

PLANETEN

Die Welt der Jupitermonde

Auch 400 Jahre nach ihrer Entdeckung werfen die Galileischen Monde noch Fragen auf.

Andreas Kopp

Seit der Entdeckung der vier großen Jupitermonde konnten Astronomen viele ihrer Geheimnisse entschlüsseln. Sie haben geologische Aktivität gefunden und ihre Wechselwirkung mit der Magnetosphäre genau untersucht. Doch viele Rätsel, wie der innere Aufbau der Monde oder die Frage, ob einer von ihnen über flüssiges Wasser verfügt, sind nach wie vor ungelöst. So hat die Welt der Galileischen Monde nichts von ihrer Faszination eingebüßt.

Die Erfindung des Fernrohrs vor 400 Jahren durch die Brillenmacher Hans Lipperhey oder Sacharias Jansen aus dem niederländischen Middelburg stellte für die damalige Astronomie einen riesigen Fortschritt dar. Zu einer Zeit, in der das heliozentrische Weltbild noch längst nicht etabliert war, bedeutete die Entdeckung der vier großen Monde des Jupiter weit mehr als eine bloße Erweiterung des Blickfeldes: Zum ersten Mal beobachtete man, dass kleinere Himmelskörper um einen größeren, von der Erde verschiedenen Planeten kreisen. Im Herbst 1609 war zudem Johannes Keplers „Astronomia Nova“ erschienen, in der er den Schritt von der „Himmelstheologie“ zur Himmelsphysik vollzog.

Die vier Galileischen Monde haben vermutlich nahezu zeitgleich Anfang 1610 Galileo Galilei in Padua und Simon Mayr im fränkischen Ansbach entdeckt. In der unmittelbaren Nähe Jupiters sahen sie zunächst drei entlang einer Linie ausgerichtete „Sterne“, die dem Planeten zu folgen schienen (Abb. 1). Galilei veröffentlichte seine Beobachtungen 1610 in seinem „Sidereus Nuncius“. Das erst 1614 publizierte Werk „Mundus Iovialis“ von Simon Mayr enthält bereits die heute üblichen Namen für die Monde: Io, Europa, Ganymed



und Callisto (von innen nach außen). Diese Benennung nach Liebschaften des Jupiter geht auf einen Vorschlag Keplers zurück.

Galileo hatte vorgeschlagen, die Monde als universelle Uhr zu nutzen. Erste Unregelmäßigkeiten ihres Umlaufs bemerkte aber schon 1676 Ole Rømer bei der Verfinsterung Ios durch Jupiter. Als Pehr W. Wargentin die Verfinsterung der Monde 1740 untersuchte, bemerkte er, dass diese nicht gleichmäßig um den Jupiter laufen. Dies führte er darauf zurück, dass die Monde gravitativ miteinander wechselwirken. Ursache dafür ist die Laplace-Resonanz zwischen den drei inneren Monden, d. h. die Tatsache, dass ihre Umlaufperioden (nahezu) im Verhältnis 1:2:4 zueinander stehen. 1892 entdeckte Edward Barnard mit Amalthea einen fünften Mond. Von der Erde aus folgten bis 1973 noch acht Monde, 50 weitere sind Raumsonden zu verdanken.

Mit den vier Jupitermonden wurden die ersten Himmelskörper in unserem Sonnensystem seit der Antike entdeckt.

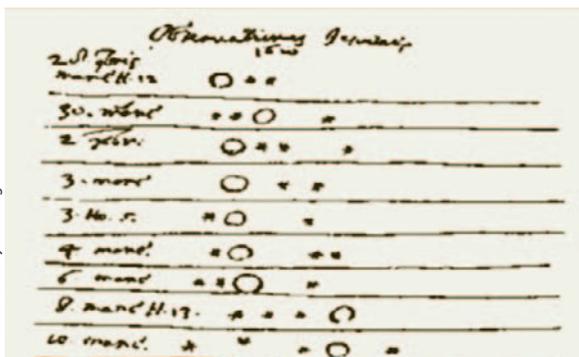


Abb. 1 Handschriftliche Aufzeichnungen Galileo Galileis

KOMPAKT

- Io besitzt zahlreiche aktive Vulkane und ist der geologisch aktivste Körper im Sonnensystem. Seine Oberfläche ist entsprechend jung, da sie sich fortwährend verändert.
- Der kleinste Galileische Mond Europa ist von einer dicken Eiskruste umgeben, unter der man einen tiefen Ozean aus flüssigem Wasser vermutet.
- Ganymed ist der größte Mond des Sonnensystems und der einzige magnetisierte.
- Callisto gilt als inaktivster Mond und besitzt als einziger Galileischer Mond wohl keinen Eisenkern. Auch unter seiner Eiskruste könnte sich flüssiges Wasser befinden.

Dr. Andreas Kopp,
Institut für Experimentelle und Angewandte Physik,
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel,
Leibnizstr. 11,
24118 Kiel

Die Besonderheiten der Monde

Bevor die Voyager-Sonden 1979 den Jupiter erreichten, stellte man sich seine Monde analog zum Erdmond als karge, von Kratern übersäte Gesteinswelten vor. Stattdessen zeigte sich eine Vielfalt individueller Welten, die zum Teil alles andere als wüst und öde sind. Der Abstand vom Zentralkörper bestimmt wesentlich die Charakteristika der Galileischen Monde.

