

Wasser im Umfeld der Sterne

Aufgaben rund um das Thema „Wasserwelt“

In Bezug zum SuW-Beitrag „Zwei wässrige Exoplaneten?“ (Brennpunkt 2139) in SuW 06/2023, Rubrik „Blick in die Forschung: Nachrichten“, Zielgruppe: Oberstufe bis Mittelstufe, WIS-ID: 1571216

Olaf Fischer

Die Exoplanetenforschung stellt heutzutage einen bedeutenden Zweig der Astronomie dar. Die Zahl der nachgewiesenen Objekte wächst beständig und die Daten werden immer genauer. Die vom Sonnensystem her bekannten Planetenklassen (Gesteinsplaneten, Gasriesen, Eisriesen) reichen nicht mehr aus, um die Welt der Exoplaneten zu klassifizieren. Viele neue Klassen sind dazugekommen. Sie bereichern und verändern die Planetenklassifikation. Eine dieser neuen Planetenklassen betrifft die Ozeanplaneten (auch Wasserwelten genannt). Viele spannende Fakten und Fragen verbinden sich mit diesem Planetentyp.

Im WIS-Beitrag wird eine **Aufgabensammlung** zum Problemkreis ‚Wasser im Umfeld der Sterne‘ präsentiert. In den Aufgaben wird u. a. aufgezeigt, wie die Forscher zur Idee der Wasserwelten gekommen sind, es wird der Frage nachgegangen, ob die Erde eine Wasserwelt ist u. v. m. Die Aufgaben rufen mit vielen interessanten und motivierenden **fächerübergreifenden Aspekten** Kenntnisse aus verschiedenen MINT-Fächern ab.

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Astronomie	Planeten, Kleinkörper, Astro-Praxis, Raumfahrt	<u>Ozeanplaneten, Wasserplaneten, Jupitermond Europa, Eismonde, Oortsche Wolke, Komet „Tschurjumow-Gerassimenko“, Nachweis von Exoplaneten, Radialgeschwindigkeitsmethode, Transitmethode, Raumfahrtmission JUICE</u>
Physik	Mechanik, Wellen-Lehre, Thermodynamik, E-Lehre	<u>mittlere Dichte, Schweredruck, Schwerpunktsatz, 3. Keplersches Gesetz, Dopplereffekt, Phasendiagramm, Phasenübergänge, überkritisches Wasser, superionische Eis-Phasen, elektrische Leistung</u>
Fächer- verknüpfung	Astro - Geografie Astro - Chemie Astro - Mathematik Astro - Technik	<u>Wasserbedeckung der Erde, Klimawandel und Meeresspiegel, Aufbau der Erde, Wasser im Erdmantel, Olivin, Ringwoodit relative und absolute Atommasse, atomare Masseinheit, Moleküle in Kometen Prozentrechnung, Kugelschalenvolumen, Potenzgesetze Solarpanel-Kraftwerk</u>
Lehre allgemein	Kompetenzen (Kommunikation, Erkenntnis) Unterrichtsmittel	<u>S recherchieren Daten, S geben Quellen an, S vollziehen astrophysikalische Berechnungen nach, S interpretieren Phasendiagramm, S wenden Kenntnisse und Fähigkeiten aus anderen Fächern an Aufgabensammlung</u>

