

HELIOPHYSIK

Ein Plasmalabor im Weltraum

Die komplexe Dynamik der Erdmagnetosphäre birgt noch viele ungelöste Rätsel.

Jörg Büchner, Karl-Heinz Glaßmeier und Joachim Saur

Die Magnetosphäre ist das vom Magnetfeld dominierte Gebiet um die Erde, das ein Plasma aus ionisierten Gasen der oberen Erdatmosphäre und Teilchen von der Sonne enthält. Die Wechselwirkung von „Sonnenwindplasma“ und Erdmagnetfeld gibt der Magnetosphäre ihre Gestalt. In ihr herrscht das Weltraumwetter, das sich unter anderem mit „magnetischen Stürmen“ und farbenprächtigen Polarlichtern bemerkbar macht. Wie dabei Energie freigesetzt wird, ist eine höchst schwierige Frage, denn im extrem verdünnten Plasma der Erdumgebung spielen nicht direkte Stoßprozesse die entscheidende Rolle, sondern ein komplexes Wechselspiel zwischen Teilchen und kollektiven Anregungen des Plasmas.

Carl Friedrich Gauß war es, dem es in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts gelang, zwischen den Anteilen des Magnetfelds, die aus dem Inneren der Erde stammen, und denen aus dem „Außenraum“ zu unterscheiden. Dafür entwickelte er die an der Erdoberfläche gemessenen Komponenten des Magnetfeldes nach Kugelfunktionen. Er kam zum Schluss, dass die Feldquellen im „Außenraum“ zu vernachlässigen seien – in Anbetracht der Genauigkeit seiner Messungen von 1838 eine völlig gerechtfertigte Einschätzung. Heute kennen wir die teilweise erheblichen und zeitlich stark variablen Stromflüsse als Quelle der Magnetfelder des „Außenraums“. Die damit einhergehenden Schwankungen des gemessenen Magnetfeldes bezeichnete bereits Alexander von Humboldt als „magnetische Ungewitter“. Diese Erscheinungen des „Weltraumwetters“ nennen wir heute Magnetstürme oder, bei schwächeren Störungen, Teilstürme.

Inzwischen wissen wir auch, dass die Sonne (zusammen mit einer Eigendynamik im „Außenfeld“ der Erde) für das Weltraumwetter verantwortlich ist. Als Richard C. Carrington, Pionier der Sonnenforschung, 1859 den Ausbruch eines Magnetsturms 15 Minuten nach dem Ausbruch einer Sonneneruption beobachtete, glaubten viele seiner Kollegen, darunter auch Lord Kelvin, nicht an einen solchen Zusammenhang. Erst um 1930 lieferten Sidney Chapman und Vincent Ferraro Theorien über die magnetische Wirkung der Sonne auf die Erdumgebung. Sie postulierten, dass die Sonne ein Gas negativ und positiv geladener Teilchen, also ein Plasma, aussendet. Beim Zusammentreffen mit dem Erdmagnetfeld würden in diesem, heute Sonnenwind



NASA

genannten Plasma Ströme erzeugt, die das Magnetfeld der Erde in seiner Fernwirkung begrenzen. Das magnetisch eingeschlossene Gebiet nannte der Astronom Tom Gold 1959 Magnetosphäre. Ihre direkte Erforschung mit Hilfe des ersten amerikanischen Satelliten Explorer 1 begann mit einem Paukenschlag: 1958 beobachtete James van Allen mithilfe eines Geiger-Müller-Zählrohrs an Bord Elektronen im MeV-Bereich. Diese Elektronen konzentrieren sich zwischen jenen Feldlinien des dipolartigen Erdmagnetfelds, die den Äquator zwischen drei und fünf Erdradien ($1 R_E = 6371 \text{ km}$) Entfernung schneiden. Die Form dieser Strahlungsgürtel erklärt sich aus der Besonderheit der Bewegung geladener

Polarlichter, auch Aurora Borealis genannt, sind wohl die schönste Ausprägung des Weltraumwetters.

KOMPAKT

- Plasmagefüllte Magnetosphären um Himmelskörper gehen mit zahlreichen physikalischen Phänomenen einher, die von fundamentaler Bedeutung für die Astro- und Plasmaphysik sind.
- Die Erdmagnetosphäre befindet sich im Mittel im Fließgleichgewicht mit dem Sonnenwind. Von Zeit zu Zeit wird sie instabil und entwickelt Magnetstürme durch Rekonnexion.
- Für die Dynamik der Magnetosphäre sind skalenübergreifende Prozesse von besonderer Bedeutung. Die Physik komplexer Weltraumplasmasysteme ist wegen der unmittelbaren Kopplung makro- und mikro-physikalischer Vorgänge in vielen Aspekten bis heute unverstanden.