Er spiegelt sich in der Dichte wider, die von innen nach außen abnimmt (Tabelle):

Mit einer angenommenen Gesteinsdichte von 3 bis 4 g/cm³, steigt der Anteil von Wasser(eis) von Io (kein Wasser) zu Callisto (besteht etwa zur Hälfte aus Wasser oder Eis) an. Dies folgt aus der Tatsache, dass Jupiter in der Frühphase erheblich heißer war und intensiv strahlte. Zudem sorgt die Laplace-Resonanz zwischen den drei inneren Monden dafür, dass ihre

Bahnexzentrizitäten aufrechterhalten bleiben. Dadurch spüren die Monde ein zeitlich variables Gravitationsfeld, dessen relative Schwankungen nach außen abnehmen. Beide Faktoren bestimmen die Beschaffenheit der Oberfläche, den inneren Aufbau der Monde und weitere Eigenschaften, wie z. B. die Leitfähigkeit Ios oder das Magnetfeld Ganymeds.

Die wohl größte Überraschung war die Entdeckung aktiver Vulkane auf Io (Abb. 2). Der intensive Vulkanismus ist darauf zurückzuführen, dass der Mond infolge der schwankenden Gravitationskraft regelrecht durchgewalkt wird und sich durch die dabei entstehende Reibungswärme aufheizt. Lavaflüsse auf Io sind bis zu 1600 K heiß. Ios Oberfläche ist dementsprechend mit etwa 10 Millionen Jahren eine der jüngsten im Sonnensystem und verändert sich fortwährend. Flüssige Verbindungen von Schwefel und Natrium bestimmen das Bild der farbenreichen Oberfläche, in der Gelb-,

Braun- und Rottöne dominieren. Krater kommen kaum vor. Der innere Aufbau, auf den die recht hohe Dichte erste Hinweise gibt, ähnelt dem der terrestrischen Planeten: Ein Mantel aus Silikaten umgibt einen recht großen, aber vermutlich festen Eisenkern. An der Oberfläche finden sich neben vielen Vulkanen und sog. Hotspots gewaltige Berge. Die Eruptionswolken der Vulkane beeindruckten besonders, da sie aufgrund der geringen Schwerkraft hunderte von Kilometern in den Weltraum reichen. Dadurch verliert Io etwa eine Tonne Masse pro Sekunde.

Der kleinste der Galileischen Monde – Europa (Abb. 3) – ist von einer 10 bis 15 km dicken Eiskruste umgeben, unter der sich möglicherweise ein Ozean aus flüssigem Wasser befindet, dessen Tiefe bis zu 90 km betragen könnte [1]. Auch Europa ist geologisch aktiv, wenngleich in weitaus geringerem Maße als Io. Seine Oberfläche ist die glatteste und flachste im Sonnensystem, Höhenunterschiede bleiben im Bereich einiger 100 Meter. Sie ist von Furchen, sog. Lineae, durchzogen und erinnert an Packeis auf der Erde. Die Lineae entstehen möglicherweise dadurch, dass die Eis-Oberfläche infolge geologischer Aktivität zerbricht und sich die Bruchstellen mit Wasser auffüllen. Der hohe Wasseranteil an der Oberfläche spiegelt sich in der hohen Albedo²⁾ wider und verleiht dem Mond seine bläulich-rote Färbung. Mit etwa 30 Millionen Jahren ist die Oberfläche recht jung. Europa besitzt einen Eisenkern, den ein Silikatmantel umgibt, nach außen schließt sich die Eiskruste an.

Das Alter der mit zahlreichen Kratern übersäten Oberfläche von Ganymed ist mit 3 bis 3,5 Milliarden Jahren dem des Erdmondes vergleichbar (Abb. 4). Sie unterteilt sich in einen dunkleren, älteren und einen helleren jüngeren Bereich mit Gräben und Verwerfungen. Ganymed ist nur etwa halb so massereich wie der etwas kleinere Merkur (Tabelle). Die Dichte des Mondes spricht dafür, dass Ganymed etwa zu 60 % aus Silikaten und zu 40 % aus Wassereis besteht. Unterhalb einer Kruste aus hartem Eis befindet sich eine dickere Schicht, die aus weichem Eis oder aus flüssigem Wasser besteht. Beide Schichten zusammen sind schätzungsweise 800 bis 1000 km dick. Die Oberfläche ist deutlich dunkler als die von Io und Europa. Aufgrund der Eiskruste sind die Krater und Gräben recht flach. Der prinzipielle Aufbau entspricht dem von Europa, aller-

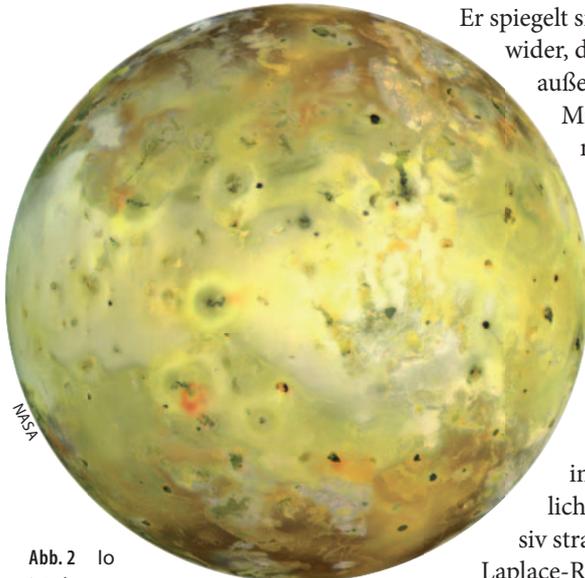


Abb. 2 Io ist der geologisch aktivste Körper im Sonnensystem.

