

Heiße Löcher im Eis

(In Bezug auf den SuW-Beitrag „Ein Maulwurf für Enceladus“ in Heft 5/2012)

Uwe Herbstmeier

Wieviel Energie braucht man, um eine 100 m dicke Eisschicht zu durchbohren? Diese Frage steht am Anfang eines kühnen Traums von Forschern, die die Oberfläche des Saturnmondes Enceladus durchbohren wollen.

Ein wichtiger Begriff der Physik, Energie, ist ein Schwerpunktthema der Mittelstufe. An Hand dieses außergewöhnlichen Beispiels soll das Konzept der Energie vertieft und dabei die wunderbare Welt des faszinierenden Ringplaneten in unserem Sonnensystem näher kennengelernt werden.

Dieser Beitrag ergänzt einige WIS-Artikel, die sich speziell mit dem Saturn-System beschäftigen. Die Serie zusammengenommen bietet die Möglichkeit zu einer Reihe von Referaten bzw. Themenstunden:

[[WIS-01](#)] Dirk Brockmann-Behnsen: Entdeckungsreise im Saturnsystem

[[WIS-02](#)] Christian Wolff: Plattentektonik auf Saturnmond Enceladus

[[WIS-03](#)] Oliver Schwarz: Keine einfache Scheibe – zur (Schul-)Physik der Saturnringe

[[WIS-04](#)] Olaf Fischer: Titan - der Mond mit Atmosphäre

[[WIS-05](#)] Gottfried Groschopf: Die koorbitalen Saturn-Monde 1980 S1 und 1980 S3

Im [ersten Teil](#) des vorliegenden WIS-Beitrags steht der Überblick über Saturn und seine Monde im Mittelpunkt. Dabei wird ermittelt, welche Umgebungsbedingungen dort im Vergleich zu der Lage der Erde herrschen. Abgestimmt mit dem Kunstunterricht können die grundlegenden Strukturen plastisch erarbeitet werden.

Im [zweiten Teil](#) werden das Ziel der geplanten Mission zu Enceladus umrissen und die Anforderungen an die Technik erkundet.

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Astronomie	Planeten, Kleinkörper	Saturn, Enceladus, Sonnenstrahlung
Physik	Mechanik, Optik, Wärmelehre	Potentielle Energie, Strahlungsenergie, Wärmeenergie
Fächer- verknüpfung	Astro-Physik Astro-Kunst	Vergleich der Größenordnung der Energie in der Lage der Körper, in der Sonnenstrahlung und in Wärmeenergie, Auswahl von Materialien, um grundsätzliche Strukturen im Saturnmond plastisch darzustellen
Lehre allgemein	Kompetenzen (Wissen und Erkenntnis), Unterrichtsmittel	Suche und Auswahl von Informationen aus Büchern und Internet-Artikeln, Leseverständnis, Genaues Betrachten von Bildern, Vergleich von ähnlichen Größen aus unterschiedlichen Bereichen, Technikkompetenz, Teamarbeit in Kleingruppen, Darstellungskompetenz, Ausdrucksfähigkeit



Links:
Wassergeysire auf dem Saturn-
mond Enceladus, beobachtet von
der Raumsonde Cassini (Quelle:
NASA/JPL/Space Science Institute).
Rechts:
Eine mögliche Art, Löcher in Eis zu
bohren - die Elektroheizung, hier in
Form einer gewöhnlichen Ceran-
feld-Kochplatte.

Thema 1: Das Saturn-System - Eigenschaften und Energiebetrachtung

Eigenschaften des Saturn-Systems

Um die Fragestellungen hinter der geplanten Enceladus-Mission besser einordnen zu können, wird den Schülern zunächst das Saturn-System nähergebracht. Dies kann in Form von Referaten erfolgen, deren Themeninhalte grob vorgegeben werden. Mögliche Fundorte für die relevanten Informationen sind [hier](#) aufgelistet.



Der Planet Saturn (Quelle: NASA/JPL).

Themen, die in den Referaten aufgegriffen werden sollten: Saturn als Planet im Sonnensystem, Eigenschaften des Saturn, Saturnringe, Saturnmonde.

→ [Arbeitsblatt mit Referatauftrag zum Saturnsystem](#)

→ [Arbeitsblatt mit Fragen zum Saturnsystem](#)

Energieformen im Saturnsystem

Anhand der Informationen über das Saturn-System sollen nun die Begriffe Energie und Leistung vertieft werden. Gerade der Vergleich mit den Alltagsgrößenordnungen bietet dabei eine weitere Veranschaulichung der Begriffe. Der erste Schritt besteht darin, dass die verschiedenen Energieformen ermittelt werden.

→ [Arbeitsblatt Saturn-System, Aufgabe 1.](#)

Um die Größenordnung einiger wichtiger Energieformen auch quantitativ zu bestimmen, sind Formalismen zur Gravitation und zu Kugeloberflächen notwendig. Diese werden in der Mittelstufe allerdings meist erst nach dem Schwerpunktthema Energie eingeführt. An Hand einfacher Argumente sollen jedoch die wichtigsten Zusammenhänge vorgestellt und vertieft werden.

Potenzielle Energie - Newtonsches Gravitationsgesetz

Die Näherung $F = m \cdot g$ für Orte nahe der Erdoberfläche wurde bei Einführung der Schwerkraft als Grundgleichung vorgestellt. Im Rahmen des Unterrichts wurde dabei bereits angedeutet, dass der Ortsfaktor g , die Schwerebeschleunigung, nicht unabhängig vom Ort ist. Auch die Änderung des Wertes von Planet zu Planet, ist Thema des Unterrichts.