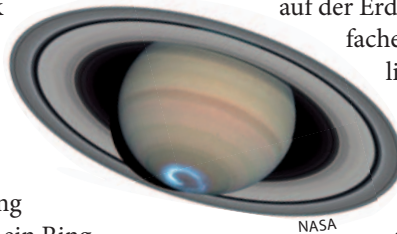
Prof. Dr. Jörg Büchner, Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, Max-Planck-Str.2, 37191 Katlenburg-Lindau; Prof. Dr. Karl-Heinz Glaßmeier, Institut für Geophysik und Extraterrestrische Physik, Mendelssohnstraße 2–3, 38106 Braunschweig; Prof. Joachim Saur, Institut für Geophysik und Meteorologie, Universität zu Köln, Albertus Magnus Platz, 50923 Köln

Teilchen in Magnetfeldern: Sie bewegen sich auf Spiralbahnen mit einem kleinen, dem so genannten Gyro- oder Larmor-Radius senkrecht zum Magnetfeld. Entlang des Dipolfelds werden die Teilchen durch das zur Erde hin anwachsende Magnetfeld immer wieder in den Weltraum zurückgeworfen. Das Zentrum ihrer Spiralbewegung driftet zusätzlich um die Erde herum. Die energiereichen Elektronen der Strahlungsgürtel bezeichnet man manchmal auch als „Killerelektronen“, da sie Astronauten und die Elektronik von Satelliten gefährden. Inzwischen wurde auch ein Gürtel energiereicher Ionen entdeckt, die sich in etwa sechs Erdradien (ca. 38 000 km) Entfernung langsam in zur Elektronendrift entgegengesetzten Richtung bewegen. Dadurch fließt um die Erde ein Ringstrom, der während geomagnetischer Stürme stark anschwillt und die charakteristischen Magnetfeldschwankungen hervorruft, die schon Humboldt beschrieb.

Elektronen etwas geringerer Energie verursachen auch die Polarlichter an der Erde wie an anderen Planeten (Abb. 1). Doch trotz direkter Satellitenflüge durch die vermuteten Beschleunigungszonen hindurch ist nicht restlos geklärt, welche Mechanismen die Teilchen in der Polarlichtzone, in den Strahlungsgürteln und im Ringstrom beschleunigen. Wie in den meisten Weltraumplasmen sind direkte Stöße zu selten, um die benötigten starken invarianten elektrischen Felder aufrechtzuerhalten.

Vakuum oder Plasma?

Neben den mehr oder weniger energiereichen Elektronen ist die Magnetosphäre vor allem aber mit Ionen solaren Ursprungs gefüllt, also vor allem mit Protonen und Alphateilchen (ionisiertes Helium). In geringerem Maße findet man ionisierten Sauerstoff und Helium,



NASA

► **Abb. 1** Auch beim Saturn lassen sich Polarlichter beobachten. Während diese auf der Erde oft nur etwa zehn Minuten dauern, können sie auf dem Saturn oft tagelang anhalten.

die aus der Atmosphäre der Erde stammen. Die Teilchendichten n in der Magnetosphäre sind außerordentlich gering und betragen zwischen 0,01 bis 1000 je cm^3 . Die Temperaturen der thermischen Ionen können allerdings bis auf $7 \cdot 10^7$ K steigen. Seltsamerweise und bis heute unverstanden ist das Elektronengas zumeist nur ein Siebtel so heiß. Wegen der geringen Dichte beläuft sich der thermische Druck in der Magnetosphäre nur auf 10^{-11} bis 10^{-6} Pa. Zum Vergleich: Der Gasdruck auf der Erdoberfläche ist um das 10^{11} bis 10^{16} -

fache höher. In keinem irdischen Labor ließe sich ein solches Vakuum erzeugen, wie es in der Magnetosphäre herrscht! Trotzdem spielt das Plasma der Magnetosphäre eine entscheidende Rolle in der Wechselwirkung der Erdumgebung mit der

Sonne und damit für das Weltraumwetter!

Plasmen sind Gase teilweise oder vollständig ionisierter Teilchen, deren Ladungen sich im Mittel ausgleichen. Hochtemperaturplasmen finden sich in Kerzenflammen oder in den Reaktoren der gesteuerten Kernfusion. Im Alltag kennt man die Niedertemperaturplasmen von Leuchtstofflampen und Plasmabildschirmen. Gegenüber Neutralgasen gewinnen Plasmen qualitativ neue Eigenschaften dadurch, dass die freien Ladungsträger das Coulomb-Potential abschirmen, während Magnetfelder ihre Reichweite behalten. Die nach Peter Debye genannte Abschirmlänge λ_D ist in der Debye-Hückel-Theorie der elektrostatischen Wechselwirkungen als die Entfernung von einem Ladungsträger definiert, über die das Potential seines elektrischen Feldes durch die gemeinsame Wirkung des Gemischs positiver und negativer Ladungsträger auf das $1/e$ -fache ($e = 2,718 \dots$) abfällt. Von einem Plasma spricht man allerdings erst, wenn die geometrische Abmessung des Gemischs positiver und negativer Ladungen die Debye-Länge deutlich übersteigt und wenn gleichzeitig die Anzahl der geladenen Teilchen in einem Volumen mit der Abmessung einer Debye-Länge sehr groß ist. Darüber hinaus spielt die Frequenz der Eigenschwingungen des Elektronengases ω_{pe} eine wichtige Rolle in Plasmen. Insbesondere ist die Zeit zwischen zwei direkten Stößen der Ladungsträger in Weltraumplasmen lang gegenüber der Periode der Plasmaoszillationen ω_{pe}^{-1} .

Das Besondere an Weltraumplasmen wie dem der Magnetosphäre ist, dass die Debye-Länge aufgrund der geringen Dichte und der hohen Temperaturen hunderte von Metern betragen kann. Dadurch ist die Anzahl von Teilchen in einer Kugel mit dem Radius einer Debye-Länge trotz der geringen Dichte des Plasmas immer noch groß genug, um das Plasmakriterium zu erfüllen. Bei $\lambda_D = 100$ m und $n = 1 \text{ cm}^{-3}$ befinden sich immerhin noch 10^{12} Teilchen in einer Debye-Kugel! Weiterhin ist aber auch die freie Weglänge zwischen zwei direkten Teilchenstößen $l = \epsilon_0^2 k_B^2 T^2 / ne^4$ in der Magnetosphäre wie in den meisten Weltraumplasmen weit größer als die Debye-Länge. Das Weltraumplasma ist also stoßfrei, es verliert die Eigenschaft seiner Granulation, seiner Körnung durch die Teilchen.