1) Es folgen die Zwergplaneten Eris und Pluto mit Radien von etwa 1200 km und Titania, der größte Mond des Uranus, mit einem Radius von 789 km.

2) Die Albedo ist das Verhältnis der am oberen Rand der Atmosphäre auftretenden reflektierten Strahlung zur dort im Mittel einfallenden Strahlung.

Tab. 1 Die wichtigsten Bahndaten der größten Monde im Sonnensystem verglichen mit Merkur, dem kleinsten Planeten.¹⁾

Bahndaten der größten Monde									
Mond	Planet	Radius in km	Albedo	mittl. Dichte in g/cm ³	große Halbachse in km	in R _{planet}	Exzentrizität	Inklination in Grad	Umlaufzeit in Tagen
	Merkur	2440	0,11	5,43	–	–	–	–	–
Mond	Erde	1738	0,12	3,34	384400	60,27	0,055	5,15	27,322
Io	Jupiter	1822	0,61	3,56	421800	5,90	0,004	0,04	1,769
Europa	Jupiter	1561	0,68	3,01	670900	9,38	0,010	0,47	3,551
Ganymed	Jupiter	2631	0,44	1,94	1070400	14,97	0,002	0,21	7,155
Callisto	Jupiter	2410	0,19	1,83	1882700	26,33	0,007	0,51	16,689
Titan	Saturn	2575	0,22	1,88	1221830	20,27	0,029	0,33	15,950
Triton	Neptun	1353	0,76	2,05	354760	14,33	0,000	156,83	5,877
Radien der Planeten: Erde: 6378 km, Jupiter: 71 492 km, Saturn: 60 268 km, Neptun: 24 764 km									

dings ist Ganymed deutlich größer, sodass der Eisenkern vermutlich flüssig ist. Hierfür spricht auch die Tatsache, dass Ganymed als einziger Mond im Sonnensystem magnetisiert ist. Sein Dipolfeld ist dreimal so groß wie das Magnetfeld des Merkur.

Die Oberfläche von Callisto (Abb. 5) ist mit etwa 4 Milliarden Jahren noch älter und geologisch inaktiver. Da Callisto die höchste Kraterdichte im Sonnensystem aufweist und es zudem keine Plattentektonik gibt, gilt Callisto als der geologisch inaktivste Mond im Sonnensystem. Callisto ist noch dunkler als Ganymed, zeigt allerdings charakteristische weiße Flecken auf der bräunlichen Oberfläche. Diese sind vermutlich durch Meteoriteneinschläge entstanden, die man sich wie einen ins Wasser geworfenen Stein vorstellen kann: Wasser spritzt nach oben, der Meteorit versinkt und hinterlässt ringförmige Strukturen [2]. Auch Callisto verfügt eventuell über einen Ozean aus flüssigem Wasser unter seiner Oberfläche. Seine Zusammensetzung entspricht zwar in etwa derjenigen Ganymeds, aber im Gegensatz zu den drei übrigen Galileischen Monden besitzt Callisto vermutlich keinen Eisenkern, sondern besteht aus einem Silikat-Eis-Gemisch, an das sich nach außen die Eiskruste anschließt.

Wie die Monde mit Jupiter wechselwirken

Aufgrund ihrer Oberflächenbeschaffenheit gelten Ganymed und Callisto, eingeschränkt auch Europa, als Eismonde, die sonst vor allem bei Saturn anzutreffen sind, während Io trotz seiner geologischen Aktivität eher zu den terrestrischen Monden zählt. Alle vier

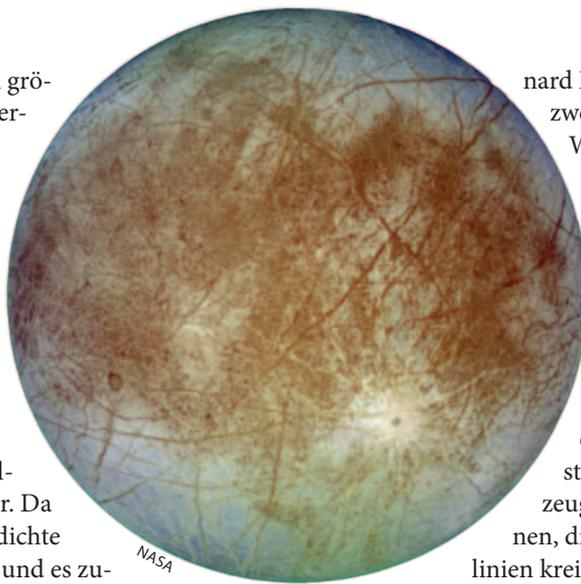
Monde umkreisen ihren Planeten – gemessen in Planetenradien – auf erheblich engeren Bahnen und in wesentlich kürzeren Perioden als es beim Erdmond der Fall ist. Die Erkundungsgeschichte der Monde begann 1955, als Ber-