Im ersten Schritt wird die Abhängigkeit des Ortsfaktors von der Masse des anziehenden Körpers (M) eingeführt. Dabei wird aus $g \rightarrow G' \cdot M$. Auch die deutliche Abnahme der Schwerkraft mit dem Abstand der Körper zueinander wurde bereits im Unterricht aufgezeigt. Hierzu dient auch der Vergleich eines fallenden Apfels mit dem Mond, ein Vergleich der bekanntlich bereits Newton zugeschrieben wird. Damit wird aus $G' \cdot M \rightarrow G \cdot M \cdot r^{-2}$ mit der Gravitationskonstante $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{kg}^{-2} \cdot \text{m}^2$. Dabei wird der Abstand vom Mittelpunkt des anziehenden Himmelskörpers gezählt.

In der [Aufgabe 2 des Arbeitsblatts Saturn-System](#) werden diese Zusammenhänge genutzt, um den Wert der Ortsfaktoren verschiedener Planeten mit dem der Erde zu vergleichen. Nun ist die Grundlage geschaffen, um die potenzielle Energie im Saturnsystem auch quantitativ abschätzen zu können

→ [Arbeitsblatt Saturn-System, Aufgabe 3.](#)

Strahlungsenergie der Sonne im Saturnsystem

Um die Temperaturverhältnisse im Saturnsystem zu ermitteln, wird die Strahlungsenergie der Sonne am Ort des Ringplaneten aus den Werten bei der Erde abgeschätzt.

Bisher wurde im Unterricht nur der Kreisumfang, nicht die Kugeloberfläche behandelt. Dennoch kann der Abstandseffekt abgeschätzt werden. Aus der Kenntnis der Veränderung des Kreisbogens mit dem Radius, und durch die Betrachtungen zweier Kreise, die senkrecht zueinander stehen, wird auf den Zusammenhang für die Kugel geschlossen.

→ [Arbeitsblatt Saturn-System, Aufgabe 4.](#)

Mit Hilfe dieser Überlegungen und dem Wert der Strahlungsleistung der Sonne am Ort der Erde wird die Energie im Bereich des Saturnsystems abgeschätzt.

→ [Arbeitsblatt Saturn-System, Aufgabe 5.](#)

Die Strahlung der Sonne wird auf den Oberflächen der Körper in Wärme umgesetzt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ein Teil (a_B) der Strahlung von der Oberfläche des Körpers zurückreflektiert wird. Der Zusammenhang zwischen der effektiven Temperatur (T_{eff}) des Saturnmondes Enceladus und der Strahlungsleistung der Sonne am Ort des Saturn-Systems pro Fläche (PA) beträgt (S = Stefan-Boltzmann-Konstante = $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)

$$T_{\text{eff}}^4 = \frac{PA \cdot (1 - a_B)}{4 \cdot S}$$

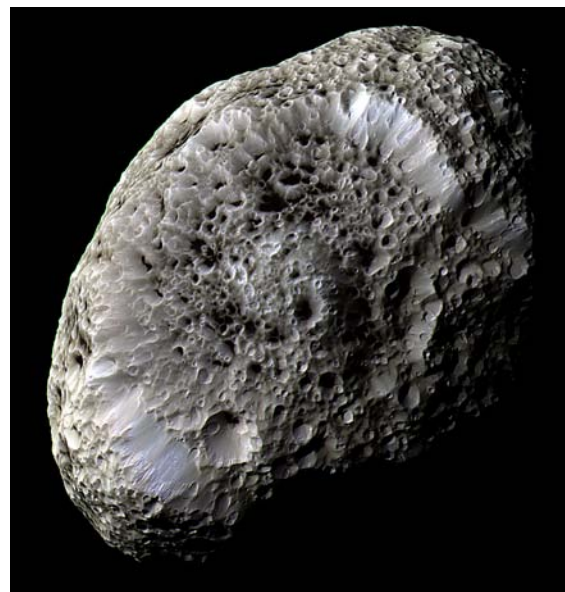
Daraus ergibt sich mit einem Wert von $a_B = 0,9$ eine Oberflächentemperatur von $75 \text{ K} = -198^\circ \text{ C}$.

Kooperation mit dem Kunstunterricht zu den Unterschieden der Erscheinungsbilder im Saturnsystem

Die verschiedenen Strukturen im Saturnsystem zeigen sehr verschiedene Erscheinungsformen. In Zusammenarbeit mit dem Kunstunterricht können diese Erscheinungsformen plastisch herausgearbeitet werden. Dabei bieten sich folgende Objekte an:

- der Planet Saturn mit Wolkenbändern,
- die dünnen körnigen Saturnringe,
- der durch Wolken verhüllte Mond Titan,
- der gefurchte und aktive Mond Enceladus,
- der schwarz-weiße Mond Iapetus,
- der löcherige Mond Hyperion,
- die unregelmäßigen Monde, z. B. Pandora.

→ [Vorschläge zur Umsetzung](#)



Der Saturnmond Hyperion (Quelle: NASA/JPL/Space Science Institute).

Thema 2: Ein Loch im Eispanzer des Enceladus

Der Mond Enceladus und das Ziel der Mission

Nun werfen wir einen besonderen Blick auf den Mond Enceladus. Auch hier bietet sich an, die Eigenschaften des Mondes zusammen mit den Inhalten des diesem WIS-Beitrag zugrunde liegenden Artikels "Ein Maulwurf für Enceladus" in der Zeitschrift *Sterne und Weltraum* (Mai 2012) in Form eines Referats den Schülern nahe zu bringen.

Themen, die im Referat aufgegriffen werden sollten:
Abstand des Mondes zu Saturn, Größe des Mondes, Erscheinungsbild, Kryovulkanismus, Zusammensetzung der Oberfläche, Ziele und Ideen der Enceladus-Mission.