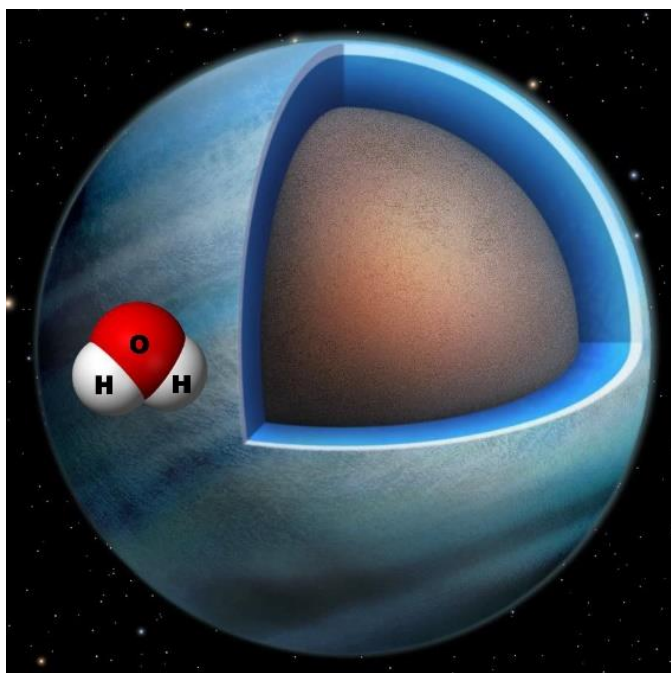
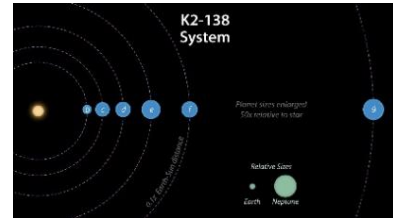


Abbildung 1: Künstlerische Darstellung des (vermuteten) Wasserplaneten Kepler 138 d. Hinsichtlich seines Inneren gleicht er vermutlich einem Gesteinsplaneten wie die Erde einer ist. Diese besteht aus Mineralien in den äußeren Schalen und Eisen und Nickel im Kern. Im Außenbereich unterscheidet sich der Gesteinsplanet Erde aber deutlich vom Exoplanet Kepler 138 d. Während die Erde eine Gesteinskruste besitzt, die zu etwa 70 % von Ozeanen mit einer mittleren Tiefe von 4 km bedeckt ist, besitzt Kepler 138 d vermutlich eine 2000 km dicke Schale aus Wasser in ganz verschiedenen Phasen von Dampf über Wasser bis hin zum „heißen Eis“ (superkritisches Wasser).

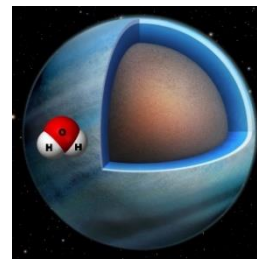
©: Benoît Gougeon (University of Montreal), https://stsci-opo.org/STSci-01GKSB13BVA_YFV47XWAG7B0R9V.jpg, ©: H₂O-Molekül: [2].

Die Aufgabensammlung im Überblick mit 4 Themenbereichen zu Wasser im Umfeld der Sterne (Wasser bei anderen Sternen, auf der Erde, auf Monden, auf Kometenkernen)

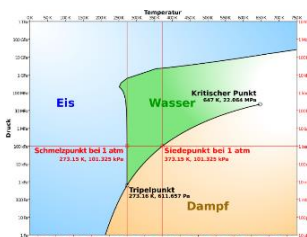
- **Entdeckbarkeit von Kepler 138 c und d**
Astronomie – Physik / Mathematik



- **Wasserwelten bei anderen Sternen**
Astronomie – Geografie / Mathematik



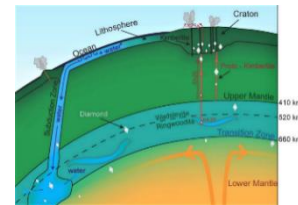
- **„Heißes Eis“**
Astronomie – Physik / Mathematik



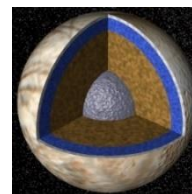
- **Ist die Erde eine Wasserwelt?**
Astronomie – Geografie / Mathematik / Chemie



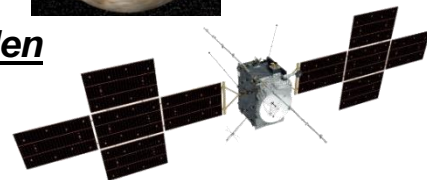
- **Unsichtbare Wasserreserven der Erde**
Astronomie – Geografie / Mathematik



