

## Vulkanismus im Planetensystem – ein Überblick

Prof. Dr. Ralf Jaumann (Freie Universität Berlin, Institut für geologische Wissenschaften)

**Vulkanismus ist schon auf unserem Planeten ein faszinierendes Phänomen. Nimmt man auch noch andere Himmelskörper in den Blick, dann zeigt sich, dass Vulkanismus ein grundlegender Prozess in unserem Sonnensystem ist.**

- Vulkane erklären sich aus dem Wärmeausgleich zwischen Himmelskörpern und dem umgebenden Weltall.
- In unserem Sonnensystem sind sie ein verbreitetes Phänomen, das aber sehr unterschiedliche Formen und Erscheinungsweisen annehmen kann.
- Neben dem Transport von heißer Materie (Magma/Lava besteht aus Silikaten) gibt es auch Kryovulkanismus, bei dem sich Wasser und Schlamm ähnlich wie Magma verhalten.

Energieerhaltung ist ein fundamentaler Grundsatz der Physik. Energie kann nicht erzeugt werden oder verloren gehen. Allerdings kann sich ihre Form ändern. Bei der Entstehung der Sonne konzentrierte sich fast die gesamte Materie im Stern und nur weniger als 2 Prozent verblieben in der rotierenden Staubscheibe, aus der dann die Planeten unseres Sonnensystems entstanden sind. Diese Scheibe enthielt allerdings fast die gesamte Bewegungsenergie der Protowolke aus gasförmiger Materie, aus der unser Sonnensystem entstanden ist. Unstetigkeiten in dieser Scheibe führten zur Konzentration von Materie und damit zur Zunahme der Gravitation.

Bei diesem Prozess der Zusammenballung von Materie und der Entstehung der Planeten, der Akkretion, wurde Wärme erzeugt. Damit ist ein Planet im Inneren heiß und außen vom extrem kalten Weltraum umgeben. Das Innere wird sehr schnell nach der Planetenentstehung durch eine erste feste erkaltete Kruste aus Gestein vom Weltraum getrennt. Gemäß den Gesetzen der Thermodynamik streben die Temperaturunterschiede mit der Zeit aber einem Ausgleich entgegen. Dabei muss Wärme aus dem Innern eines Planeten durch die feste Kruste zu seiner Oberfläche transportiert werden. Dies geschieht durch geschmolzenes Material (Magma), das

über Vulkane die Oberfläche erreicht und dort erstarrt. Bezüglich dieses Grundsatzes verhalten sich Planeten, Mond und auch einige kleine Körper alle gleich.

### Woher speist sich die Energie im Innern der Planeten?

Unterschiedlich sind jedoch die Energiequellen, die spezielle Art des Energietransportes, was die Effektivität beeinflusst und auch das transportierte Material (z. B. Jaumann, 2015). Bei der Erde ist der Wärmetransport besonders effektiv, weil das Magma nicht nur durch einzelne Schlotte – die Vulkane – nach oben befördert wird, sondern vor allem entlang riesiger Spalten, die den ganzen Planeten durchziehen – den Mittelozeanischen Rücken. Der Erdkruste wird entlang dieser Spalten immer neues Material hinzugefügt, was dazu führt, dass die Kruste horizontal wächst.

Da die Erde aber mehr oder weniger eine Kugel ist, kann die neue Kruste sich nicht beliebig ausdehnen, sondern stößt auf Hindernisse – die Kontinente –, an deren Rändern Krustenmaterial nach unten gedrückt wird, um schließlich im Erdmantel wieder zu schmelzen. Dabei entsteht ein Kreislauf der altes, kaltes Krustenmaterial

versenkt und neues heißes nach oben bringt (z. B. Jaumann et al., 2018). Ein Kreislauf, der auch für die Entstehung des Lebens und die Habitabilität der Erde, ihre Bewohnbarkeit, von Bedeutung ist.

Die Energiequellen eines planetaren Körpers sind vielfältig. Neben der ursprünglichen Akkretionswärme, die aus der Zusammenballung von Material in der Protowolke stammt, spielt auch die bei der Materialtrennung freigesetzte Energie eine wichtige Rolle. Bei diesem Prozess der Differenzierung trennen sich schwere und leichte Stoffe voneinander. Deshalb besteht der Erdkern aus Eisen und aus diesem Grund ist unsere Atmosphäre gasförmig. Vor allem aber kommt dem Zerfall radioaktiver Elemente im Planeteninnern eine wichtige Bedeutung zu. Zu berücksichtigen ist darüber hinaus die sogenannte Gezeitenreibung. Diese kann eine bedeutende Energiequelle sein, die z. B. den Vulkanismus im äußeren Sonnensystem antreibt. Gezeitenwirkung entsteht, wenn ein Himmelskörper beim Orbit um einen anderen durch Gravitation deformiert wird.

Die Akkretionsenergie ist von der Größe des planetaren Objekts abhängig, sie kann aber enorme Werte erreichen. Die Akkretionsenergie der Erde betrug  $2.3 \times 10^{29}$  Joule (Cassen et al., 1982; Janle, 1996; Lissauer & de Pater, 2013). Dies entspricht in etwa eine Milliarde Mal dem heutigen jährlichen weltweiten Energieverbrauch (International Energy Agency, 2009). Mit Ausnahme der kleinen Körper, d. h. der Asteroiden und Kometen, ist die Akkretionsenergie ausreichend, um Planeten und größere Monde vollständig aufzuschmelzen.