PLASMAWELLEN

In Plasmen können sich auf Grund der auf die geladenen Teilchen wirkenden (elektromagnetischen) Rückstellkräfte gegenüber Neutralgasen eine ganze Reihe zusätzlicher Wellentypen ausbreiten. Zu den gewöhnlichen Schallwellen kommen die **Ionenschallwellen** sowie die **Langmuir-Wellen** im Elektronengas hinzu. In durch Magnetfelder anisotropen Plasmen erhöht sich die Zahl der möglichen Wellenmoden weiter. So wurden in der Magnetosphäre die durch gyrierende Elektronen bedingten **Pfeifwellen** (engl. „Whistler“) entdeckt.

Ein Meilenstein war die Ableitung (1942) der heute nach ihm benannten magnetischen Wellen (**Alfvén-Wellen**) durch Hannes Alfvén (Nobelpreis 1970), die ohne die in Schallwellen übliche Gaskompression auskommen und nur

auf der Rückstellkraft der Verscherung des ins Plasma eingefrorenen Magnetfelds beruhen. Ihre typische Ausbreitungsgeschwindigkeit, die **Alfvén-Geschwindigkeit**, hängt vom Magnetfeld B und der Plasmadichte n ab ($V_A = B / \sqrt{\mu_0 M n}$, M ist die Masse eines Ions). Neben diesen gibt es schnelle und langsame **Magnetschallwellen**, je nachdem, ob die aufgebaute magnetische Spannung die Rückstellkraft des Plasmas eher verstärkt oder verringert. Der im Weltraum typischerweise sehr große Plasmameter führt dazu, dass neben den magnetohydrodynamischen Wellen auch kurzwellige **kinetische Wellenmoden** wichtig werden, was zu resonanten Welle-Teilchen-Wechselwirkung führen kann.

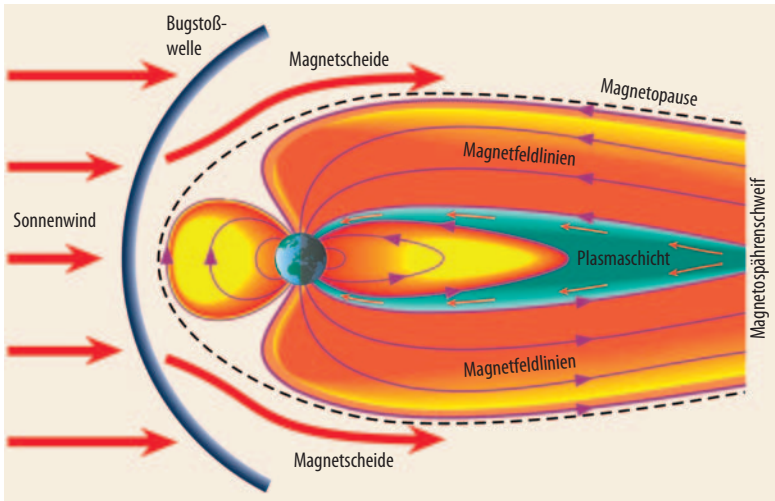


Abb. 2 Der Aufbau der Erdmagnetosphäre: Der mit Überschallgeschwindigkeit anströmende Sonnenwind wird zunächst in der Bugstoßwelle auf Unterschallgeschwindigkeit abgebremst. Das Erdmagnetfeld der Erde lenkt den abgebremsten magnetisierten Sonnenwind in der Magnetscheide fast vollständig entlang der Magnetopause (gestrichelte Linie) um den Planeten herum. Der Magnetosphärenscheif ist mit einigen Magnetfeldlinien angedeutet. Die Strahlungsgürtel bevölkern die innere Magnetosphäre, drei bis fünf Erdradien von der Oberfläche entfernt.

Mit wachsendem Plasmaparameter $n\lambda_D^3$ treten die für Teilchen charakteristischen Stöße immer stärker in den Hintergrund. Schließlich nimmt das Plasma Eigenschaften einer Flüssigkeit an. Ein kritisches Problem der Weltraum-Plasmaphysik ist es, den fließenden Übergang zwischen Teilchen- und Flüssigkeitsaspekten adäquat zu berücksichtigen. Nur in einfachen Fällen sind rein magnetohydrodynamische Beschreibungen möglich, und nur in kleinen Raumbereichen und über kurze Zeiten sind konsequent kinetische (mikroskopische) Beschreibungen analytisch auswertbar, numerische Simulationen werden notwendig. Da direkte Teilchenstöße in weiten Raumbereichen praktisch vernachlässigbar sind, ist Weltraumplasma in der Regel auch ideal elektrisch leitfähig, invariante elektrische Felder sind in diesem Fall kurzgeschlossen. Daraus ergibt sich, dass das elektrische Feld auch in einem mit der Geschwindigkeit U bewegten System verschwinden muss. Aus den galileischen Transformationseigenschaften elektromagnetischer Felder ergibt sich:

$$\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \mathbf{U} \times \mathbf{B} = 0.$$