nard Burke und Kenneth Franklin, zwei junge Radioastronomen aus Washington, eher zufällig eine stark lokalisierte, intensive Strahlung mit einer signifikanten nicht-thermischen Komponente bei einer Wellenlänge von knapp zehn Metern entdeckten. Als deren Quelle ließ sich Jupiter ausmachen. Schnell war klar, dass es sich um Synchrotronstrahlung handeln musste, erzeugt durch energiereiche Elektronen, die um die magnetischen Feldlinien kreisen. Damit war zwar erwiesen, dass neben der Erde auch andere Planeten ein Magnetfeld besitzen, doch blieb vorerst unklar, was diese Strahlung auslöst.

Nachdem der Australier Alec Shain 1956 den Zusammenhang zwischen der Strahlungsemission und der Rotation des Planeten festgestellt hat, entdeckte sein Landsmann Keith Bigg 1964, dass die Emission der Strahlung mit der Position Ios korreliert ist: Sie ist besonders intensiv, wenn Io von der Erde aus zu sehen ist. Bereits die ersten Modellansätze in den späten Sechzigerjahren schlugen als Ursache der Radiostrahlung ein Stromsystem zwischen Jupiter und Io vor, die sog. Io-Flussröhre. Doch erst mithilfe der Voyager-Sonden ließ sich die Frage beantworten, wodurch sich Io von den übrigen Galileischen Monden unterscheidet: Entlang seiner gesamten Bahn fand man eine hohe Konzentration verschiedener Schwefel-, Sauerstoff-, Natrium- und Kalium-Ionen. Die Teilchendichte in diesem als Plasmaring oder Io-Plasma-Torus bezeichneten Gebiet liegt um eine bis zwei Größenordnungen über dem Hintergrundwert und rührt von aktiven Vulkanen auf Io her (Abb. 6a). Während der Mond für einen Umlauf um Jupiter 42 ½ Stunden benötigt, korotiert der Torus mit dem Planeten in knapp zehn Stunden. Er bewegt sich also relativ zu Io und ist zudem um knapp 10° gegen dessen Bahnebene geneigt.

Mit diesen Entdeckungen war bald klar, auf welche Weise ein Stromsystem zwischen Jupiter und Io entstehen kann: Das aus den Vulkanen entweichende Material wird aufgrund der hohen Teilchendichten durch Stöße nahe der Mondoberfläche ionisiert, sodass Io ein leitfähiger Körper ist, der sich relativ zum magnetosphärischen Plasma und zum Magnetfeld Jupiters bewegt. Auf diese Weise erfährt letzteres eine Störung, deren Ausbreitung durch das Modell der Alfvén-Flügel beschrieben wird, das der deutsche Geophysiker Fritz Neubauer erstmals auf das Jupiter-Io-Szenario angewandt hat [3]. Alfvén-Flügel stellen im Grunde die Überlagerung zweier Bewegungen dar: (i) Die Relativbewegung zwischen Io und dem Jupiter-Magnetfeld und (ii) die Ausbreitung der Störung entlang des Magnetfeldes im Form von Alfvén-Wellen (Abb. 7): Während sich das Plasma mit Relativgeschwindigkeit $\vec{v}_{\text{rel}} = v_{\text{rel}} \vec{e}_x$ bewegt, breitet sich die Störung entlang

◀ **Abb. 3** Europa ist der kleinste der Galileischen Monde. Seine Oberfläche ist von Furchen durchzogen.



◀ **Abb. 4** Die Oberfläche von Ganymed ist von zahlreichen Kratern übersät.

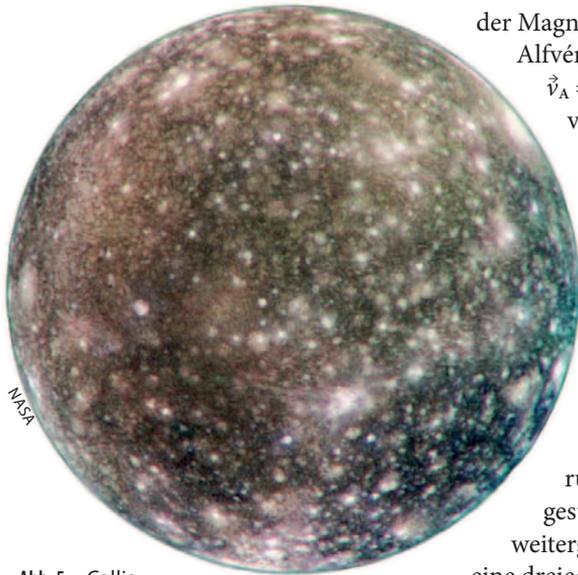


Abb. 5 Callisto ähnelt einem schmutzigen Schneeball.

der Magnetfeldlinien mit der Alfvén-Geschwindigkeit $\vec{v}_A = B / \sqrt{\mu_0 \rho} \vec{e}_y$, aus, die von der Stärke B des Magnetfeldes und der Massendichte ρ des Plasmas abhängt, μ_0 ist die Permeabilität des Vakuums. Erreicht die nächste der farbig markierten Feldlinien den Mond, ist die Störung auf den bereits gestörten Feldlinien weitergelaufen, sodass sich eine dreieckige Struktur ergibt, entlang derer der Strom fließt. Die