[→ Arbeitsblatt Referat-Themen](#)



Energiebedarf der Enceladus-Mission

Die Sonde soll sich durch das Eis schmelzen. Zunächst müssen die verschiedenen Voraussetzungen ermittelt werden, dann soll anhand des [Arbeitsblatts Enceladus-Mission](#) der Energiebedarf abgeschätzt werden, der zum Erreichen des Ziels notwendig ist. Für eine einfache Abschätzung der Schwierigkeiten genügen die angegebenen Näherungen. Die Energie soll aus dem Landemodul genommen werden. Mit den angegebenen Wirkungsgraden der Solarpaneele soll abgeschätzt werden, wie groß die Fläche zu wählen ist.

Eine Ergänzung des der theoretischen Überlegungen und Betrachtungen der Probleme kann durch eine experimentelle Überprüfung des erwarteten Verhaltens des "Maulwurfs" auf dem Enceladus-Mond bieten: Dazu kann eine Wassereisplatte vorbereitet werden. Man kann dann beobachten, was geschieht, wenn man einen aufgeheizten Eisenkörper unterschiedlicher Größe auf diesen Eiskörper setzt.

WIS-Artikel zum Saturnsystem

[WIS-01]	Entdeckungsreise im Saturnsystem	Dirk Brockmann-Behnen
[zum Zitat]	Ein Spiel zum Kennenlernen der Saturnmonde und der Cassini-Mission.	
[WIS-02]	Plattentektonik auf Saturnmond Enceladus	Christian Wolff
[zum Zitat]	Das Erscheinungsbild des Saturnmondes Enceladus wird verwendet um grundlegende Antriebsmechanismen (Auftrieb heißer Massen) der Plattentektonik zu erklären.	
[WIS-03]	Keine einfache Scheibe – zur (Schul-)Physik der Saturnringe	Oliver Schwarz
[zum Zitat]	Achtung: Artikel für die Oberstufe. Auf Mittelstufenthemen übertragen können die Saturnringe ein interessantes Objekt darstellen, um die Eigenschaften eines Teilchensystems und die formgebenden Einflüsse der Schwerkraft zu beschreiben.	
[WIS-04]	Titan - der Mond mit Atmosphäre	Olaf Fischer
[zum Zitat]	Achtung: Artikel für die Oberstufe. Auch für die Mittelstufe bietet dieser Beitrag viele Anregungen: Insbesondere für die genaue Betrachtung und Auswertung von Bildmaterial und für die Bildung von Analogieschlüssen. Dabei wird der größte Saturnmond näher kennengelernt.	
[WIS-05]	Die koorbitalen Saturn-Monde 1980 S1 und 1980 S3	Gottfried Groschopf
[zum Zitat]	Achtung: Artikel für die Oberstufe. Hier nur als ergänzende Information für den Lehrer von Interesse	

Mögliche Fundorte für Informationsmaterial über das Saturn-System

Bücher

In den Schul- und öffentlichen Bibliotheken findet sich meist eine Sammlung von Büchern zur Astronomie, die auch die Planetensysteme behandeln. Hier nur eine ganz kleine Auswahl:

- Baker, D., Ratcliff, T., 2010, Extreme Orte, Rohwolt-Verlag
- Chown, M., 2012, Das Sonnensystem, Fackelträger-Verlag
- Hahn, H.-M., 2004, Unser Sonnensystem, Kosmos (Franck-Kosmos) Verlag
- Herrmann, J., Bukor H., Bukor, R., 2005, dtc-Atlas Astronomie, dtv
- Keller, H.-J., Engelmann, J.: 2005, Wörterbuch der Astronomie, Kosmos-Verlag
- Lang, B., 2007, Das Sonnensystem, Spektrum Akademischer Verlag
- Lang, K., 2011, The Cambridge Guide to the Solar System, Cambridge University Press (englisch)
- Zeitschrift *Sterne und Weltraum*, Dossier 1/2008, Faszinierendes Sonnensystem

Links

Viele Informationen können im Internet gefunden werden. Hier ist eine Auswahl hilfreicher Quellen zu finden. Einige der Seiten sind auf Englisch.

- [Wikipedia - Saturn](#)
- [Wikipedia - Saturnmonde \(Liste mit weiterführenden Links\)](#)
- [ESA-Seiten zum Saturn](#), insbesondere Cassini-Huygens-Mission (englisch)
- [NASA-Seiten zum Saturn](#) (englisch)

Arbeitsblätter mit Referatsthemen und Aufgaben

Referat zum Thema „Der Saturn, seine Ringe und seine Monde“ *[zum Thema 1]*

Im Referat soll der Planet Saturn, sein Ringsystem und seine Monde vorgestellt werden.

Dabei sollen mindestens folgende Punkte aufgegriffen werden:

- Saturn als Planet im Sonnensystem: Entfernung zur Sonne, Umlaufdauer
- Eigenschaften des Saturn: Größe, Masse, Eigendrehung
- Saturnringe: Woraus bestehen sie, Durchmesser und Dicke des Ringsystems
- Saturnmonde: Anzahl, Anordnung, Größe, Masse, Aussehen an Hand einiger Beispiele (Titan, Enceladus, Iapetus, Hyperion, Rhea, Pandora)

Arbeitsblatt zum Saturn-System

[zum Thema 1] [Ergebnisse]

Aufgabe 1: Energieformen im Saturnsystem

Dir wurden die Eigenschaften des Saturnsystems vorgestellt. Finde die verschiedenen Energieformen heraus, die in diesem System auftreten. Beziehe auch die Bahn des Planeten um die Sonne in Deine Betrachtungen mit ein.