In der Magnetohydrodynamik nennt man diese Gleichung das „Ohmsche Gesetz idealer Plasmen“. Anschaulich gesagt hat es zur Folge, dass das magnetische Feld in das Plasma „eingefroren“ ist, sozusagen fest am Plasma „klebt“, magnetischer Fluss kann sich nur gemeinsam mit ihm bewegen. Würde dies überall gelten, könnten die durch vielfältige Bewegungen im Weltall angehäuften magnetischen Spannungen und die entsprechenden Energien niemals irreversibel freigesetzt werden. Wenn diese Gleichung lokal verletzt wird, kommt es zur „magnetischen Rekonnexion“ (siehe nächsten Abschnitt). Ein quantitatives Maß für die elektrische Idealität eines Plasmas ist die magnetische Reynolds-Zahl $Re_m = \mu_0 U L / \eta$. Sie vergleicht eine typische Plasmaflussgeschwindigkeit (U) mit einer typischen linearen Skala (L) und dem Widerstand (Resistivität η). μ_0 ist die magnetische Permeabilität des Vakuums. In den meisten Teilen der Magnetosphäre gilt $Re_m \gg 1$.

Trotz der weitgehend fehlenden „Körnigkeit“ ihres Plasmas ist die Magnetosphäre aber strukturiert. Eine Fülle von Satelliten-Missionen enthüllte dies nach und

nach (Abb. 2). Unter anderem stellte sich heraus, dass der Sonnenwind fast vollständig um die Erde herumgelenkt wird. Es blieb lange Zeit unklar, wie eine dünne Grenzschicht wie die Magnetopause den strömenden Sonnenwind abschirmen kann – dies lässt sich nicht durch eine Flüssigkeitstheorie beschreiben. Als dieses Problem durch kinetische Theorien geklärt war, lautete die zentrale Frage: Wie gerät das solare Plasma ins Innere der Magnetosphäre?

Um dies zu klären, wurde das internationale Projekt OPEN (Origin of the Plasma in the Earth's Neighbourhood) ins Leben gerufen, in dessen Rahmen eine ganze Armada von Satelliten gestartet werden sollte, um koordiniert der Frage nach der Wechselwirkung von Sonne und Magnetosphäre nachzugehen. Die 1977 begonnene Doppel-Satelliten-Mission ISEE 1 und 2 (International Sun-Earth Explorer) ermöglichte es erstmals, bei geeigneter Ausrichtung und Abstand der Satelliten, wenigstens teilweise, räumliche Strukturen von zeitlichen Variationen zu trennen. Damit fand man unter anderem heraus, dass sich in der Magnetopause „Löcher“ bilden, durch die sowohl solares Plasma und Teilchen eindringen als auch magnetosphärisches Plasma in das interplanetare Medium verloren gehen kann. All dies ist in einem ideal leitfähigen Plasma nicht möglich.

MISSIONEN

- Die ESA-Mission **Cluster II** (Cluster I wurde durch einen Raketenfehlstart 1996 zerstört) besteht aus vier identischen Satelliten, die es seit 2000 erstmals ermöglichen, die räumlichen von den zeitlichen Variationen der Magnetosphäre zuverlässig zu trennen [1]. <http://sci.esa.int/cluster/>
 - **Double Star**, ein europäisch-chinesisches Gemeinschaftsprojekt, besteht aus zwei Satelliten, die 2003 bzw. 2004 gestartet wurden. Double Star unterstützt die Messungen von Cluster und erkundet insbesondere den Schweif der Erdmagnetosphäre. www.esa.int/esaSC/120381_index_0_m.html
 - Die NASA-Mission **THEMIS** (Time History of Events and Macroscale In-
- teractions during Substorms) besteht aus fünf Satelliten, die ab 2007 klären sollen, wie die heftigen Ausbrüche der Aurora während Teilstürmen in der Erdmagnetosphäre entstehen. www.nasa.gov/themis
- Die ESA-japanische Weltraummission BEPI COLOMBO soll ab 2013 die sich von der Erde wesentlich unterscheidende Magnetosphäre des Planeten Merkur erforschen. sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareid=30
 - Um die Erdmagnetosphäre simultan auf unterschiedlichen Größenskalen untersuchen zu können, plant die NASA die Mission **MMS** (Magnetospheric Multiscale Mission) <http://mms.space.swri.edu>