Richtung dieser Alfvén-Flügel genannten Bereiche wird durch die Alfvén-Charakteristiken $\vec{c}_A^{(\pm)} = \vec{v}_{rel} \pm \vec{v}_A$ beschrieben. Der Winkel θ_A zwischen Magnetfeld- und Stromrichtung hängt nur von der Alfvén-Mach-Zahl $M_A = v_{rel} / v_A$ ab und ergibt sich aus einfachen geometrischen Betrachtungen zu $\theta_A = \tan(M_A)$. Für Io resultiert ein Winkel von etwa 20° . Messungen der Voyager-Sonden bestätigten die theoretische Vorhersage, dass die Alfvén-Flügel das magnetosphärische Plasma behindern und von diesem umströmt werden.

Die Alfvén-Flügel breiten sich entlang des Dipolfeldes von Jupiter bis in seine Ionosphäre hinein aus. Mit der Annäherung an den Planeten steigt die Magnetfeldstärke. Wenn die Stromdichte überkritisch wird, können Mikroinstabilitäten entstehen und die Elektronen entlang des Magnetfeldes beschleunigt werden. Durch Stoßanregung kommt es zu elektromagnetischer Strahlung – weit entfernt von Jupiter im Radiobereich und in seiner Ionosphäre im UV-Bereich (Abb. 6b), wo der Io-Fußpunkt innerhalb der Aurora als helle Leuchterscheinung deutlich sichtbar ist. Die an einen Kometenschweif erinnernde Struktur entsteht dadurch, dass die dichte Plasmawolke in Ios unmittelbarer Umgebung ebenfalls das Magnetfeld stört.

Der Jupiter ist nicht der einzige Planet, der elektromagnetisch mit seinen Monden wechselwirkt. Dieses Phänomen findet sich, wenngleich weniger stark ausgeprägt, auch in den Magnetosphären der übrigen Gasplaneten. Stellvertretend seien hier der Neptun-

mond Triton und als eines der bemerkenswertesten Ergebnisse der noch andauernden Cassini-Mission die Saturnmonde Enceladus und Rhea genannt. Im System Erde-Mond gibt es keine solche Wechselwirkung. Neben dem größeren relativen Abstand ist hierfür vor allem das weitaus schwächere Erdmagnetfeld verantwortlich. Ob Mond und Planet miteinander in Wechselwirkung treten, hängt jedoch auch von den Eigenschaften der Monde ab.

Das beweist eindrucksvoll Europa, in geringerem Maße auch Callisto: Magnetfeld-Messungen der Galileo-Sonde zeigten bei den Europa-Vorbeiflügen periodische Abweichungen von Jupiters Hintergrundfeld, deren Zeitskala der Rotation des Planeten entsprach. Diese ließen sich dadurch erklären, dass Europa aufgrund der Neigung von Jupiters Dipolfeld gegen die Bahnebene des Mondes senkrecht zu dieser ein zeitlich konstantes, in der Ebene aber ein zeitlich variables Magnetfeld sieht. Hierdurch wird im Inneren Europas ein Magnetfeld induziert, das dem zeitlich veränderlichen Anteil entgegengerichtet ist – vorausgesetzt Europa ist elektrisch leitfähig. Eine mögliche Erklärung ist das Vorhandensein eines salzhaltigen Ozeans aus flüssigem Wasser unterhalb seiner Eiskruste. Das im Wasser gelöste Salz, bei Europa vermutlich Magnesiumsulfat ($MgSO_4$), sorgt für die erforderliche Leitfähigkeit. Die nötige Erwärmung könnten, ähnlich wie bei Io, Gezeitenkräfte hervorrufen. Größere Ansammlungen flüssigen Wassers unter einer Eisschicht gibt es auch auf der Erde: Unter dem kilometerdicken Eis der Antarktis befindet sich der Wostok-See – ein Süßwassersee, der seit etwa einer halben Million Jahre von der Außenwelt abgeschnitten ist. Hinweise auf einfache, mikrobische Lebensformen geben Spekulationen über mögliches Leben auf Europa neuen Antrieb. Für die Annahme, dass sich zwischen der Eiskruste und dem festen Mantel eine flüssige Schicht befindet, spricht auch die Tatsache, dass die Eiskruste um einen kleinen Bruchteil schneller als der Planet um seine Achse rotiert.