Aufgabe 2: Schwerkraft im Planetensystem

Du hast bereits den Zusammenhang der Schwerkraft und deiner Masse kennengelernt: Er ist auf der Erde $F = m \cdot g$ (m : Deine Masse, g : Ortsfaktor = $9,81 \text{ m/s}^2$).

Für die Entfernungen zwischen den Planeten und Monden muss man die Abhängigkeit des Ortsfaktors von den Massen der anziehenden Körper berücksichtigen. Außerdem wird die Abnahme des Wertes von g mit der sehr großen Entfernung der Körper zueinander deutlich spürbar. Nach den

Erkenntnissen von Sir Isaac Newton muss daher g ersetzt werden durch $G \cdot \frac{M}{r^2}$.

Dabei ist G die Gravitationskonstante $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \frac{\text{m}^2}{\text{kg}^2}$, M die Masse des Himmelskörpers und r der Abstand zu seinem Mittelpunkt.

Betrachte die folgende Tabelle und erkläre die unterschiedlichen Ortsfaktoren an den Oberflächen der jeweiligen Planeten. Beachte dabei, dass der deutlich größere Planet Saturn einen ähnlichen Ortsfaktor zeigt wie die Erde.

Körper	Merkur	Erde	Saturn
Masse (Erde = 1)	0,05	1	95,15
Durchmesser (km)	4878	12756	120000
Ortsfaktor g (N/kg)	3,7	9,8	9,3

Aufgabe 3: Potenzielle Energie im Saturnsystem

Saturn kreist um die Sonne, die Ringe und Monde kreisen um Saturn. Berechne aus den folgenden Angaben die potenzielle Energie von Saturn in Bezug zur Sonne und die der Monde Titan und Enceladus in Bezug zu Saturn. Beachte dabei die Angaben in Aufgabe 2 zum Ortsfaktor.

Körper	Abstand zu Sonne / Planet (Mio km)	Masse (kg)
Sonne		$2,0 \cdot 10^{30}$
Saturn	1430	$5,7 \cdot 10^{26}$
Titan	1,22	$1,4 \cdot 10^{23}$
Enceladus	0,24	$8,4 \cdot 10^{19}$

Aufgabe 4: Vergrößerung der Kugeloberfläche mit zunehmendem Radius

Bläst man einen Ballon auf, so vergrößert sich seine Oberfläche. Wie sich die Oberfläche mit zunehmendem Radius der Kugel vergrößert, kann mit Hilfe eines einfachen Modells überlegt werden.

- a.) Betrachte anstatt einer Kugel einen Kreis. Wie vergrößert sich der Umfang des Kreises mit wachsendem Radius von 1 cm auf 9,6 cm? Gib den Zuwachs bezogen auf die ursprüngliche Größe an.
- b.) Stelle Dir vor, eine Kugel setzt sich aus 2 Kreisen zusammen, die senkrecht zueinander stehen. Wie könnte ähnlich zum Kreis in Aufgabe a) eine Vergrößerung der Kugeloberfläche mit zunehmendem Radius bezogen auf die Ausgangsgröße berechnet werden (Tipp: denke dabei auch an die Berechnung eines Rechtecks)?

Aufgabe 5: Sonnenstrahlen im Saturnsystem

Die Sonne strahlt ihr Licht in alle Richtungen aus. D. h., die Strahlungsleistung, also die Energie, die pro Zeiteinheit ausgestrahlt wird, wird gleichmäßig an die Oberfläche einer gedachten umgebenden Kugel verteilt. Diese Kugel vergrößert ihren Radius mit der Geschwindigkeit des Lichts.

Am Ort der Erde hat die Kugel bereits einen Radius von ca. 150 Mio. km. Dort verteilt sich die Strahlungsleistung auf der Kugelschale so, dass 1370 W pro Quadratmeter Kugeloberfläche ankommen.

- a.) Wie viel Energie erreicht in einer Stunde einen Quadratmeter Erdoberfläche? Vergleiche dies mit dem Verbrauch an Elektroenergie bei Dir zu Hause.
- b.) Benutze nun Deine Überlegungen aus Aufgabe 4 und die Tatsache, dass die Gesamtenergie der Strahlung auf ihrem Weg zum Saturn erhalten bleibt und schätze ab, wie viel Leistung pro Quadratmeter Fläche im Saturnsystem zur Verfügung steht. Der Abstand von Saturn zur Sonne ist 9,6-mal größer als der der Erde von der Sonne.
- c.) Die Planeten und Monde reflektieren das Sonnenlicht zum Teil zurück bzw. sie absorbieren es. Wie viel Leistung wird durch den Saturnmond Enceladus verschluckt? Seine gesamte Oberfläche beträgt 804.360 km², und es werden 90 % der Strahlung der Sonne wieder in den Weltraum reflektiert.
- d.) Was geschieht mit der nicht reflektierten Energie?

Referats-Thema „Der Saturn-Mond Enceladus“

[zum Thema 2]

Im Referat soll der Mond Enceladus vorgestellt werden. Zurzeit ist eine Satellitenmission in Planung, die auf dem Mond landen soll. Lies dazu den Artikel "Ein Maulwurf für Enceladus" aus der Zeitschrift *Sterne und Weltraum* Mai 2012.

Berichte über folgende Punkte:

- Entfernung des Mondes zum Saturn, Umlaufdauer
- Größe und Masse des Mondes
- Aussehen, Zusammensetzung der Mondoberfläche und ihre Temperaturen
- Kryovulkanismus auf Enceladus, Was ist Kryovulkanismus?
- Planungen der ESA-Mission zu Enceladus, ihre Ziele

Arbeitsblatt zur Enceladus-Mission

[zum Thema 2]

[Ergebnisse]

Aufgabe 1: Missionsplanung

Ziel der Enceladus-Mission ist es, einen Körper zur flüssigen Wasserlinse unterhalb der Eis-Oberfläche des Saturnmondes Enceladus zu bringen. Der Körper soll sich durch die Oberfläche schmelzen.

