kusserow, U., Marsch, E.: Raumsonden erforschen das heliosphärische Weltraumwetter im Sonnenwind (Teil 2) ASTRONOMIE+RAUMFAHRT im Unterricht 182, 2/2021 https://ulrich-von-kusserow.de/images/Beitraege/Artikel/Raumsonden_erforschen_das_heliospharische_Weltraumwetter_im_Sonnenwind_2_n.pdf
- [9] von Kusserow U.: Im Bann der Sonne – Der Sonneneinfluss auf die Erde. Interstellarum 2013 <https://www.interstellarum.de/wp-content/uploads/2019/12/isthema2013-1.pdf>
- [10] von Kusserow, U.: Lernen über Kosmische Magnetfelder – Zum Entwurf eines multimedial gestalteten astronomischen Curriculums (Teil 1) 2000 https://ulrich-von-kusserow.de/images/Beitraege/Buecher/MagnetischesSonnensystem/Lernen_ber_Kosmische_Magnetfelder_Teil_1_U_von_Kusserow.pdf
- [11] von Kusserow, U.: Lernen über Kosmische Magnetfelder – Zum Entwurf eines multimedial gestalteten astronomischen Curriculums (Teil 2) 2000 https://ulrich-von-kusserow.de/images/Beitraege/Buecher/MagnetischesSonnensystem/Lernen_ber_Kosmische_Magnetfelder_Teil_2_U_von_Kusserow.pdf

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