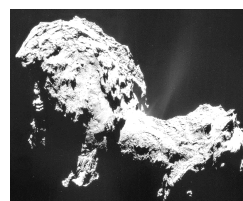
- **Kleine Wasserwelten „vor der Haustür“**
– z. B. Eismond ‚Europa‘
Astronomie – Mathematik



- **Mit der JUICE-Mission zu den Eismonden**
Astronomie – Physik / Technik / Mathematik



- **Wasser in der Oort'schen Wolke**
– Wasser in Kometenkernen
Astronomie – Chemie / Physik / Mathematik



➔ **LÖSUNGEN**

Entdeckbarkeit von Kepler 138 c und d

Astronomie – Physik / Mathematik

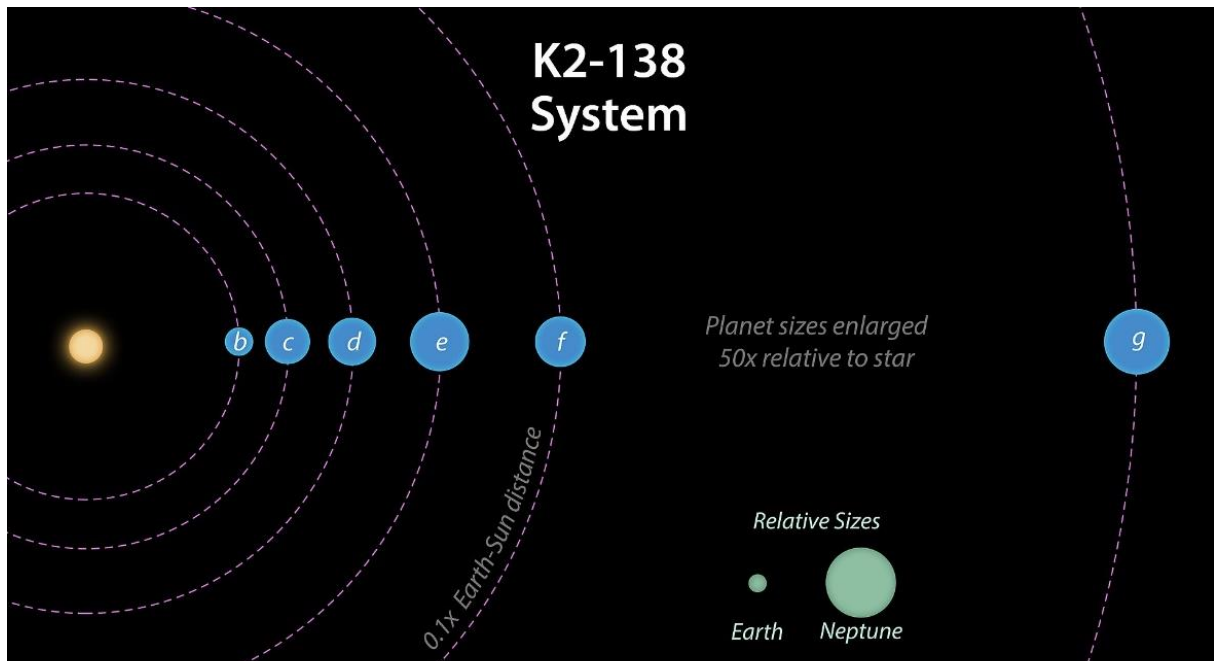
Information

Die schon seit 2014 bekannten Exoplaneten (Transitplaneten) Kepler-138 c und Kepler-138 d (siehe <http://exoplanet.eu/catalog/>) sind (spektrografischen) Folgeuntersuchungen zu Folge leichter als gedacht und gehören daher aller Wahrscheinlichkeit nach zur neuen Gruppe der Wasserplaneten (ein Planetentyp, den wir im Sonnensystem nicht haben).