Beschreibe, wie sich aus Deiner Sicht dieses Ziel erreichen lässt, und was sich im Einzelnen auf dem Weg der Sonde durch den Eispanzer abspielt. Bedenke dabei auch, dass der Mond (fast) keine Atmosphäre hat (kein Atmosphärendruck).

Aufgabe 2: Energiebedarf

Schätze an Hand des Bildes im Artikel „Ein Maulwurf für Enceladus“ der Zeitschrift *Sterne und Weltraum* Mai 2012 eine mögliche Größe des "Maulwurfs" ab. Nähere diesen Körper durch die Form eines Quaders an. Wie viel Energie benötigt der Maulwurf um eine 100 m dicke Eisschicht zu durchqueren? Die Oberflächentemperatur auf dem Mond beträgt -198°C . Nimm an, dass der Eispanzer nur aus Wasser-Eis besteht.

Folgende Zusammenhänge sind dabei wichtig:

Um Wasser-Eis um 1°C zu erwärmen, wird eine Energiemenge von $38 \frac{\text{J}}{\text{Mol}^{\circ}\text{C}}$ benötigt. 1 Mol entspricht dabei $V \cdot \frac{\rho}{18,016 \text{ g}}$ mit dem Volumen V des zu erwärmenden Wassers und der Dichte ρ

von Wasser ($0,92 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$).

Der Mond besitzt keine nennenswerte Atmosphäre, d. h. es herrscht kein Atmosphärendruck. Bei diesen Bedingungen verwandelt sich Wasser-Eis bereits bei ca. -73°C direkt in Wasserdampf. Für die Verdampfung bei -73°C wird eine Energie von $50 \frac{\text{kJ}}{\text{Mol}}$ benötigt.

Aufgabe 3: Energiequelle

Um den Energiebedarf aus Solarstrom zu decken, wird eine gewisse Fläche an Solarpanelen benötigt.

- Nimm an, dass die Fläche der Solarpaneele ca. 1 m^2 beträgt. Wie lange benötigt das Mutterschiff, um die notwendige Energie zur Verfügung zu stellen. Beachte dabei, dass die besten Solarpaneele nur einen Wirkungsgrad von höchstens 40 % erreichen.
- Welche Fläche müssten die Solarpaneele haben, um die Energie innerhalb von 3 Monaten aufzubringen?
- Überlege Dir Alternativen.

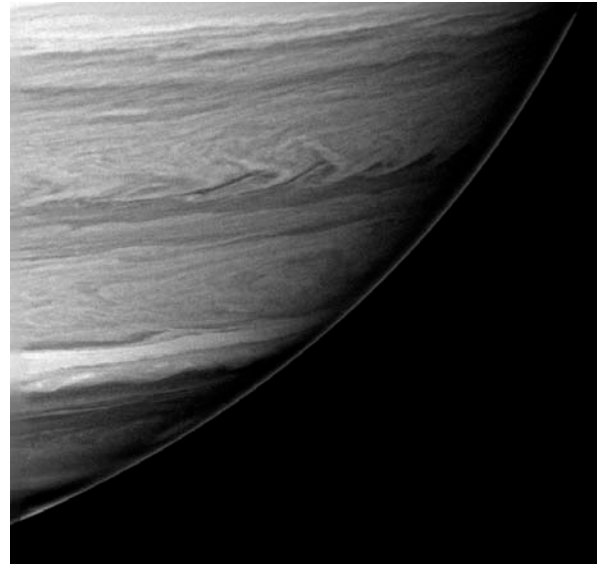
Hinweise und Lösungen

Zum Referat „Der Saturn, seine Ringe und seine Monde“

[\[zur Aufgabe\]](#)

Saturn, ein Planet im Sonnensystem:

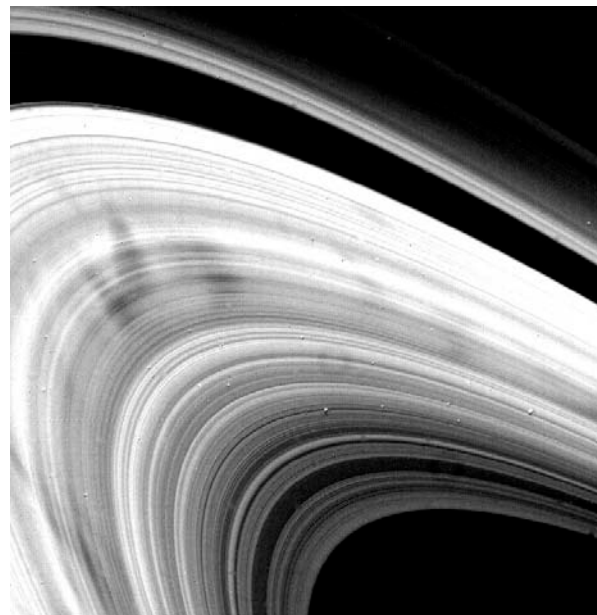
Saturn ist, von der Sonne aus gesehen, der sechste Planet im Sonnensystem. Sein mittlerer Sonnenabstand beträgt 1,432 Mrd. km, das entspricht ca. 9,6-mal dem Abstand Erde-Sonne. Ein Saturn-Jahr dauert ca. 29,46 Erdenjahre. Eine Umdrehung um seine eigene Achse (also ein Saturntag) dauert nur 10 Stunden 14 Minuten. Saturn ist der zweitgrößte Planet nach Jupiter mit einem Äquator-Durchmesser von 120.000 km. Er besteht zum größten Teil aus Gas, das auf Grund des hohen Innendrucks teilweise in feste Form gepresst wird. Im Inneren ist vermutlich noch ein Kern aus einem Gestein-Eis-Gemisch. Von außen kann man nur die oberen Wolkenschichten erkennen, die mit hoher Geschwindigkeit um den Planeten geweht werden. Auffällig sind in der Atmosphäre Wolkenwirbel, die hin und wieder für mehrere Tage auftreten und starke Stürme anzeigen. An den Polen treten immer wieder starke Polarlichter auf.