In diesen aufgeschmolzenen Magma-Ozeanen trennen sich Elemente und Moleküle in Abhängigkeit ihrer spezifischen Dichte. Schwere Elemente sinken ins Zentrum während leichtere an die Oberfläche aufsteigen. Während dieser Differentiation formt sich ein dichter Kern aus Eisen unter einem schweren heißen Mantel, der von einer leichteren, aber festen Kruste bedeckt wird. Hierbei werden für einen Körper von der Größe und Zusammensetzung der Erde  $10^{31}$

Joule frei, das ist mehr als die Akkretionsenergie (Janle, 1996; Lissauer & de Pater, 2013).

Gewaltige Kollisionen in der Frühzeit des Sonnensystems haben ebenfalls große Energiemengen freigesetzt und zur zusätzlichen Aufschmelzung der entstehenden Planeten beigetragen. Dieser Prozess hat zwar mit der Zeit abgenommen, aber auch noch vor 65 Millionen Jahren, als ein 10 Kilometer großer Asteroid die Erde im Golf von Mexiko nahe der Yukatan-Halbinsel traf, wurden  $4 \times 10^{23}$  Joule (Bralower et al., 1998; Convey et al., 1994) an Energie freigesetzt. Dies entspricht in etwa 100.000 Mal der Sprengkraft des Krakatau-Vulkanausbruchs in der Sundastraße zwischen Sumatra und Java im Jahr 1883 (z. B. Jaumann, 2015). Gewaltige Druckwellen, Erdbeben und Vulkanausbrüche haben dabei fast alles Leben auf der Erde ausgelöscht.

Neben leichten Elementen befanden sich in der Staubwolke um die Sonne auch schwere radioaktive Elemente, die Bestandteil der sich bildenden Planeten und Monde wurden. Ihr stetiger Zerfall stellt für jeden planetaren Körper eine konstante Energiequelle dar, deren zeitliche Wirkung allerdings von der Menge dieser Elemente und damit von der Größe des Körpers abhängt. Etwa die Hälfte der jährlichen Dissipationsenergie der Erde in Höhe von  $2 \times 10^{27}$  Joule stammt aus dem Zerfall von Uran-238 und Thorium-232. Der Rest entstammt der im Kern gespeicherten ursprünglichen Zusammenballungs- und Differentiationswärme (Janle, 1996).

Eine weitere Energiequelle, die bereits genannte Gezeitenreibung, entsteht wenn sich ein Körper im nicht-zirkularen Orbit innerhalb des Gravitationsfeldes eines anderen Körpers bewegt. Die dabei verursachte Deformation erzeugt innere Reibung und damit Wärme. Im Erde-Mond-System erhält die Erde dadurch etwa  $1,6 \times 10^{20}$  Joule pro Jahr (Janle, 1996; Lissauer & Pater, 2013), was verglichen mit dem radioaktiven Zerfall wenig ist. Da die bei der Gezeitenreibung umgesetzte Energie von der Dimension des Gravitationsfeldes abhängt, kann es im sehr viel mächtigeren Jupiter- oder Saturnsystem aber durchaus zur Aufschmelzung von Monden kommen.

## Die Rolle der Vulkane

Der Wärmetransport thermaler Energie geschieht durch Wärmeleitung, Konvektion – Strömungstransport in einer Flüssigkeit – oder Strahlung. Da planetare Körper von einem nahezu perfekten Vakuum umgeben sind, ist der Austausch mit dem Weltraum durch Wärmestrahlung dominiert.

Nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz (Stefan, 1879; Boltzmann, 1884) ist die Strahlungsleistung eines Körpers proportional zur vierten Potenz seiner absoluten Temperatur. Oder weniger kompliziert und der Alltagserfahrung entsprechend: Je heißer ein Körper, desto mehr Energie wird abgestrahlt! Damit war die Abstrahlung am intensivsten, als der planetare Körper noch aufgeschmolzen war. Deshalb bildete sich schnell eine feste Kruste, die wiederum den Strahlungstransport hemmte.

Diese Kruste schirmt, zumindest teilweise, die Reste der Akkretions- und Differentiationsenergie sowie die Wärme aus radioaktivem Zerfall über lange Zeit vom Wärmetransport aus dem Inneren ab. Unter der Kruste setzt Konvektion ein und transportiert die Energie aus dem flüssigen Inneren bis unter diese Kruste. Von hier muss die Energie dann über Wärmeleitung an die Oberfläche gelangen, um wieder per Strahlung an den Weltraum abgegeben zu werden. Alle größeren Körper im Sonnensystem mit einer festen Kruste müssen sich so verhalten. Der geologische Prozess der diesen Wärmetransport leistet, ist der Vulkanismus. Damit ist Vulkanismus ein fundamentaler physikalischer Prozess im Sonnensystem (z. B. Jaumann, 2015). Die Materialien, die durch Vulkanismus transportiert werden, reichen dabei von Gesteinsschmelzen über Wasser zu Gasen.