Rekonnexion – Durchbruch im Magnetfeld

Damit Teilchen aus dem Sonnenwind in die Erdmagnetosphäre eindringen können und sie Energie aus dem Sonnenwind akkumulieren kann, um sie in unregelmäßigen Abständen im Verlaufe von Magnetstürmen wieder freizusetzen, muss die Magnetopause und das Magnetosphärenplasma zumindest zeitweise lokal nicht-ideal, also endlich leitfähig werden. Dies kann durch ein endliches invariantes $E' = \eta j$ mit dem Widerstand η und der Stromdichte j geschehen. In diesem Fall wird das Magnetfeld resistiv von der Plasmabewegung gelöst. Während η in dichten Plasmen mit moderatem Plasmaparameter $n\lambda_D^3$ durch Teilchenstöße hinreichend groß werden kann, reichen Stöße in Weltraumplasmen mit sehr großem $n\lambda_D^3$ nicht aus. Auf die mikrophysikalischen Ursachen für endliche invariante elektrische Felder in stoßfreien Plasmen werden wir im Abschnitt „Turbulenz statt Stöße“ näher eingehen. Stark vereinfacht lassen sich Durchbrüche des Sonnenwinds durch die Magnetopause mit dem Modell einer zweidimensionalen magnetischen Rekonnexion beschreiben (Abb. 3a): Von rechts und links strömt Plasma langsam auf die Magnetopause und ihren Schichtstrom ein. Dabei ist das Magnetfeld in das zunächst noch ideale Plasma eingefroren. Im rot gezeichneten zentralen Bereich der Stromschicht wird das Plasma plötzlich nichtideal. Dadurch kann das nun nicht mehr mit dem Magnetfeld verbundene Plasma durch die Trennlinien zwischen topologisch verschiedenen Magnetfeldern, „Separatritzen“, im Bild gestrichelt, hindurchdringen. Wenn das Plasma danach wieder ideal wird, befindet es sich in einem schmalen Kanal (orange). Neu eingefroren ist ein stark gespanntes Magnetfeld, wie man an der Krümmung der neuen Magnetfelder ober- und unterhalb des X-förmigen Kreuzungspunkts der Separatritzen sieht. Das wieder ideal leitfähige Plasma ent-

spannt nun gemeinsam mit dem Magnetfeld, wobei es wie in einer Düse beschleunigt wird. Dabei kann es seine Grenzgeschwindigkeit, die Alfvén-Geschwindigkeit (siehe Kasten „Plasmawellen“) erreichen, häufig viele Tausend Kilometer je Sekunde, um Größenordnungen schneller als die Einstromgeschwindigkeit.

Obwohl Rekonnexion im realen, dreidimensionalen Raum anders verläuft (Abb. 3b), zeigt schon das einfache zweidimensionale Modell ihre wesentliche Besonderheit: Langsam durch Strömung in idealen Weltraumplasmen angehäuften magnetischen Spannungen entladen sich durch das Aufkommen kleiner nichtidealer Gebiete in Plasma- und Teilchenbeschleunigung sowie Heizung. Anders als die langsame, diffusive Stromdissipation kann Rekonnexion akkumulierte magnetische Spannung mit einem Schlag und äußerst effektiv umsetzen – im Labor gefürchtet sind Plasmaexplosionen durch Rekonnexion! Im Weltall beschleunigt Rekonnexion Teilchen auf relativistische und Plasmen auf Alfvén-Geschwindigkeit.

Offen ist bis heute die Frage nach der Rekonnexion in der realen, dreidimensionalen Welt. Die Struktur und Topologie der Rekonnexion in drei räumlichen Dimensionen unterscheidet sich wesentlich, topologisch, von der im zweidimensionalen Modell. Erste plasmakinetische numerische Simulationen in drei räumlichen Dimensionen [2] ergaben eine mögliche Topologie der dreidimensionalen Rekonnexion (Abb. 3b): Man erkennt im Zentrum der Abbildung ein magnetisches Loch, eine so genannte 0-Typ Null, daneben zwei magnetische Nullen vom dreidimensional verallgemeinerten X-Typ. Generell sind magnetische Nullen singuläre Punkte, in denen das Magnetfeld verschwindet. Aus der linken X-Typ Null divergiert das Magnetfeld fächernd, aus der rechten spiraland. Durch magnetische Nullen verlaufende Feldlinien werden Separatoren genannt. Im Raum spannen sie Separatrixflächen auf, die Bereiche