Kontrastverstärktes Bild der Oberflächenstruktur der Saturnatmosphäre (Quelle: NASA/JPL/Space Science Institute).

Das Ring-System:

Das Auffälligste an Saturn sind seine besonders markanten Ringe (auch andere Riesenplaneten sind "beringt", allerdings weniger deutlich, z. B. Jupiter, Uranus). Diese Ringe, zumindest die in einem kleinen Fernrohr leicht sichtbaren, erstrecken sich über einen Radius von 67.000 km bis 180.000 km um den Planeten. Der schwache E-Ring bis 480.000 km. Sie bestehen aus einer Vielzahl von Eis- und Gesteinsbrocken unterschiedlicher Größe (staubartig bis mehrere Meter), also eine Art von Mini-Moden. Die Ringe sind extrem dünn (maximal 100 m) und enthalten insgesamt eine Masse von "nur" 10^{-5} Erdmassen.

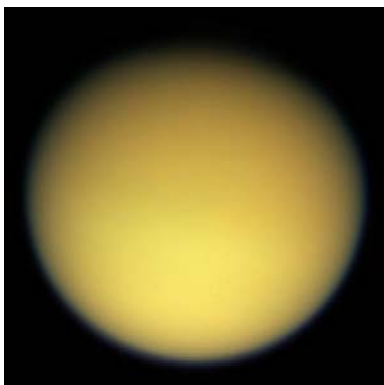


Die Feinstruktur der Saturnringe von Voyager 2 1981 beobachtet (Quelle: NASA).

Monde um Saturn:

Um den großen Gasplanet kreist eine Vielzahl von Monden. Aktuell (Stand Januar 2012) sind 62 beobachtet worden. Dabei kann man zwei Klassen unterscheiden: Große relativ kugelförmige Monde (Radius 110 km bis 2580 km) und kleine Monde (< 100 km, bis wenige km). Die großen Monde sind vermutlich zusammen mit dem zentralen Planeten entstanden. Die inneren kleinen Monde (Abstand 130.000 bis 500.000 km zur Saturnmitte) finden sich innerhalb des Ringsystems und hängen eng mit diesem zusammen. Die weit entfernten kleinen Monde sind vermutlich eingefangene Kleinkörper. In der Mondfamilie von Saturn findet sich eine Vielzahl unterschiedlicher Besonderheiten:

Mond	Durchmesser (km)	Abstand (Mio. km)	Masse 10^{18} kg	Erscheinungsbild
Titan	5150	1,22	134570	Mond mit dichter Atmosphäre
Rhea	1530	0,53	2308	Einschlagkrater wie Erdmond
Iapetus	1436	3,56	1590	Schwarz-weiße Oberfläche
Enceladus	506	0,24	84	Streifige Oberfläche mit Geysiren
Hyperion	284	1,46	?	Schwammartiges Aussehen
Pandora	86	0,14	?	"Kartoffelartiges" Aussehen



Drei Saturnmonde: Titan, Iapetus, Pandora (von links nach rechts), Quelle: NASA/JPL/Space Science Institut.

Zum Arbeitsblatt Saturnsystem

[[zu den Aufgaben](#)]

Aufgabe 1: Energieformen im Saturnsystem

Die folgenden Energieformen können u.a. zusammengestellt werden:

- potenzielle Energie des Saturn in Bezug zur Sonne,
- Bewegungsenergie des Saturn auf seiner Bahn um die Sonne,
- Rotationsenergie des Saturn,
- Strahlungsenergie der Sonne im Bereich des Saturnsystems,
- Strahlungsenergie des von der Oberfläche der Körper im Saturnsystem reflektierten Lichts
- Bewegungsenergie der Wolken / Stürme in der Gasschicht des Planeten Saturn,
- Lichtenergie des Polarlichtes,
- potenzielle Energie der Ringteilchen in Bezug zu Saturn,
- Bewegungsenergie der Ringteilchen auf ihren Bahnen um Saturn,
- potenzielle Energie der Monde in Bezug zu Saturn,
- Bewegungsenergie der Monde auf ihren Bahnen um Saturn,
- Rotationsenergie der Monde,
- Bewegungsenergie der Kleinkörper bei ihrem Einschlag auf eine Mondoberfläche,
- Wärmeenergie bei der Abbremsung der Kleinkörper bei ihrem Einschlag auf eine Mondoberfläche.

Aufgabe 2: Schwerkraft im Planetensystem

Der Ortsfaktor wird zum einen durch die Masse und zum anderen durch den Abstand Oberfläche zu Planetenmittelpunkt bestimmt. Der Ortsfaktor des Merkurs ist zwar auf Grund des Massenverhältnisses nur das ca. 0,05-fache des Erdwertes, aber das Verhältnis der Radien von Merkur und Erde beträgt 0,38 (das bedeutet einen 6,8-mal größeren Ortsfaktor). Zusammengenommen kann damit der Wert von gut einem Drittel des Erdwertes erklärt werden.