## Vulkanismus auf den inneren Planeten des Sonnensystems

Die Oberfläche des innersten Planeten Merkur ist ebenso wie der Erdmond durch Einschlagskrater und große Einschlagsbecken gekennzeichnet. Zwischen den Kratern und auch in den

Einschlagsbecken befinden sich ausgedehnte Ebenen. Diese Ebenen sind sehr wahrscheinlich das Ergebnis früher vulkanischer Tätigkeit, was zu mehreren Kilometer mächtigen Ablagerungen aus dünnflüssiger Lava geführt hat. Auch im Bereich des Merkur-Nordpols finden sich zahlreiche Hinweise auf vulkanische Ablagerungen. Ungeklärt ist allerdings, wie sich so große Mengen an Gesteinsschmelzen im relativ dünnen Mantel des Merkur gebildet haben konnten (Jaumann, 2015).

Die Venus ist etwa so groß wie die Erde, hat aber eine sehr dichte CO<sub>2</sub>-Atmosphäre. Das führt zu einem Treibhauseffekt, der eine Erwärmung der Oberflächentemperatur auf bis zu 460° Celsius bewirkt. In der Konsequenz hat die Venus alles Wasser verloren. Auf der Erde ist das Wasser ein geologisches Schmiermittel und trägt erheblich zur Funktion der Plattentektonik bei, die wiederum ein effektiver Prozess der Wärmeabgabe ist. Auf der Venus hat sich dagegen die Hitze unter der immer dicker werdenden Kruste über hunderte von Millionen Jahren gestaut, bis der Druck durch Vulkanausbrüche überall auf der Oberfläche abgebaut wurde. Die weit über tausend Vulkane, die über die ganze Venus verteilt sind, belegen diese Hypothese ebenso wie das junge Alter der Venuskruste. Vor etwa 500 Millionen Jahren wurde die gesamte Venus von mächtigen Lavaablagerungen bedeckt. Unklar ist, ob die Venus heute noch vulkanisch aktiv ist. Frische Ascheablagerungen im Gipfelbereich des höchsten Vulkans Maat Mons lassen dies allerdings vermuten.

## Die Erde und ihr Mond

Die Erde hat den wohl effektivsten und variantenreichsten Vulkanismus im Sonnensystem. Ihre Position im Sonnensystem erlaubt dem Molekül H<sub>2</sub>O einen Aktionsspielraum in allen Aggregatzuständen. Als Treibgas und besonders in der flüssigen Form als Schmiermittel für die Plattentektonik ist es auch ein wichtiges vulkanisches Molekül und unterstützt damit die Mantelkonvektion. In den letzten 10.000 Jahren waren etwa 1500 Vulkane auf der Erde aktiv. Die Erdkruste besteht aus sich gegenseitig verschieben-

den Krustenplatten. Die vulkanische Aktivität konzentriert sich an deren Rändern, wo die Platten untereinander abtauchen sowie in deren Zentrum, wo Magma aufdringt und die Platten auseinanderdrückt. Ein weiterer effektiver Vulkanismus sind die innerhalb einer Platte ausbrechenden Hot Spots. Weil sich die Platten über diese Vulkanzentren hinwegbewegen, entstehen immer neue Vulkanbauten.

Die Plattentektonik hat dabei einige wichtige Auswirkungen für die Funktion der Erde. Das kalte und abtauchende Krustenmaterial kühlt den oberen Mantel, was Konvektion im Mantelmaterial erzeugt. Damit wird auch der untere Mantel gekühlt, was sich wiederum auf den äußeren Kern auswirkt. Damit entsteht auch im Eisenkern Konvektion, wodurch zusammen mit der unterschiedlichen Rotation des festen inneren Kerns gegenüber dem weicheren äußeren Kern das Magnetfeld der Erde entsteht (z. B. Christensen, 2008), was wiederum den von der Sonne ausgehenden Partikelstrom geladener Teilchen um die Erde herumlenkt. Für die Entwicklung des Lebens auf der Erde ist das von erheblicher Bedeutung.

Die Vulkane der Subduktionszonen, dort wo kalte mit Wasser und Karbonaten angereicherte Kruste versenkt wird, setzen neben unterschiedlichen Gasen vor allem Wasserdampf und CO<sub>2</sub> frei, die der Atmosphäre zugeführt werden und als wichtiger Kreislauf zur Stabilisierung der klimatischen Bedingungen auf der Erde beitragen. Ein bestimmter Anteil von CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre war und ist notwendig, um die Temperatur auf der Erde zu stabilisieren und einen für die Biosphäre unabdingbaren hydrologischen Kreislauf zu ermöglichen.

Plattentektonik und Hot Spots führen zu einer weitgehend homogenen Verteilung der vulkanischen Aktivität über den Planeten, was einen kontinuierlichen Wärmefluss in Raum und Zeit ermöglicht. Das ist anders als auf der Venus, wo der Vulkanismus nur alle mehrere hundert Millionen Jahre auftritt, dann jedoch global. Auch auf dem Mars sind die Bedingungen anders. Dort

kommt der Vulkanismus zwar zeitlich kontinuierlich vor, aber hauptsächlich nur in zwei Regionen (Jaumann, 2015).