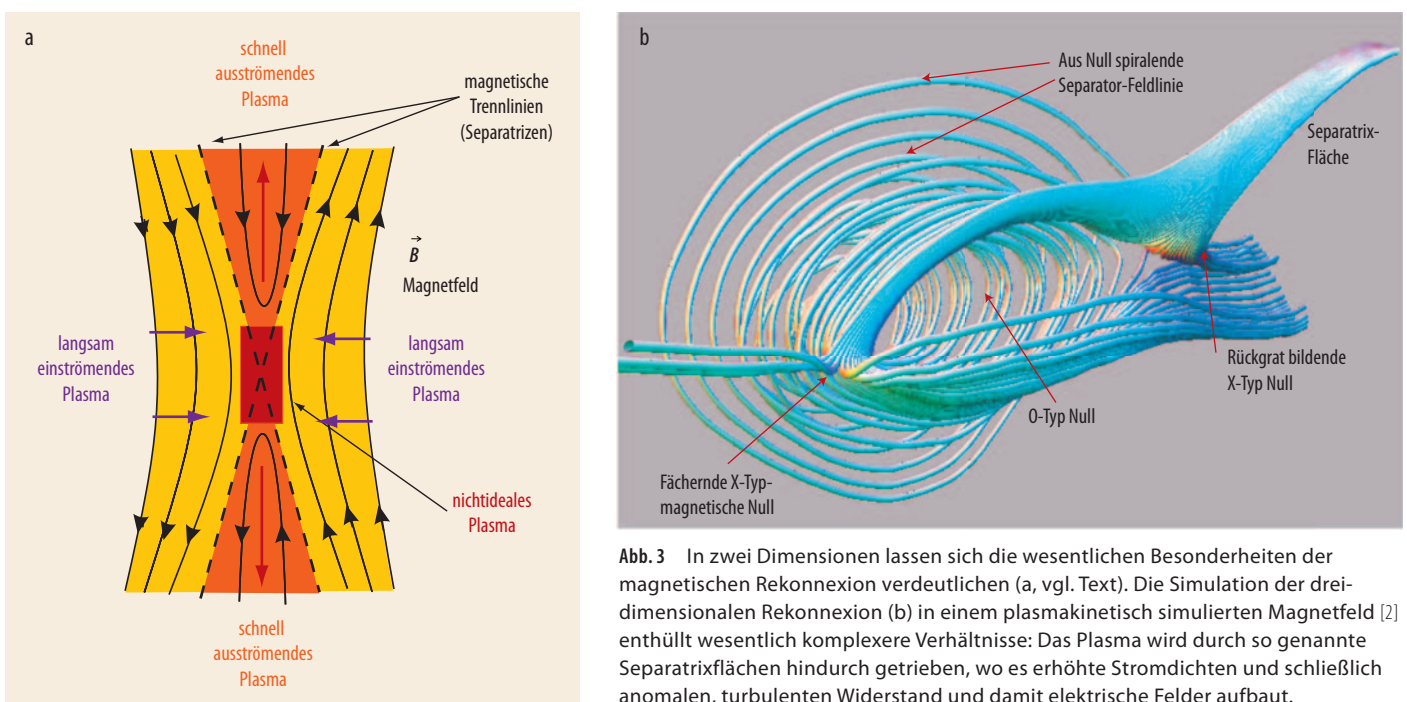


Abb. 3 In zwei Dimensionen lassen sich die wesentlichen Besonderheiten der magnetischen Rekonnexion verdeutlichen (a, vgl. Text). Die Simulation der dreidimensionalen Rekonnexion (b) in einem plasmakinetisch simulierten Magnetfeld [2] enthüllt wesentlich komplexere Verhältnisse: Das Plasma wird durch so genannte Separatrixflächen hindurch getrieben, wo es erhöhte Stromdichten und schließlich anomalen, turbulenten Widerstand und damit elektrische Felder aufbaut.

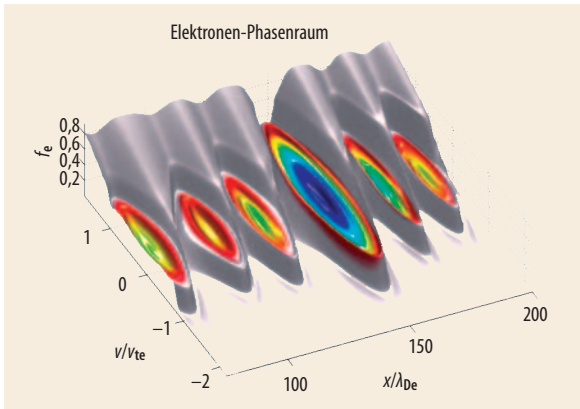


Abb. 4 Aufenthaltswahrscheinlichkeit f_e von Elektronen im Phasenraum, berechnet durch Computersimulation instabiler Plasmawellen (rot: hoch, blau: gering). Die in Wellentälern gefangenen Teilchen stehen in intensiver, resonanter Wechselwirkung mit der kollektiven elektromagnetischen Anregung des Plasmas [3]. v_{Te} ist die thermische Geschwindigkeit.

unterschiedlicher magnetischer Topologie trennen. Im Verlaufe drei-dimensionaler Rekonnexion wird Plasma durch diese Flächen hindurch getrieben, wobei es erhöhte Stromdichten und schließlich turbulenten Widerstand sowie elektrische Felder aufbaut. Magnetfeldkonfigurationen mit 3D-Nullen wurden unlängst erstmals von Cluster in der Erdmagnetosphäre entdeckt [4].¹⁾

Turbulenz statt Stöße

Unklar ist bis heute, was die Stärke der elektrischen Felder und damit auch den Wirkungsgrad der Freisetzung angesammelter magnetischer Spannungen in 3D bestimmt. Diese Frage lässt sich letztlich erst entscheiden, wenn die Mikrophysik der stoßfreien Dissipation, der so genannte „anomale Widerstand“, in den nichtidealen Gebieten der Rekonnexion verstanden ist. Wie in allen typischerweise von binären Stößen freien Weltraumplasmen sind es auch in der Magnetosphäre Wechselwirkungen von Teilchen mit kollektiven Anregungen des Plasmas, die zu Irreversibilität, sprich Dissipation, führen. Bereits in den 1960er-Jahren wurde zu ihrer Beschreibung eine quasilineare Theorie entwickelt, welche unter anderem die Streuung der Strahlungsgürtelteilchen sowie die Dissipation in der stoßfreien Bugstoßwelle der Erde und auch die für Rekonnexion notwendige Nichtidealität erklären sollte. Der Begriff „anomal“ wurde gewählt, um die von herkömmlichen Gasen abweichende Ursache für Irreversibilität zu unterstreichen – eben nicht direkte Teilchenstöße, sondern die Wechselwirkungen mit kollektiven elektromagnetischen Anregungen des Plasmas [5].

Satelliten-Missionen (siehe Infokasten) sollten nun ergründen, um welche Wellenmoden, Strukturen oder Turbulenz es sich dabei handeln könnte. Aber selbst mit Hilfe der aktuellen ersten echten Multisatellitenmission Cluster ist es außerordentlich schwierig, in die kritischen Dimensionen vorzudringen. Demnach ist es nicht die in den quasilinearen Theorien der ersten Jahrzehnte der Magnetosphärenforschung angenommene

schwache Plasmaturbulenz, die für Rekonnexion, Diffusion und Stoßwellen in stoßfreien Weltraumplasmen mikroskopisch verantwortlich ist, sondern die Bildung stark nichtlinearer Strukturen. Simulationen auf Supercomputern lassen uns erstmals langsam erahnen, was auf den unteren Strukturebenen komplexer kosmischer Plasmasysteme geschieht, um sich dann makroskopisch in der Dynamik des Gesamtsystems wie der Magnetosphäre zu artikulieren. Das soll am Beispiel neuester Forschungsergebnisse zur Computersimulation des „anomalen“, also stoßfreien Widerstandes, notwendig für Beschleunigung von Polarlicht-Elektronen und für die magnetische Rekonnexion, erklärt werden.