Auch bei Saturn kann der ähnlich Wert der beiden Ortsfaktoren durch eine einfache Abschätzung der Größenordnungen verstanden werden. Der Radius von Saturn ist ca. 10-mal so groß wie der der Erde. Quadriert ergibt dies eine Verminderung des Ortsfaktors um den Faktor 100. Gleichzeitig ist die Masse Saturns knapp 100-mal die Erdmasse. Somit heben sich beide Effekte in etwa auf.

Aufgabe 3: Potenzielle Energie im Saturnsystem

Die Gleichung für die potenzielle Energie lautet $E = F \cdot r$. Unter Berücksichtigung des Newtonschen Gesetzes ergibt sich daraus der Zusammenhang $E = \frac{G \cdot m \cdot M}{r}$ mit der Masse M von Sonne bzw. Saturn und der Masse m von Saturn bzw. Mond.

Körper	Abstand zu Sonne / Planet (Mio km)	Masse (kg)	potenzielle Energie E (J)
Sonne		$2,0 \cdot 10^{30}$	
Saturn	1430	$5,7 \cdot 10^{26}$	$5,3 \cdot 10^{37}$
Titan	1,22	$1,4 \cdot 10^{23}$	$4,4 \cdot 10^{33}$
Enceladus	0,24	$8,4 \cdot 10^{19}$	$1,3 \cdot 10^{31}$

Aufgabe 4: Vergrößerung der Kugeloberfläche mit zunehmendem Radius

- a.) Der Umfang des Kreises berechnet sich zu $2 \pi r$ mit Radius dem r . Daher vergrößert sich der Umfang des Kreises um den Faktor $\frac{u_2}{u_1} = \frac{r_2}{r_1} = 9,6$, d. h. von 6,3 cm auf 60,3 cm.
- b.) Ähnlich zum Rechteck könnte sich die Fläche der Kugel aus dem Produkt der Umfänge der beiden senkrecht stehenden Kreise berechnen: $u \cdot u = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot 2 \cdot \pi \cdot r = 4 \cdot \pi^2 \cdot r^2$.
- c.) Dies kommt dem wahren Ergebnis von $4 \pi r^2$ recht nahe. Da nur der relative Vergleich zwischen den Oberflächen zweier Radien wichtig ist, ist die genaue Kenntnis des Vorfaktors nicht notwendig. Die Oberflächen verhalten sich wie $\frac{A_2}{A_1} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$.
- Für das gewählte Beispiel mit $r_2 = 9,6 \cdot r_1$ ergibt sich $A_2 = 92,2 \cdot A_1$

Aufgabe 5: Sonnenstrahlen im Saturnsystem

- a.) $1370 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ ergibt bei einer Einstrahlung von 1 Std. = 3600 s eine Energie von 4932 kWh auf eine Fläche von 1 Quadratmeter. Ein Haushalt verbraucht diese Menge in ca. 1 Jahr.
- b.) Die Leistung, die im Bereich der Erde auf 1 Quadratmeter senkrecht eingestrahlt wird, verteilt sich im Saturnsystem auf eine Fläche, die um den Faktor $9,6^2$ -mal größer ist. D. h., umgekehrt kommt pro Quadratmeter eine Leistung an, die um den Faktor $1/9,6^2$ -mal geringer ist. D. h., $PA_{\text{Saturn}} = \frac{P_{\text{Erde}}}{92,2} = 14,9 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$.
- c.) Sammelt man das gesamte Sonnenlicht auf der Oberfläche des Saturnmondes auf, so ergibt sich ein Wert von $P_{\text{Enceladus}} = PA_{\text{Saturn}} \cdot \frac{A_{\text{Enceladus}}}{2}$ (da nur die sonnenbeschienene Seite zählt). Daher ist: $P_{\text{Enceladus}} = 6 \cdot 10^{12}$ W. Davon werden allerdings 90 % wieder in den Weltraum reflektiert. D.h., der Mond verschluckt daher $6 \cdot 10^{11}$ W/s.
- d.) Die absorbierte Sonnenstrahlung wird in Wärme verwandelt.

Zu „Das Saturn-System im Kunstunterricht“

[zur Aufgabe]

Hinweise für eine mögliche Ausgestaltung

Ziel ist die grundsätzliche Auseinandersetzung mit den Oberflächenstrukturen, weniger mit der exakten Form der Objekte.

Saturn: Die Wolkenbänder unterscheiden sich nur kaum in der Farbgebung. Hier kann im Kunstunterricht versucht werden, dies mit entsprechenden Techniken nachzuvollziehen. Wie kann man mit einfachen Mitteln ebenfalls geringe Farbunterschiede herstellen?

Saturnrings: Feiner Sand, ausgestreut über eine entsprechend große Fläche. Die Dicke der Sandschicht im Verhältnis zu den Ringausdehnungen sollte erfasst und nachgebildet werden. Durch unterschiedliche Sandarten können die verschiedenen Ringstrukturen dargestellt werden.

Titan: Weiche Materialien verdeutlichen die Atmosphäre ohne feste Grenze.

Enceladus: Mit Schnurmethode (Plastisch - Bandkeramik - oder als Druckform) kann die Streifenbildung auf der Mondoberfläche nachgebildet werden. Wassergeysire lassen sich watteartig darstellen.

Iapetus: Schwarz-weiß Kontrast.

Hyperion: Schwammartiger Aufbau (Naturschwamm, gestalteter Kunstschwamm, Basaltgestein).

Rhea: Einschlagkrater - Löcher in einer glatten Oberfläche.

Pandora: Kartoffelform, Knetgummi



Der Saturnmond Rhea
(Quelle: NASA/JPL/Space
Science Institute).