Der Stern Kepler 138 ist ein Roter Zwergstern vom Spektraltyp M in 218 Lj Entfernung im Sternbild Leier (übrigens: ca. 84 % aller Sterne der Galaxis sind M-Zwerg). Er hat eine Masse von $0,57 M_{\text{Sonne}}$ und einen Radius von $0,54 R_{\text{Sonne}}$ (<https://de.wikipedia.org/wiki/Kepler-138>).

Die beiden Wasserplaneten im Exoplanetensystem haben folgende Daten (Umlaufzeit, Masse, Radius): Kepler 138 c: 13,78 d; $2,3 M_{\text{Erde}}$; $1,51 R_{\text{Erde}}$ und Kepler 138 d: 23,09 d; $2,1 M_{\text{Erde}}$; $1,51 R_{\text{Erde}}$.

Bei M-Sternen erscheinen die Spektrallinien von Titanoxid (TiO) besonders ausgeprägt. Diese sind deshalb für die Ermittlung der periodischen Wellenlängenverschiebung wichtig. Wir verwenden hier die TiO-Linie bei $\lambda = 466,7 \text{ nm}$ [3].



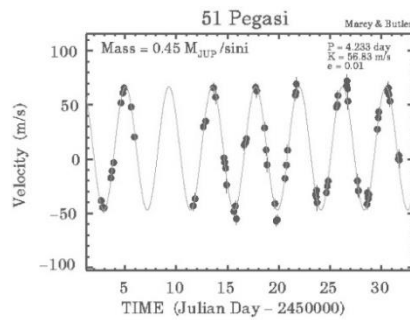
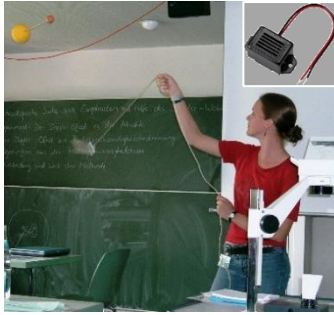
Planetensystem von Kepler 138. Die Planetenabstände können miteinander verglichen werden. Ebenso, aber in einem anderen Maßstab gilt dies für die Planetenradien (aber nicht für den Stern Kepler 138). ©: NASA/JPL-Caltech - Catalog page - Full-res (JPEG · TIFF), Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=75716503>.

Aufgabe

Bestimme die Minimalanforderungen an einen Spektrographen und ein Fotometer, um die Massen und Radien der Exoplaneten Kepler 138 c und d zu ermitteln. Anders ausgedrückt gilt es zu ermitteln, welche Wellenlängenunterschiede $\Delta\lambda$ im Spektrum und welche Unterschiede ΔS in der Lichtkurve der Transitplaneten nachgewiesen werden müssen. Die Folgeseite enthält die dazu nötigen Formalismen.

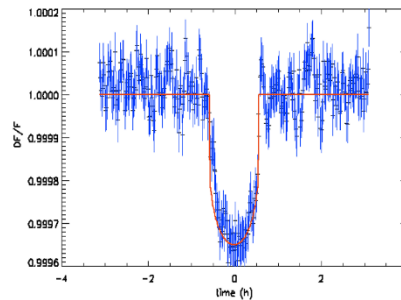
→ [Lösung](#)

Bestimmung von Masse und Radius eines Exoplaneten



Bestimmung der Planetenmasse Radialgeschwindigkeitsmethode

Freihandversuch zum akustischen **Dopplereffekt** eines schnell rotierenden Summers (oben rechts). Die sehr gut hörbare periodische Veränderung der Tonhöhe des Summers kann mit der Relativgeschwindigkeit (Bild rechts) in Zusammenhang gebracht werden. In Analogie zur periodischen Änderung der Wellenlänge der Schallwelle wird dann die periodische Änderung der Wellenlänge der Lichtwelle verständlich werden.



Bestimmung des Planetenradius Transitmethode

Freihanddemonstration eines **Planetentransits**. Die relativ einfach messbare Abschwächung des Normallichts des Sterns $\Delta S/S=1$ (im Bild rechts $DF/F=1$) führt direkt proportional zum Verhältnis von Querschnittsfläche des Transitplaneten zur Querschnittsfläche des Sterns und damit zum Radius des Planeten.