Der Fußpunkt in der Jupiter-Aurora ist ein weiteres Indiz für Europas Leitfähigkeit. Auffällig ist jedoch, dass der weiter entfernte Ganymed dort ein noch helleres Signal erzeugt. Das folgt vermutlich aus der elektromagnetischen Wechselwirkung zwischen Planet und Mond, hervorgerufen durch das intrinsische Dipolfeld des größten Mondes. Dieses Feld ist so stark, dass sich – einzigartig im Sonnensystem – eine Magnetosphäre innerhalb einer Magnetosphäre ausbildet. Das magne-

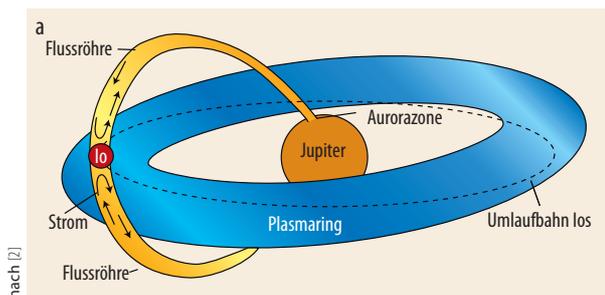
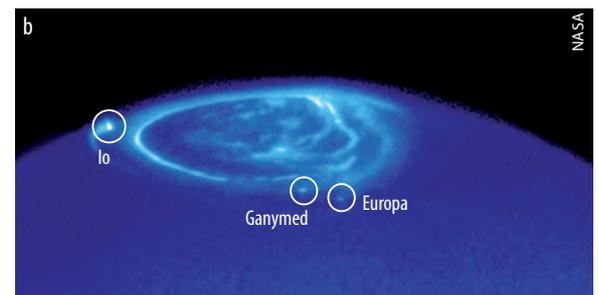


Abb. 6 Die Flussröhre im Io-Plasma-Torus verursacht die Radiostrahlung (a). Die Aufnahme der Aurora an Jupiters Nord-



pol zeigt die hellen Fußpunkte von Io, Europa und Ganymed (b).

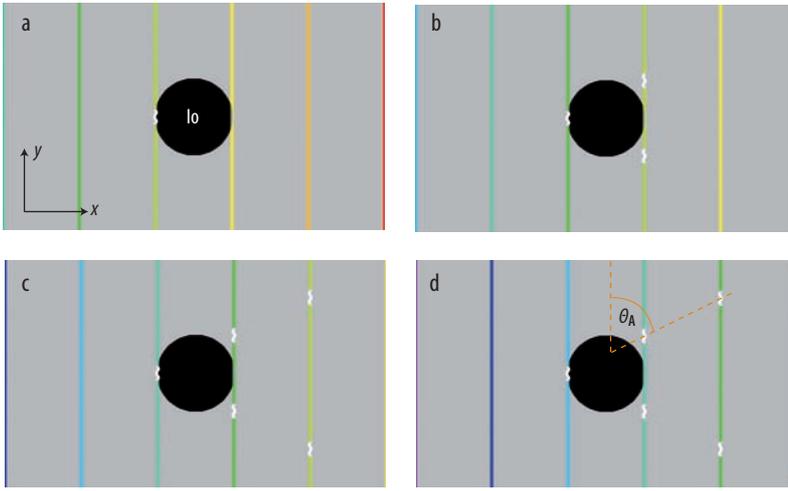


Abb. 7 In Ios Ruhesystem bewegt sich das Plasma relativ zu Io von links nach rechts. Das Magnetfeld, vereinfacht als homogen angenommen und durch farbige Feldlinien verdeutlicht, steht senkrecht dazu. Eine Magnetfeldlinie erfährt eine Störung, wenn sie auf Ios Oberfläche trifft, und möge sich danach ungehindert weiterbewegen. Die Störungen erzeugen magneto-hydrodynamische Wellen, von denen hier die Alfvén-Welle (weiße Symbole) von Interesse ist, da sie den elektrischen Strom trägt. Gezeigt ist die Ausbreitung der Alfvén-Wellen.

tische Dipolfeld des Mondes ist um 170° gegen seine Rotationsachse geneigt, sodass wie bei der Erde der magnetische Nordpol am geografischen Südpol liegt. Das Gesamtmagnetfeld ergibt sich als Überlagerung dieses Feldes mit dem zeitlich variablen Jupiterfeld (Abb. 8). Numerische Simulationen führen auf eine Separatrix, welche die Grenze von Ganymeds Magnetosphäre definiert. Aus der Wechselwirkung von Ganymed und Jupiter-Magnetosphäre resultiert ein Stromsystem. Entlang der Separatrix fließt ein für Weltraumplasmen beachtlicher Strom von Ganymed zum Jupiter, der in dessen Ionosphäre den starken Leuchtpunkt erzeugt.

Jupiter unter Strom

Die magnetische Wechselwirkung zwischen Callisto und Jupiter ähnelt derjenigen Europas, wird aber dadurch modifiziert, dass seine Bahn innerhalb der Stromschicht der Jupiter-Magnetosphäre liegt. Diese Plasmascheibe umkreist wie der Io-Plasma-Torus den gesamten Planeten und setzt ihn gewissermaßen nach

außen fort. In Kombination mit der schnellen Rotation des Planeten bestimmt sie entscheidend das Aussehen der Magnetosphäre. Die Magnetosphäre des Jupiter [4] ist erheblich größer und flacher als diejenige der Erde, zudem korotiert ihr gesamter Innenbereich, dessen Rand im Aurora-Oval zu erkennen ist. Mit einer Breite von 500 und einer Höhe (entlang der Rotationsachse) von 300 Jupiter-Radien ist die Jupiter-Magnetosphäre das mit Abstand größte Objekt im Sonnensystem und würde, wenn man sie am Nachthimmel sehen könnte, die Scheibe des Vollmondes um ein Vielfaches überreffen.