Die schwache Turbulenztheorie sagt voraus, dass Ströme im zunächst ideal leitfähigen Plasma Plasmawellen erzeugen, die schnell eine Sättigungsamplitude erreichen. Aktuelle kinetische Simulationen zeigen jedoch, dass statt einer Sättigung durch Teilcheneinfang in den Potentialtöpfen der am schnellsten wachsenden Wellen intensive, in wachsendem Maße irreversible, resonante Welle-Teilchen-Wechselwirkungen das Wellenwachstum weiter antreiben (Abb. 4), bis sich schließlich mikroskopische nichtlineare Strukturen (Doppelschichten) bilden, die an Stoßwellen in der Hydrodynamik erinnern (Abb. 5): An der Elektronenverteilung entlang der Strombahn (Abb. 5 oben) erkennt man, wie die anfänglich hohe mittlere Geschwindigkeit der Ladungsträger, die nahe am Maximum, im roten Bereich liegt, sich dadurch verringert, dass in der turbulenten Phase (rechts von der Doppelschicht, also hinter ihr in Ausbreitungsrichtung) immer mehr Elektronen bei geringen Geschwindigkeiten angetroffen werden (im breiteren „blauen“ Bereich). Dadurch verringert sich der von den Elektronen getragene Strom. Die verbreiterte Verteilung wiederum bedeutet, dass sich das Elektronengas aufheizt. Die am Anfang im Mittel ruhenden Ionen (Abb. 5 unten) werden nach ihrem Durchgang

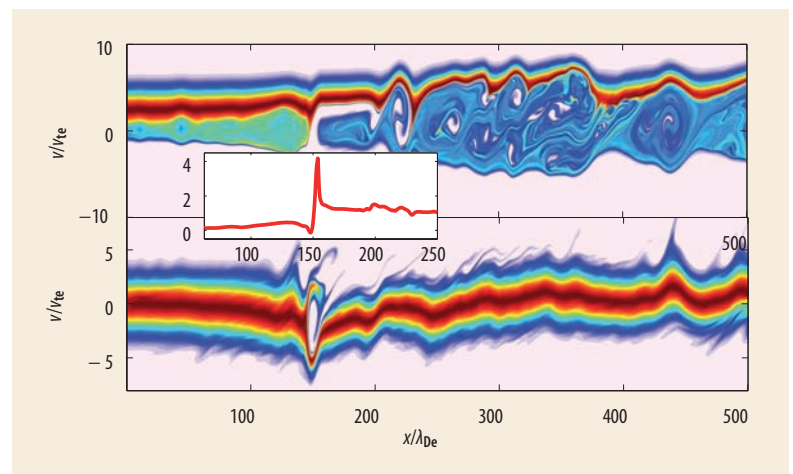


Abb. 5 Simulierte Elektronen- (oben) und Ionen-Verteilung (unten) entlang der Strombahn in einem stoßfreien Weltraumplasma (vgl. Text). Farbkodiert ist die Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen (rot: hoch, blau: gering). Das kleine Bild dazwischen zeigt das elektrostatische Potential (in Einheiten von

$k_B T_e / e$) der sich ausbildenden Doppelschicht. Die Amplitude der entsprechenden Felder übersteigt die von schwach turbulenten Plasmawellen um ein Vielfaches und erst recht die von thermischen Feldfluktuationen $k_B T_e / e \cdot n \lambda_{De}$, welche das Potential aus direkten Teilchenstößen bestimmen [3].

1) Es sind aber auch andere Konfigurationen denkbar. Im Schweif der Magnetosphäre ver-schwimmt das Magnetfeld nie und die dreidimensionale Rekonnexion erzeugt, ähnlich wie an der Sonne, starke elektrische Felder parallel zum Magnetfeld.

durch die Doppelschicht ihrerseits beschleunigt. Makroskopisch äußern sich Doppelschichten als diskontinuierlicher elektrischer Widerstand, der allerdings wie der herkömmliche Ohmsche Widerstand den Strom driftender Ladungsträger begrenzt und zu einer Aufheizung des Plasmas führt. Die Unterschiede zum herkömmlichen Bild eines elektrischen Widerstands bestehen darin, dass das Potentialgefälle räumlich stark lokalisiert ist und dass die Heizung an anderer Stelle stattfindet. Ein einfaches Ohmsches Gesetz existiert also im stoßfreien Weltraumplasma nicht. Beobachtungen der Cluster-Mission bestätigten inzwischen diese theoretische Voraussage [6].