Leitfaden zur Bestimmung der Masse eines Exoplaneten auf Grundlage der spektrografisch gewonnenen Wellenlängenverschiebung $\Delta\lambda$ in Bezug auf die Ruhewellenlänge λ_0 , der Umlaufperiode T sowie der Masse m_S des umlaufenden Sterns. Quelle: [1].

<p>Voraussetzungen: 3. Keplersches Gesetz: Bahnhalbachsen von Stern und Planet: Schwerpunktsatz („Hebelgesetz“):</p>	$\frac{a^3}{T^2} = \frac{\gamma}{4\pi^2} \cdot (m_S + m_P)$ $a = a_S + a_P$ $m_S \cdot a_S = m_P \cdot a_P$
<p>Umformung:</p>	$\frac{a^3}{T^2} = \frac{(a_S + a_P)^3}{T^2} = \frac{a_S^3 \cdot \left(\frac{m_S + m_P}{m_P}\right)^3}{T^2}$
<p>Vereinfachung: konstante Bahngeschwindigkeit:</p>	$v = \frac{2\pi \cdot a_S}{T}$
<p>Umformung:</p>	$\frac{v_S^3 \cdot T^3}{(2\pi)^3 \cdot T^2} = \frac{\gamma}{4\pi^2} \cdot \frac{(m_S + m_P) \cdot m_P^3}{(m_S + m_P)^3}$ $\frac{v_S^3 \cdot T}{2\pi \cdot \gamma} = \frac{m_P^3}{(m_S + m_P)^2}$
<p>Vereinfachung: mit $m_P \ll m_S$:</p>	$m_S + m_P \approx m_S$
<p>Zwischenergebnis:</p>	$m_P = \frac{m_S^{\frac{2}{3}} \cdot T^{\frac{1}{3}} \cdot v_S}{(2\pi \cdot \gamma)^{\frac{1}{3}}}$
<p>Mit den Beobachtungsgrößen T und $v_{\text{Beob}} = v_S \cdot \sin i$:</p>	$m_P \cdot \sin i = \frac{m_S^{\frac{2}{3}} \cdot T^{\frac{1}{3}} \cdot v_{\text{Beob}}}{(2\pi \cdot \gamma)^{\frac{1}{3}}}$
<p>Für Transitplaneten gilt: $i = 90^\circ$ also:</p>	$m_P = \frac{m_S^{\frac{2}{3}} \cdot T^{\frac{1}{3}} \cdot v_{\text{Beob}}}{(2\pi \cdot \gamma)^{\frac{1}{3}}}$
<p>Mit der beobachteten Dopplerverschiebung $\Delta\lambda$: $\Delta\lambda \approx \frac{v_{\text{Beob}}}{c} \cdot \lambda_0 \rightarrow$</p>	$m_P = \frac{m_S^{\frac{2}{3}} \cdot T^{\frac{1}{3}} \cdot c}{(2\pi \cdot \gamma)^{\frac{1}{3}}} \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$

Bestimmung des Radius eines Exoplaneten R_P auf Grundlage der fotometrisch gemessenen Abnahme des Strahlungsstroms ΔS beim Planetentransit in Bezug auf den Strahlungsstrom S_0 des Sterns (Radius R_S) ohne den Transit des Exoplaneten. Quelle: [1].

Ansatz: $\frac{A_P}{A_S} = \frac{R_P^2}{R_S^2} = \frac{\Delta S}{S_0}$ abgedeckte Sternfläche \sim Rückgang Strahlungsstrom: $\rightarrow R_P = \sqrt{\frac{\Delta S}{S_0}} \cdot R_S$