Die Stromschicht hat eine Dicke von etwa fünf Jupiter-Radien und eine Ausdehnung von mindestens 50 Jupiter-Radien (Abb. 9). Wie beim Io-Plasma-Torus ist ihre Bahnnormale gegenüber Jupiters Rotationsachse um knapp 10° geneigt. Für einen Beobachter in der Bahnebene der Monde bewegt sie sich mit einer Periode von knapp zehn Stunden auf und ab, sodass er alle fünf Stunden von der Stromschicht überstrichen wird. Aufgrund ihrer schnellen Rotation und der Tatsache, dass die Stromschicht nahezu das gesamte Plasma der

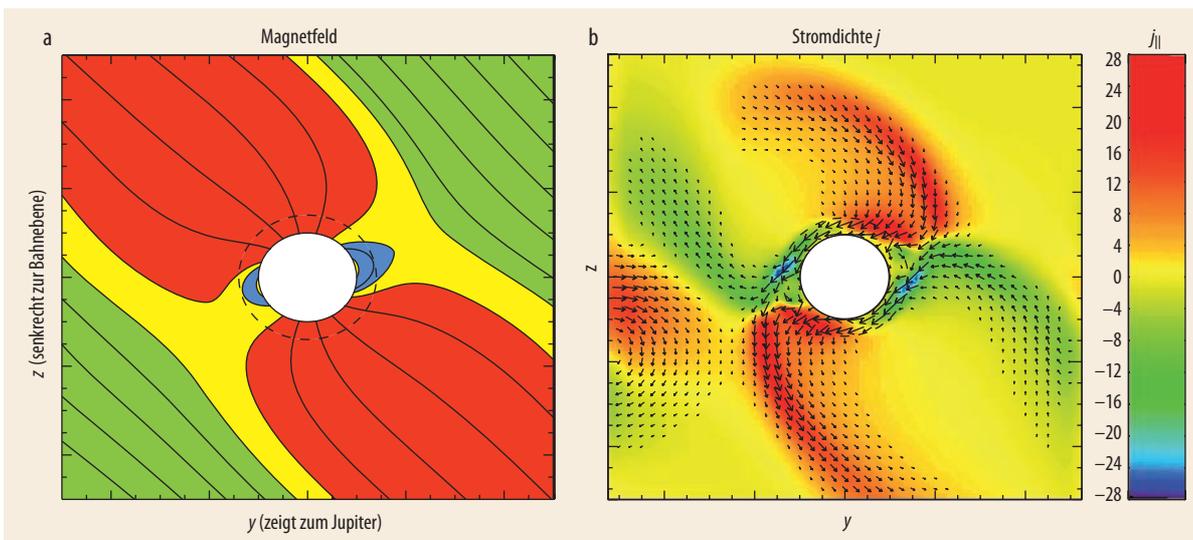
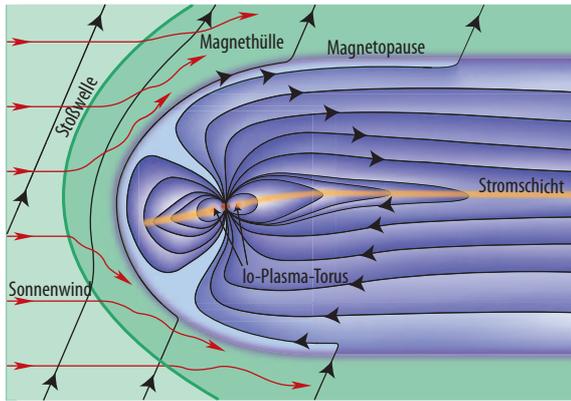


Abb. 8 Numerische Simulationen der Magnetfeld-Topologie (a) und des elektrischen Stromsystems (b) für den Vorbeiflug G7 von Galileo an Ganymed. a) Im blauen Bereich sind die Feldlinien nur

mit Ganymed verbunden, im grünen nur mit Jupiter. Die rot hinterlegten Feldlinien verbinden Ganymed mit Jupiter. Gelb ist der Übergangsbereich zwischen Feldlinien, die mit Ganymed verbunden bzw.

nicht verbunden sind. b) Die Pfeile deuten Richtung und Größe der Stromstärke an, die Farbe gibt Aufschluss darüber, ob der Strom parallel (rot) oder antiparallel (grün) zum Magnetfeld gerichtet ist.

Abb. 9 Die Stromschicht ist ein Charakteristikum der Jupiter-Magnetosphäre



Jupiter-Magnetosphäre enthält, ist sie vermutlich für zahlreiche Ereignisse verantwortlich, bei denen energetische Teilchen dem Sonnenwind entgegen in den interplanetaren Raum hinein beschleunigt werden. Ihre Herkunft ist an ihrer chemischen Zusammensetzung (Schwefel) und ihrem Energiespektrum (Spektralindex) sowie daran zu erkennen, dass sie die Fünf- bzw. Zehn-Stunden-Periodizität der Stromschicht mittransportieren. Die genauen Zusammenhänge werden derzeit an der Universität Kiel untersucht. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf den von der Raumsonde Ulysses entdeckten Jupiter-Jets. Das sind lokalisierte Bündel hochenergetischer Elektronen, die sich entlang des interplanetaren Magnetfeldes noch in weit über einer Astronomischen Einheit (2100 Jupiter-Radien) vom Planeten entfernt detektieren ließen.