Magnetosphären als komplexe Systeme

Wie gezeigt bestimmen mikrophysikalische Prozesse letztlich das makroskopische Verhalten des stoßfreien Weltraumplasmas. Dadurch entwickelt die Magnetosphäre typische Eigenschaften komplexer Systeme. So lässt sich z. B. magnetische Rekonnexion nicht einfach reduktionistisch aus der mikroskopischen Teilchenbewegung ableiten – ihre Dynamik bleibt vielschichtig. Die Magnetosphäre selbst ist ein offenes System, das in ständiger Wechselwirkung mit dem Sonnenwind steht und dabei Energie aufnimmt. Dabei organisiert und stabilisiert sie sich im Mittel fernab vom thermodynamischen Gleichgewicht. Die zeitliche Entwicklung der Magnetosphäre ist pfadabhängig, d. h. ihr Verhalten hängt nicht nur vom aktuellen Zustand, sondern auch von dessen Vorgeschichte ab. Dies erschwert u. a. die Vorhersagbarkeit geomagnetischer (Teil-)Stürme und anderer Weltraumplasma-Phänomene außerordentlich, macht sie vielleicht prinzipiell unmöglich.

Als dissipatives komplexes System kann eine Magnetosphäre dagegen Attraktoren ausbilden: Stabile Konvektionsmuster und Zustandsabfolgen wechseln sich während magnetischer Stürme ab. Kleine Störungen oder geringe Unterschiede in den Anfangsbedingungen können dagegen zu sehr unterschiedlichen Folgen führen, etwa zu turbulentem Transport in Form so genannter „Bursty Bulk Flows“, die bereits vor rund zwanzig Jahren entdeckt wurden, oder zur Ausbildung von wirbelartigem Transport an der Magnetopause, wie kürzlich von Cluster beobachtet [7].

Astrophysikalische Perspektiven

Ursprünglich im Labor entstandene und für Magnetosphären entwickelte physikalische Konzepte wie die der stoßfreien Dissipation oder der magnetischen Rekonnexion sind inzwischen auch in die Astrophysik übernommen worden. So erwies sich die Magnetosphäre des Jupiter bei der näheren Untersuchung durch Planetensonden als der größte Teilchenbeschleuniger des Sonnensystems. Dass die Radiostrahlung von Pulsaren nach denselben Prinzipien wie die Erzeugung der auroralen Kilometerstrahlung der Erdmagnetosphäre

(„natürlicher Zyklotron-Maser“) entsteht, schlugen F. Pacini und später T. Gold bereits 1967 vor. Ein weiteres aktuelles Beispiel ist die 2006 erfolgte Übertragung des Alfvén-Wellen-Konzepts auf unlängst entdeckte Spiralstrukturen im Zentrum unserer Galaxis [8]. Es handelt sich dabei um großskalige dynamische Strukturen, die zu ausgedehnt sind, um sie durch rein stellare Aktivität zu erklären. Stattdessen stehen offenbar interstellares Gas, Staub und magnetoaktive Plasmen derart miteinander in Wechselwirkung, dass sich helikale (spiralige) Alfvén-Wellen ausbilden, die sich vom galaktischen Zentrum aus der galaktischen Ebene heraus entlang des Magnetfeldes ausbreiten, durch die Rotation der galaktischen Scheibe getrieben.

All dies unterstreicht die fundamentale Bedeutung der Magnetosphärenforschung. Mit zukünftigen Satellitenmissionen (siehe Infokasten „Missionen“) und numerischen Simulationen auf Supercomputern geht es in Zukunft darum, die Eigenschaften von Weltraumplasmen als komplexe Systeme mit Kopplungen von Mikro- und Makrophysik, also über Skalengrenzen hinweg, in situ zu erforschen und zu verstehen.

*

Die Autoren danken Kristian Schlegel vom MPI für Sonnensystemforschung für hilfreiche Anmerkungen.

Literatur

- [1] K. H. Glassmeier et al., *Ann. Geophys.* **19**, 1439 (2001)
- [2] J. Büchner, *Astrophys. and Space Sciences* **264**, 25 (1999)
- [3] J. Büchner und N. Elkina, *Phys. Plasmas* **13**, 082304 (2006)
- [4] C. J. Xiao et al., *Nature Physics* **2**, 478 (2006)
- [5] J. Bleker, J. Geiss und M. C. E. Huber (Hrsg.), *The Century of Space Science*, Kluwer, Norwell (2001), S. 1900
- [6] E. V. Panov, J. Büchner et al., *Geophys. Res. Lett.* **33**, L15109 (2006)
- [7] K. Nykyri et al., *Annales Geophysicae* **24**, 2619 (2006)
- [8] M. Morris, K. Uchida und T. Do, *Nature* **440**, 308 (2006)

DIE AUTOREN

Jörg Büchner forschte nach seiner Promotion 1980 am Heinrich Hertz-Institut und am AIP in Potsdam über Fragen der Weltraumplasmaphysik. Nach der Habilitation 1990 und einer Gastprofessur in Los Angeles (UCLA) folgte er 1992 einem Ruf an die Außenstelle des MPIs für extraterrestrische Physik in Berlin. Seit 1996 lehrt er an der U Göttingen und leitet am MPI für Aeronomie/Sonnensystemforschung die AG Weltraumplasmasimulation.

Karl-Heinz Glaßmeier promovierte 1985 an der Uni Münster. 1985 bis 1991 war er wissenschaftlichen Assistent an der Uni Köln, wo er 1989 habilitierte. Seit 1991 Professor an der TU Braunschweig ist er Principal Investigator der Magnetosphärenmission THEMIS und der Merkurmission BepiColombo.

Joachim Sauer studierte Physik in Stuttgart und Köln, wo er 2000 in Geophysik promovierte. Es folgten Forschungsaufenthalte in Nizza und an der Johns Hopkins University (Maryland). Seit 2005 ist er Professor am Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln.