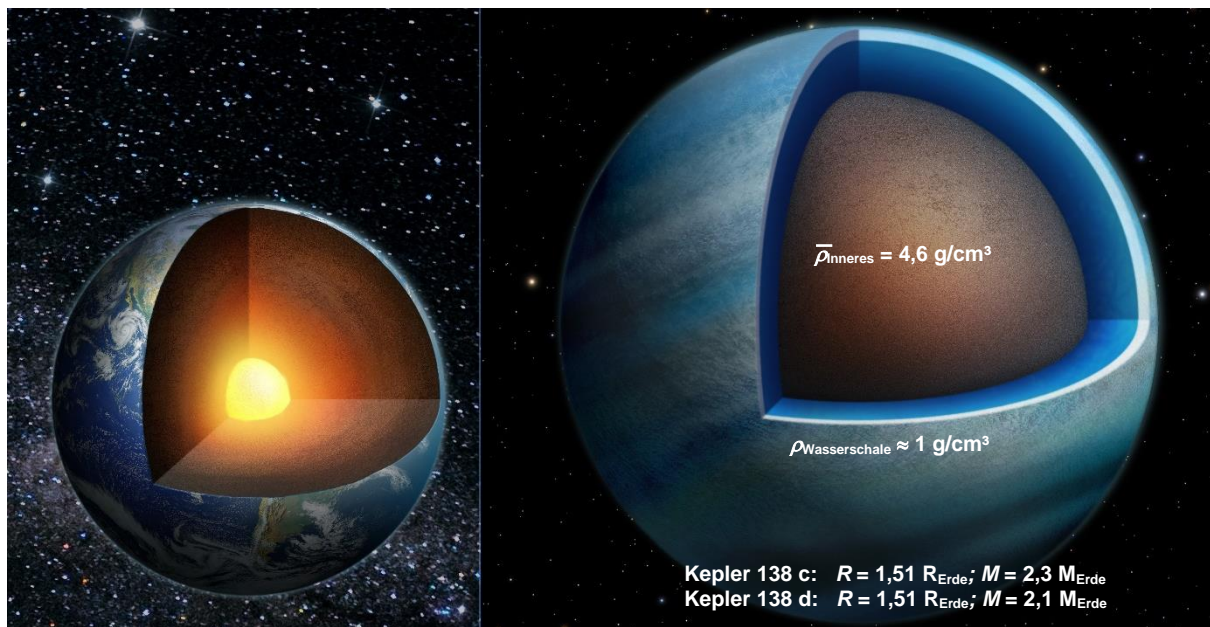
Wasserwelten bei anderen Sternen

Astronomie – Geografie / Mathematik

Information

Hochgenaue spektrografische Nachbeobachtungen der bereits 2014 mit Hilfe des Satelliten Kepler als Transitplaneten entdeckten Objekte Kepler 138 c und d ermöglichten deren Massebestimmung (siehe Thema zuvor) und führten zur Annahme, dass es sich um Wasserplaneten handeln muss. Bisher hatte man Planeten der Größe von Kepler 138 c und d stets den Supererden (Planeten mit Radien kleiner als 1,7 Erdradien) zugeordnet, welche als **Gesteinsplaneten** gelten.

Als **Wasserplaneten** (auch **Ozeanplaneten**) bezeichnet man Planeten, die im Volumen etwa zur Hälfte aus Wasser bestehen, welches diese vollständig bedeckt (und damit eine geringere mittlere Dichte haben als reine Gesteinsplaneten). Wasserplaneten entstehen vermutlich in den Außenbereichen der protoplanetaren Scheiben (für das Sonnensystem heute der Bereich der Oort'schen Wolke, siehe letztes Thema), von wo aus sie in den zentralen Bereich wandern können.



Vergleich des Aufbaus des Gesteinsplaneten Erde (links) mit dem (vermuteten) Wasserplaneten Kepler 138 d (künstlerische Darstellung). Erde und Exoplanet gleichen sich hinsichtlich des Inneren, welches aus Eisen und Gestein besteht. Im Außenbereich unterscheiden sie sich deutlich. Während die Erde eine Gesteinskruste besitzt, die zu etwa 70 % von Ozeanen mit einer mittleren Tiefe von 4 km bedeckt ist, besitzt Kepler 138 d vermutlich eine 2000 km dicke Schale aus Wasser in ganz verschiedenen Phasen von Dampf über Wasser bis hin zum „heißen Eis“ (superkritisches Wasser).
 ©: Benoit Gougeon (University of Montreal), <https://stsci-opo.org/STScI-01GKSB13BVAYFV47XWAG7B0R9V.jpg>.