Die Bedeutung der Stromschicht verdeutlichen auch Messungen der Raumsonde New Horizons, die auf ihrem Weg zum Zwergplaneten Pluto Anfang 2007 erstmals den ausgedehnten Schweif der Jupiter-Magnetosphäre entlang flog. Noch in einer Entfernung von 1500 Jupiter-Radien stellte sie dabei in der Plasmaströmung Gebiete erhöhter Dichte, sog. Plasmoide, fest, die aus dem Io-Plasma-Torus stammen müssen.

Ungelöste Rätsel

Neben diesen Phänomenen außerhalb der Magnetosphäre sind auch die Vorgänge innerhalb, insbesondere die magnetische Wechselwirkung zwischen den Monden und Jupiter, nach wie vor Gegenstand der Forschung. Ein besonderes Interesse gilt den Strukturen in der Jupiter-Aurora, die sich weitaus komplexer und vielfältiger als die irdische darstellt. Aktuelle Forschungsprojekte beschäftigen sich u. a. mit den Prozessen, die innerhalb der Ionosphäre des Jupiter ablaufen, oder der Rolle, die der Io-Plasma-Torus hierbei spielt. Aber auch die Galileischen Monde selbst werfen noch immer eine Fülle geologischer Fragen auf – z. B. die nach dem Ozean, den man unter den Eiskrusten von Europa und Callisto vermutet.

Die künftige Erforschung der Magnetosphäre des Jupiter und seiner Monde geht auch weit über das Sonnensystem hinaus: Wir kennen über 340 extrasolare Planeten. Sehr häufig handelt es sich dabei um große, jupiterähnliche Planeten, die ihren Stern auf sehr

engen Bahnen innerhalb einiger Tage umkreisen. Diese „heißen Jupiter“ zeigen die Besonderheit, dass sie mit ihrem Stern magnetisch wechselwirken können. Entsprechende Beobachtungen ließen sich erklären, indem das Jupiter-Io-Szenario auf extrasolare Planetensysteme übertragen wurde [5]. Die Erforschung der Planeten selbst steht erst am Anfang, doch könnte sie das Tor zu einer neuen Epoche öffnen, in der sich unser Horizont auf einer wissenschaftlich fundierten Basis weit über das eigene Sonnensystem hinaus erweitert.

Die Entdeckung der Jupitermonde fiel in eine Zeit, in der Astronomie und Astrologie noch miteinander verwoben waren und antike Mythen wieder ins Bewusstsein gelangten. Wie zutreffend die hieraus motivierte Namensgebung der Monde war, zeigten aber erst die Erkenntnisse durch die Raumsonden unserer Tage: So wie für die Wechselwirkung zwischen Io und Jupiter eine Plasmawolke eine entscheidende Rolle spielt, gelingt die Verführung der Nymphe Io durch den Göttervater Jupiter erst, als er sie in einen dunklen Nebel hüllt. In der Gestalt eines weißen Stiers entführt Jupiter die Königstochter Europa über das Meer, und ein ebensolches verbirgt sich vermutlich unter der Oberfläche des gleichnamigen Mondes, dem hellsten der vier. Ganymed war der Mundschenk der Götter, sodass der größte Jupitermond als einziger nach einer männlichen Liebschaft Jupiters benannt ist. Von den drei weiblichen Monden unterscheidet er sich insbesondere durch sein intrinsisches Magnetfeld. Die Nymphe Callisto wurde als Sternbild des großen Bären an den Himmel versetzt. An den Bären erinnert die bräunliche Oberfläche des Mondes, die hellen Flecken darin erwecken den Eindruck als sei er mit Sternen übersät. Inwieweit sich die Forderung Junos, dass der große Bär niemals ins Meer eintauchen darf, bewahrt, bliebe allerdings noch zu klären...

Literatur

- [1] W.-H. Ip und K. Rinnert, Physik in unserer Zeit **29**, 190 (1998)
- [2] K. R. Lang und C.A. Whitney, Planeten – Wanderer im All, Springer-Verlag, Berlin (1993)
- [3] F. M. Neubauer, J. Geophys. Res. **85**, 1171 (1980)
- [4] F. M. Neubauer, in: K.-H. Glasmeier und M. Scholer (Hrsg.), Plasmaphysik im Sonnensystem, BI-Wissenschaftsverlag, Mannheim (1991), S. 184
- [5] S. Preusse, A. Kopp, J. Büchner und U. Motschmann, Astronomy and Astrophysics **460**, 317 (2006)

DER AUTOR

Andreas Kopp (FV Extraterrestrische Physik) hat an der Uni Bochum Physik studiert und 1995 promoviert. Nach Post-Doc-Aufenthalt am MPI für Aeronomie (jetzt Sonnensystemforschung) in Katlenburg-Lindau und Bochum ist er seit 2008 an der Uni Kiel tätig. Schwerpunktmäßig arbeitet er an numerischen Simulationen der magnetischen Wechselwirkung zwischen Monden und Magnetosphäre sowie zwischen (extrasolaren) Planeten und Sonnen- bzw. Sternwind. In seiner Freizeit befasst er sich mit alter Musik, vor allem mit der Musik der Kastraten und den Komponisten Heinrich Ignaz Franz von Biberen und Dieterich Buxtehude.