Die chemischen Gemeinsamkeiten des Erdmondes mit dem Mantel und der Kruste der Erde und der hohe Drehimpuls des Systems sprechen für eine Entstehung des Mondes als Ergebnis einer Kollision (z. B. Jaumann et al., 2018). Der Mond war daher in seiner Anfangsphase ganz aufgeschmolzen, differenzierte und bildete dann eine Kruste, die schnell erkalte. Der Wärmefluss aus dem Mantel ist, entlang der von großen Einschlägen erzeugten Schwächezonen, nach außen gedrungen. Vornehmlich auf der der Erde zugewandten Seite mit ihrer geringeren Krustendicke, füllten sich die großen Einschlagsbecken mit Lava.

Bei seiner heißen Entstehung hat der Mond nahezu alle flüchtigen Bestandteile verloren. Damit ist der lunare Vulkanismus im Gegensatz zu dem auf der Erde gasarm. Die heiße, schnell fließende Lava konnte dabei weite Flächen bedecken, ohne dass große Vulkanbauten entstanden sind (z. B. Jaumann, 2015). Da der Mond relativ klein ist, hat seine Energie aus der Differentiation und dem radioaktiven Zerfall nicht lange genug Wärme geliefert, um den Vulkanismus bis heute aktiv zu halten. Die letzten vulkanischen Aktivitäten auf dem Mond sind vor etwa einer Milliarde Jahren zum Erliegen gekommen.

## Der Mars

Der Mars ist nur etwa halb so groß wie die Erde und hat daher seine ursprüngliche Wärme weitgehend verloren. Auch ist die Erwärmung durch radioaktive Aufheizung wegen der geringeren Menge an radioaktiven Elementen nicht so effektiv.

In der Anfangsphase hat sich auf dem Mars schnell eine dicke Kruste gebildet. Möglicherweise kam es anfänglich und kurzfristig zu plattentektonischen Prozessen, was magnetische Anomalien in der ältesten Kruste vermuten lassen. Diese kamen aber schnell wieder zum Er-

liegen. Es erfolgte keine Kühlung des Mantels und Kerns und damit kam es weder zu einer langfristigen Stabilisierung eines Magnetfeldes noch zu einem ausgeprägten Kreislauf von Gas wie CO<sub>2</sub>, der die Atmosphäre kontinuierlich erneuert. Daher hat der Mars vermutlich große Mengen seiner ursprünglichen Atmosphäre mit dem Sonnenwind an den Weltraum verloren.

Wegen der dicken Kruste blieb der Mantel heiß und gewaltige Magmenreservoirs bildeten sich vornehmlich dort, wo die stärksten durch radioaktiven Zerfall erzeugten Hitzequellen waren. Da sich die Kruste nicht bewegte, entstanden über diesen Hot Spots gewaltige vulkanische Aufwölbungen gekrönt von Schildvulkanen, in deren Umgebung sich ausgedehnte Lavaebenen finden.

Der Vulkanismus auf dem Mars konzentriert sich hauptsächlich in zwei Regionen. Dem Tharsis-Komplex, eine gewaltige vulkanische Aufwölbung mit über 20 Kilometer hohen Schildvulkanen, wobei der höchste Vulkan des Sonnensystems – der Olympus Mons – am nordwestlichen Rand von Tharsis zu finden ist. Die zweite vulkanische Region ist die Elysium-Aufwölbung. Sie ist nicht so gewaltig wie Tharsis, aber ebenfalls von Schildvulkanen dominiert. Die Hauptaktivität des Marsvulkanismus ging vor etwa 100 Millionen Jahren zu Ende, wie die Alter der jüngsten Gipfelkaldern von Olympus Mons und auch Elysium Mons zeigen. Allerdings gibt es sowohl auf Tharsis als auch Elysium sehr junge Lavaströme, sodass auch heute noch von Restaktivitäten ausgegangen werden muss.

### Die Systeme der großen Gasplaneten

Auch die großen Gasplaneten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun strahlen Wärme ab. Allerdings läuft es hier über Konvektion vom tiefen Inneren über die Gashülle zum Weltraum. Die Energiequellen sind auch hier Akkretion, Differentiation und radioaktiver Zerfall, wobei die Akkretion wegen der Größe zumindest bei Jupiter und Saturn auch heute noch eine entscheidende Rolle spielt (z. B. Jaumann et al., 2018).

Betrachtet man die Monde der Gasplaneten, so sind auf einigen sehr junge Oberflächen zu finden. Da die Monde aber zusammen mit den großen Planeten entstanden sind, müssen diese Oberfläche durch Ablagerungen aus dem Inneren erneuert worden sein. Da die Monde kleiner sind als die Planeten des inneren Sonnensystems, reicht die Energien aus Differentiation und radioaktiver Aufheizung bei weitem nicht aus, um heute noch aktiven Vulkanismus zu erklären.