Zum Referatsthema „Der Saturn-Mond Enceladus“

[zur Aufgabe]

Mit einem Durchmesser von 506 km zählt der Mond Enceladus zu den mittelgroßen Monden des Saturnsystems. Er befindet sich in einem Abstand von 238.100 km zu Saturn, d. h. er ist noch im Bereich des äußeren sehr dünnen E-Rings um Saturn zu finden. Er benötigt knapp einen Tag und 9 Stunden für einen Umlauf um Saturn. Die Masse des Mondes von $8,4 \cdot 10^{19}$ kg ist relativ gering.

Die Oberfläche des Enceladus ist geprägt von langen geschwungenen Bändern, die insbesondere im Bereich des Mond-Südpols tigerartig gestreift sind. Die Nordhälfte ist stärker geprägt durch Einschlagkrater, wie man sie vom Erdmond her kennt. Die Oberfläche ist sehr hell, es werden 90 % des Sonnenlichts wieder zurückgeworfen. Kein anderer Himmelskörper reflektiert einen so hohen Anteil an Sonnenlicht. Daher ist die Temperatur mit -198°C sehr niedrig. Die Oberfläche besteht zu einem großen Teil aus Wasser (65 %), aus gefrorenem Wasserstoff (20 %) und gefrorenem Stickstoff bzw. Kohlenmonoxid.

Am Südpol konnten starke Wasserfontänen (Geysire) entdeckt werden, die mindestens 500 km über die Oberfläche des Mondes gelangt sind. Man spricht hier von Kryovulkanismus, da die Geysire aus Bereichen stammen, die zwar relativ zur Oberfläche warm sind, aber mit -163°C immer noch sehr kalt. Die Geysire lassen vermuten, dass unterhalb einer 100 m dicken Eisschicht Zonen mit geschmolzenem Wasser zu finden sind, die durch die innere Wärme des Mondes aufgeheizt werden. Warum dieser Mond im Inneren so warm ist, ist bisher noch nicht völlig klar.

Die Mission zum Mond Enceladus hat das Ziel, die Eisschicht zu durchdringen, um die Wasserlinsen zu erreichen. Dort kann die Zusammensetzung des Wassers gemessen werden. Ggf. sind die Zonen geeignet, um organische Stoffe, gar primitive Lebensformen zu beherbergen. Danach soll gesucht werden. Der Ansatz ist, einen Körper durch das Eis zu schmelzen. Die Energie kommt dabei von der Muttersonde auf der Oberfläche.

Zum Arbeitsblatt Enceladus-Mission

[\[zu den Aufgaben\]](#)

Aufgabe 1: Missionsplanung

Ein mögliches Szenario ist: Der Quader wird so aufgeheizt, dass das -198°C kalte Eis auf ca. -73°C erwärmt wird. Zusätzlich wird noch die Verdampfungswärme aufgebracht. Das Eis in der Umgebung der Messsonde verdampft. Durch den (fast) nicht vorhandenen Atmosphärendruck entweicht anfangs der Wasserdampf sofort. Hat sich der Maulwurf tiefer eingegraben, dann wird vermutlich der Wasserdampf auf dem Weg nach oben wieder verfestigt und setzt sich an den Wänden des Loches fest. Daher muss eine intelligente Führung des Versorgungskabels vorgesehen werden. Denn das Loch kann auch durch den seitlichen Druck komplett verschlossen werden. Je tiefer die Sonde kommt, desto leichter sollte die "Grabarbeit" werden. Es ist zu erwarten, dass in der Tiefe die Temperaturen zunehmen, da ja eine flüssige Wasserlinse vermutet wird.

Aufgabe 2: Energiebedarf

Die Größe der Sonde ist ca. $1\text{ m} \times 0,2\text{ m} \times 0,2\text{ m}$. Daher ist das Volumen das durch eine 100 m dicke Eisschicht zu schmelzen ist von der Größenordnung $100\text{ m} \times 0,2\text{ m} \times 0,2\text{ m} = 4\text{ m}^3$.

Für die Erwärmung dieses Volumens ist eine Energie von $38 \frac{\text{J}}{\text{Mol} \cdot \text{C}} \cdot 125^\circ\text{C} \cdot 204.263\text{ Mol}$ notwendig. Dies sind ungefähr gleich 970.000 kJ . Zusätzlich müssen noch diese 4 m^3 verdampft werden. Dies benötigt eine Energie von $50 \frac{\text{kJ}}{\text{Mol}} \cdot 204263\text{ Mol} = 1 \cdot 10^7\text{ kJ}$.

Insgesamt sind also etwa $1,1 \cdot 10^7\text{ kJ}$ nötig.

Aufgabe 3: Energiequelle

- Um die $1,1 \cdot 10^7\text{ kJ}$ aufzubringen, muss ein Solarpaneel von ca. 1 m^2 bei 40 %-iger Umwandlung der Sonnenenergie von $14,9 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 1,8 \cdot 10^9\text{ s}$ arbeiten. Das sind 58 Jahre.
- Um die Zeit auf drei Monate zu verkürzen, sind daher $1,1 \cdot 10^7\text{ kJ} / (14,9 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 7.776 \cdot 10^6\text{ s}) = 237\text{ m}^2$ (= $15,5\text{ m} \times 15,5\text{ m}$) erforderlich.
- Alternativ könnte man die Sonde noch kleiner gestalten. Eine Verkleinerung der Grundfläche auf ein Viertel würde die benötigte Energie ebenfalls um den Faktor 4 verringern und damit auch die Zeitdauer bzw. die Fläche der Solarpaneele.
Eine weitere Alternative wäre, eine andere Wärmequelle mitzuführen, z. B. eine Radionuklidbatterie.