Aufgrund der enormen Masse der Gasplaneten sind die Gezeiteneffekte besonders im Jupiter- und Saturnsystem auch heute noch sehr stark ausgeprägt. Gezeitenreibung heizt das Innere einiger Monde auf und erzeugt so Vulkanismus. Die Geschwindigkeit der Rotation der Gasplaneten wird durch Drehimpulsübertrag auf die Bahnbewegung der Satelliten abgebremst. Gleiches gilt für die Monde, die wegen ihrer geringen Masse schon früh in eine gebundene Rotation gezwungen wurden, also dem Planeten immer dieselbe Hemisphäre zeigen. Sind, wie im Falle der Laplace-Resonanz, mehrere Satelliten in eine Orbit-Orbit-Resonanz eingebunden, verteilen sich die Reibungsverluste auf die beteiligten Satelliten und deren Bahnentwicklung. So stehen Umlaufdauern der drei inneren Jupitermonde Io, Europa und Ganymed stehen in einem ganzzahligen Verhältnis 1:2:4, was als Laplace-Resonanz bezeichnet wird. Der Mond Io umkreist Jupiter genau viermal so schnell wie der Mond Ganymed und zweimal so schnell wie der Mond Europa. Damit treffen sich alle drei Jupitermonde periodisch immer wieder an derselben Bahnposition, was zu einer geringen Auslenkung von Io's Orbit führt. Da Jupiter mehr als die dreihundertfache Masse der Erde besitzt, sind die synchron rotierenden Trabanten Io und Europa auf ihren leicht elliptischen Bahnen im Gravitationsfeld des Jupiters enormen Verformungen und somit der inneren Aufheizung durch Reibung ausgesetzt. Der Verlust an der Rotationsenergie im System von Jupiter und Saturn ermöglicht somit gegenwärtig den Vulkanismus auf einigen Monden (z. B. Jaumann et al., 2018).

## Die Jupitermonde – Lavaströme und Kryovulkanismus

Unter der Gezeiteneinwirkung Jupiters wird Io stark deformiert und aufgeheizt. Die dadurch, seit einer Entstehung, freigesetzten  $10^{31}$  Joule reichen aus, den bis heute aktiven Vulkanismus und einen Magmaozean im Innern aufrecht zu erhalten (z. B. Jaumann, 2015). Die hohe Wärmeenergie erklärt auch, warum Io vollkommen trocken ist, da alles Wasser schon bei der Entstehung ausgetrieben wurde.

Der Jupiter-Mond Io misst nur 30 Prozent des Erddurchmessers, hat aber mehr als 150 aktive Vulkane. Diese sind allerdings um einiges größer als die Vulkane auf der Erde. Ihre Lavaströme erreichen mehrere hundert Kilometer Länge und die Eruptionswolken der Ausbrüche sind noch 300 Kilometer über der Oberfläche zu sehen. Die Zusammensetzung der vulkanischen Auswurfmasse und Ablagerungen in erster Linie basaltisch, allerdings ist in den Laven auch ein hoher Anteil an Schwefel enthalten.

Die schwefelhaltigen Moleküle erscheinen, je nach Temperatur, als unterschiedliche chemische Anordnung der Schwefelatome. Dies verleiht Io ein sehr farbenprächtiges, von gelb über grün, rot, orange und schwarz wechselndes Aussehen. Das vulkanische Treibgas ist hauptsächlich Schwefeldioxid, das sich als weißlicher Frost auf der Oberfläche abgelagert. Wegen seiner geringen Größe hat Io während seiner Entstehung die Zusammenballungsenergie zu schnell verloren, um vollständig zu differenzieren, so dass viel Schwefel im Mantel verblieb und nicht mit dem Eisen in den Kern gelangte wie z. B. in der Erde. Wegen seines geringen Schmelzpunktes gelangt dieser Schwefel dann sehr leicht mit dem Silikatvulkanismus an die Oberfläche.

Ebenso wie Io wird auch der Jupiter-Mond Europa durch Gezeitenreibung aufgeheizt und die Oberfläche ist ebenfalls sehr jung. Europas Kruste besteht aus Eis und wird durch die Gezeitenkräfte periodisch um etwa 60 Meter angehoben. Die freigesetzte Energie ist zwar viel geringer als bei Io, reicht aber um das Wassereis im Inneren

aufzuschmelzen, besonders wenn es mit Salzen vermischt ist. Dringt warmes, salzhaltiges Wasser – vermischt mit tonhaltigem Gesteinsschlamm aus der Mantel/Kern-Grenze – durch die Kruste an die Oberfläche, so bewegt sich die Masse dem Gefälle folgend ähnlich wie Lava oder ein Gletscher. Schließlich gefriert dieses Material an der Oberfläche und erstarrt nach einiger Zeit zu einer mächtigen Ablagerung.

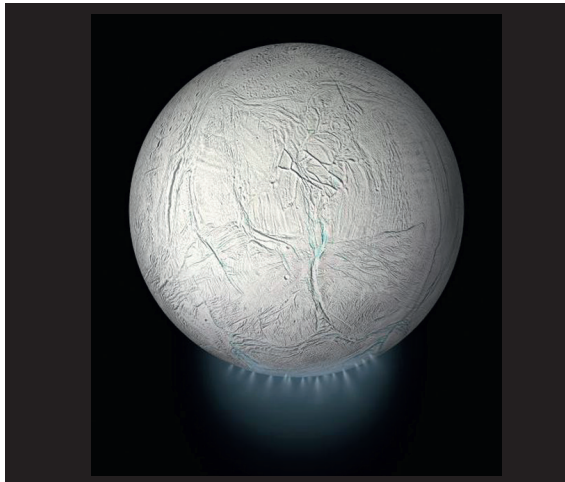
Bei höheren Temperaturen im Inneren von Europa wird Wasserdampf wie bei einem Geysir ausgestoßen, gefriert und fällt als Schnee auf die Oberfläche zurück. Dieser Prozess zusammen mit dem Austreten von Wasser/Schlammgemischen wird Kryovulkanismus genannt. Sich kreuzende Risse, Spalten, Gräben, steile Böschungen, langgezogene Bergrücken, zerbrochene und ineinandergeschobene Schollen sind die dominanten Oberflächenformen auf dem Jupiter-Mond Europa und zeugen von der Beanspruchung der Kruste durch kryovulkanische und eistektonische Prozesse, verursacht durch einen etwa 100 Kilometer mächtigen Ozean unter der Eiskruste (z. B. Jaumann et al., 2018).

Auch der Jupiter-Mond Ganymed hat einen durch Gezeitenreibung erzeugten Wasserozean unter seiner Eiskruste. Allerdings ist seine Kruste mächtiger als bei Europa. Daher sind kryovulkanische Oberflächenformen weniger stark ausgeprägt und seine Oberfläche ist älter. Ganymed hat aber wie Europa eine ausgeprägte Eistektonik.

## Monde von Saturn und Neptun

Aktiver Kryovulkanismus ist auf dem Saturnmond Enceladus zu beobachten. Der Mond misst nur 502 Kilometer im Durchmesser. Seine Oberfläche besteht aus sehr hellem Wassereis und Frost und reflektiert nahezu das gesamte einfallende Sonnenlicht. Eine Hemisphäre weist keine Einschlagskrater auf und ist damit extrem jung (s. Abb. 1 und Abb. 2).

Die Raumsonde Cassini hat im Jahr 2004 in der Südpolregion eine Anzahl von langgezogenen breiten Spalten entdeckt, aus denen gewaltige geysirartige Eruptionen von Wasserdampf, an-



Die **Abbildung 1** zeigt den eisigen Saturnmond Enceladus mit der Wolke aus Eispartikeln, Wasserdampf und organischen Molekülen, die aus Brüchen in der Südpolregion des Mondes sprüht.  
Illustration: NASA/JPL-Caltech

deren Gasen und komplexen organischen Molekülen mehrere hundert Kilometer emporgeschleudert werden. Das ausgeworfene Material gefriert und fällt als Schnee auf die Oberfläche zurück. Die Temperaturen an den Spalten liegen bei  $0^{\circ}\text{C}$ , sind damit also  $200^{\circ}$  wärmer als die Umgebungstemperatur (z. B. Jaumann et al., 2018). Aber nicht alle Eiskristalle fallen zurück, die schnellsten verbleiben in einem Ring (dem E-Ring) auf der Bahn von Enceladus.

Da der Mond gebunden rotiert, zeigt eine Hemisphäre in Flugrichtung, die andere nach hinten. In Flugrichtung sammelt Enceladus dann die Eispartikel ein. Dies führt dazu, dass sich nicht nur am Südpol im Bereich der Ausbrüche, sondern auf der gesamten nach vorne gerichteten Hemisphäre eine mächtige Frostschrift ablagert, die für die hohe Reflexion der Sonneneinstrahlung verantwortlich ist. Die Energie für den Kryovulkanismus kommt auch bei Enceladus aus der Gezeitenreibung des Mondes mit Saturn und der Resonanz mit seinen Nachbarmonden.

Auch bei Enceladus befindet sich zumindest teilweise ein flüssiger Wasserozean unter der Eiskruste der Kontakt zum Gesteinskern hat, was die Zusammensetzung der Auswurfwolke be-

legt. Neben  $\text{H}_2\text{O}$  sind noch andere Gase wie  $\text{CO}_2$  und  $\text{NH}_3$  (Ammoniak) sowie auch komplexere Kohlenwasserstoffverbindungen im Eruptionsmaterial enthalten.

Auch der größte Saturnmond Titan hat einige Oberflächenformen, die an Kryovulkane erinnern. Zudem ist die dicht mit Methan angereicherte Stickstoffatmosphäre dieses großen Mondes vermutlich durch kryovulkanische Tätigkeit entstanden. Die Oberfläche des Neptun-Mondes Triton besteht aus Wassereis und gefrorenem Stickstoff. Auch hier sprechen kreuzende Risse, Spalten, Gräben, steile Böschungen und ausgedehnte Ebenen für tektonische und kryovulkanische Aktivität. Die Voyager-2-Sonde der NASA hat geysirartige Eruptionen, vermutlich von Stickstoff, beobachtet, die bis zu 8000 Kilometer über die Oberfläche reichten. Diese Eruptionen ebenso wie ausgedehnte Ebenen kommen besonders nahe dem subsolaren Punkt vor. Dies legt die Vermutung nahe, dass jahreszeitlich bedingte Sonneneinstrahlung Gas im Untergrund mobilisiert.

### Die Zwergplaneten Pluto und Ceres

Auch auf Pluto finden sich aus Stickstoff-, Methan- und Kohlenmonoxideis bestehende Ebenen. Die größte davon, Sputnik Planum, zeigt an einigen Stellen große, mehreckige Muster, die als Konvektionszellen interpretiert werden.

In diesen Zellen sind große Blöcke aus Wassereis eingebettet, deren Ränder von tiefen Einsenkungen umgeben sind. Vermutlich wurde in Sputnik Planum die Wassereiskruste durch austretenden flüssigen Stickstoff aufgebrochen, wodurch sich Krustenblöcke in dem ausfrierenden Stickstoffsee bewegen konnten. Da das Wassereis wärmer ist als Stickstoff, sublimierte dieser an den Rändern der Schollen, wodurch Verdampfungsflöcher in Form der Einsenkungen entstanden sind. Der verdampfte Stickstoff ist an den gebirgigen Rändern von Sputnik Planum wieder ausgefroren und hat dort große Gletscher gebildet, die zurück in das Becken Sputnik Planum geflossen sind. Allerdings zeigen einige Berge auch zentrale Einsturzsenken, was auf kryo-

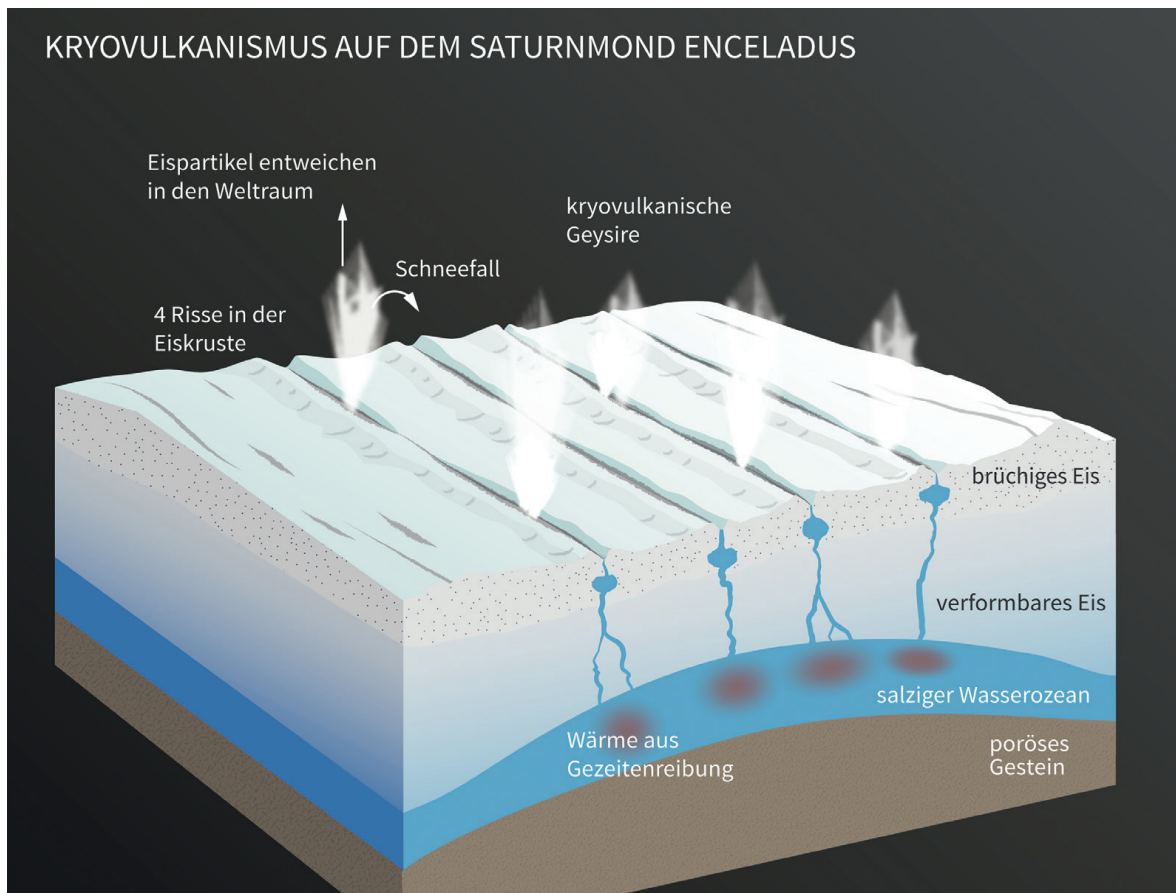


Abb. 2: Schematische Darstellung des Kryovulkanismus auf dem Saturnmond Enceladus.  
Grafik: Wissensplattform Erde und Umwelt, eskp.de / CC BY 4.0

vulkanische Aktivität hindeutet, die möglicherweise durch den großen Einschlag, der das Sputnik Becken bildete, ausgelöst wurde (z. B. Jaumann et al., 2018).

Auch auf dem anderen Zwergplaneten Ceres im Asteroidengürtel hat man domartige Aufwölbungen (Ahuna Mons) und ebenfalls domartige karbonathaltige helle Ablagerungen im Zentrum eines 92 Kilometer großen Einschlagskraters entdeckt, die auf hydrothermale kryovulkanische Prozesse zurückgeführt werden (z. B. Jaumann et al., 2018). Wie jedoch diese hydrothermalen Prozesse genau abgelaufen sind, was sie ausgelöst hat und wie es zur Ablagerung des hellen Materials kam, ist noch nicht vollständig geklärt.

Der Blick in unser Sonnensystem zeigt also, dass Vulkanismus eine Eigenschaft vieler Himmelskörper ist. Deutlich wird ebenso, dass dieser, trotz der erheblichen Bandbreite, die das Phänomen auf der Erde schon aufweist, noch vielfältiger und faszinierender ist als auf unserem Planeten. Das gilt insbesondere für den Kryovulkanismus, der funktional ähnlich dem Magma-Vulkanismus ist, aber völlig andere Medien ins Spiel bringt. In allen Fällen aber ist es letztlich der Wärmeausgleich nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, der vulkanische Phänomene motiviert. Man darf gespannt sein, was der Kosmos den Vulkanologen in Zukunft noch präsentieren wird.



## Referenzen

- Boltzmann, L. (1884). Ableitung des Stefan'schen Gesetzes, betreffend die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur aus der electromagnetischen Lichttheorie. *Annalen der Physik*, 258(6), 291-294, doi:10.1002/andp.18842580616
- Bralower, T. J., Charles K. Paull, C. K. & Leckie, R. M. (1998). The Cretaceous-Tertiary boundary cocktail: Chicxulub impact triggers margin collapse and extensive sediment gravity flows. *Geology*, 26(4), 331-334. doi:10.1130/0091-7613(1998)026<0331:TCTBCC>2.3.CO;2
- Cassen, P. M., Peale, S. J. & Reynolds, R. T. (1982). Structure and evolution of the Galilean Satellites. In D. Morrison (Hrsg.), *Satellites of Jupiter* (S. 93-128). Tucson: Univ. of Arizona Press.
- Christensen, U. (2008). A sheet-metal geodynamo. *Nature*, 454, 1058-1059. doi:10.1038/4541058a
- Covey, C., Thompson, S. T., Weissman, P. R. & MacCracken, M. C. (1994). Global climatic effects of atmospheric dust from an asteroid or comet impact on Earth. *Global and Planetary Change*, 9, 263-273. doi:10.1016/0921-8181(94)90020-5
- International Energy Agency – IEA. (2009). *World Energy Outlook*. Paris: IEA Publications.
- Janle, P. (1996a). Vulkanismus im Planetensystem, Teil 1: Grundlagen und Vulkanismus auf Erde und Mond. *Sterne und Weltraum*, 35(1), 20-29.
- Janle, P. (1996b). Vulkanismus im Planetensystem, Teil 2: Vulkanismus der terrestrischen Planeten. *Sterne und Weltraum*, 35(2), 102-115.
- Janle, P. (1996c). Vulkanismus im Planetensystem, Teil 3: Vulkanismus im Jupitersystem. *Sterne und Weltraum*, 35(5), 357-363.
- Jaumann, R. (2015). Volcanism in the Solar System. *SPATIUM*, 35, 3-19.
- Jaumann, R., Köhler, U., Sohl, F., Tirsch, D. & Pieth, S. (2018). *Expedition zu fremden Welten: 20 Milliarden Kilometer durch das Sonnensystem*. Heidelberg: Springer. doi:10.1007/978-3-662-54996-4
- Lissauer, J. J. & de Pater, I. (2013). *Fundamental Planetary Science: Physics, Chemistry and Habitability*. New York: Cambridge Univ. Press.
- Stefan, J. (1879). Über die Beziehung zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur. *Sitzungsberichte der mathematisch-naturwissenschaftlichen Classe der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften*, 79, 391-428.

# Impressum

## Herausgeber

Helmholtz-Zentrum Potsdam  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ  
Telegrafenberg  
14473 Potsdam

## Redaktion

PD Dr. Dierk Spreen  
Jana Kandarr  
Oliver Jorzik

## Layout

Pia Klinghammer

**E-Mail:** [redaktion-eskp@gfz-potsdam.de](mailto:redaktion-eskp@gfz-potsdam.de)

Alle Artikel sind auch im Internet abrufbar:

<https://themenspezial.eskp.de/vulkanismus-und-gesellschaft/inhalt-937231/>

**Stand:** September 2020

**Heft-DOI:** [doi.org/10.2312/eskp.2020.2](https://doi.org/10.2312/eskp.2020.2)

**ISBN:** 978-3-9816597-3-3

## Zitiervorschlag:

Jorzik, O., Kandarr, J., Klinghammer, P. & Spreen, D. (Hrsg.). (2020). *ESKP-Themenspezial Vulkanismus und Gesellschaft. Zwischen Risiko, Vorsorge und Faszination*. Potsdam: Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. doi:10.2312/eskp.2020.2

## Einzelartikel:

[Autor\*innen]. (2020). [Beitragstitel]. In O. Jorzik, J. Kandarr, P. Klinghammer & D. Spreen (Hrsg.), *ESKP-Themenspezial Vulkanismus und Gesellschaft. Zwischen Risiko, Vorsorge und Faszination* ([Seitenzahlen]). Potsdam: Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. doi:[DOI-Nr.]

Die Verantwortung für die Inhalte der Einzelbeiträge der vorliegenden Publikation liegt bei den jeweiligen Autorinnen und Autoren.

Empfehlungen zum Verhalten an aktiven Vulkanen, Vulkaninfos für Reisende usw. sind nach bestem Wissen entwickelt worden. Dennoch können das GFZ sowie andere beteiligte Zentren oder Institutionen nicht verantwortlich gemacht werden und keinerlei Haftung für Schäden übernehmen, die durch die Beachtung dieser Hinweise entstehen. Das Gleiche gilt für die zu dieser Publikation beitragenden Autorinnen und Autoren oder in dieser Publikation zitierte Personen.



Text, Fotos und Grafiken soweit nicht andere Lizenzen betroffen:  
eskp.de | [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)