Aufgabe

Nachdem sich aus Transitbeobachtungen der Exoplaneten Kepler 138 c und d für beide Planeten Radien von $1,51 R_{\text{Erde}}$ ergaben, erbrachten die hochgenauen spektrografischen Folgebeobachtungen Planetenmassen von $2,3 M_{\text{Erde}}$ und $2,1 M_{\text{Erde}}$. Wie haben die Autoren dieser Folgestudie¹ auf Wasserplaneten geschlossen?

Bestimme zuerst die **mittleren Dichten** für Kepler 138 c und d. Berechne nun die Masse- und Volumenanteile sowie die Dicken der möglichen Wasserschale für die Exoplaneten Kepler 138 c und d wenn angenommen wird, dass ihr Inneres eine mittlere Dichte von $\rho_{\text{Inneres}} = 4,6 \text{ g/cm}^3$ hat.

→ Lösung

¹ Caroline Piaulet u. a.: Evidence for the volatile-rich composition of a 1.5-Earth-radius planet, in: Nature Astronomy volume 7, pages 206–222 (2023), <https://www.nature.com/articles/s41550-022-01835-4>

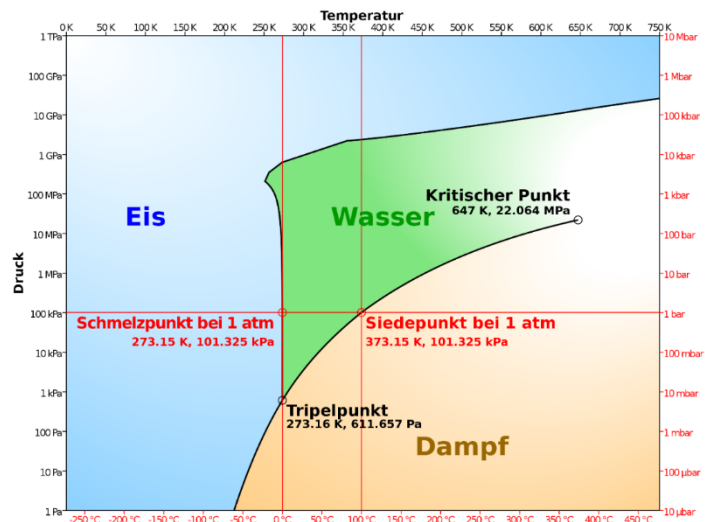
„Heißes Eis“

Astronomie – Physik / Mathematik

Information

In einem Druck-Temperatur-Diagramm lassen sich für Reinstoffe (nur aus einer Teilchensorte bestehend) Gebiete finden, in denen diese entweder fest, flüssig oder gasförmig sind. Die genannten Aggregatzustände können innerhalb verschiedener räumlich abgegrenzter Bereiche wiederum in verschiedenen Phasen existieren. In einem **Phasendiagramm** (siehe Bild) kann man für einen Stoff nun zeigen, bei welchen Temperatur- und Druckverhältnissen welche Phase vorliegt.

Wasser ist wohl der einzige Stoff, für den die meisten Menschen alle drei genannten Aggregatzustände kennen. Wir kennen diese aber auch nur für einen eng begrenzten Wertebereich von Drücken p und Temperaturen T (meist ist es die Temperaturabhängigkeit, die uns bewusst wird). Insbesondere bei nichtalltäglichen Drücken sieht die Welt des Wassers ganz anders aus. Für sehr geringe Drücke im Weltraum wissen wir z. B., dass das Kometeneis bei Erwärmung direkt vom festen in den gasförmigen Zustand übergeht (diesen „Direktübergang“ kennen einige von uns vom Trockeneis, dem Eis des Kohlenstoffdioxids).

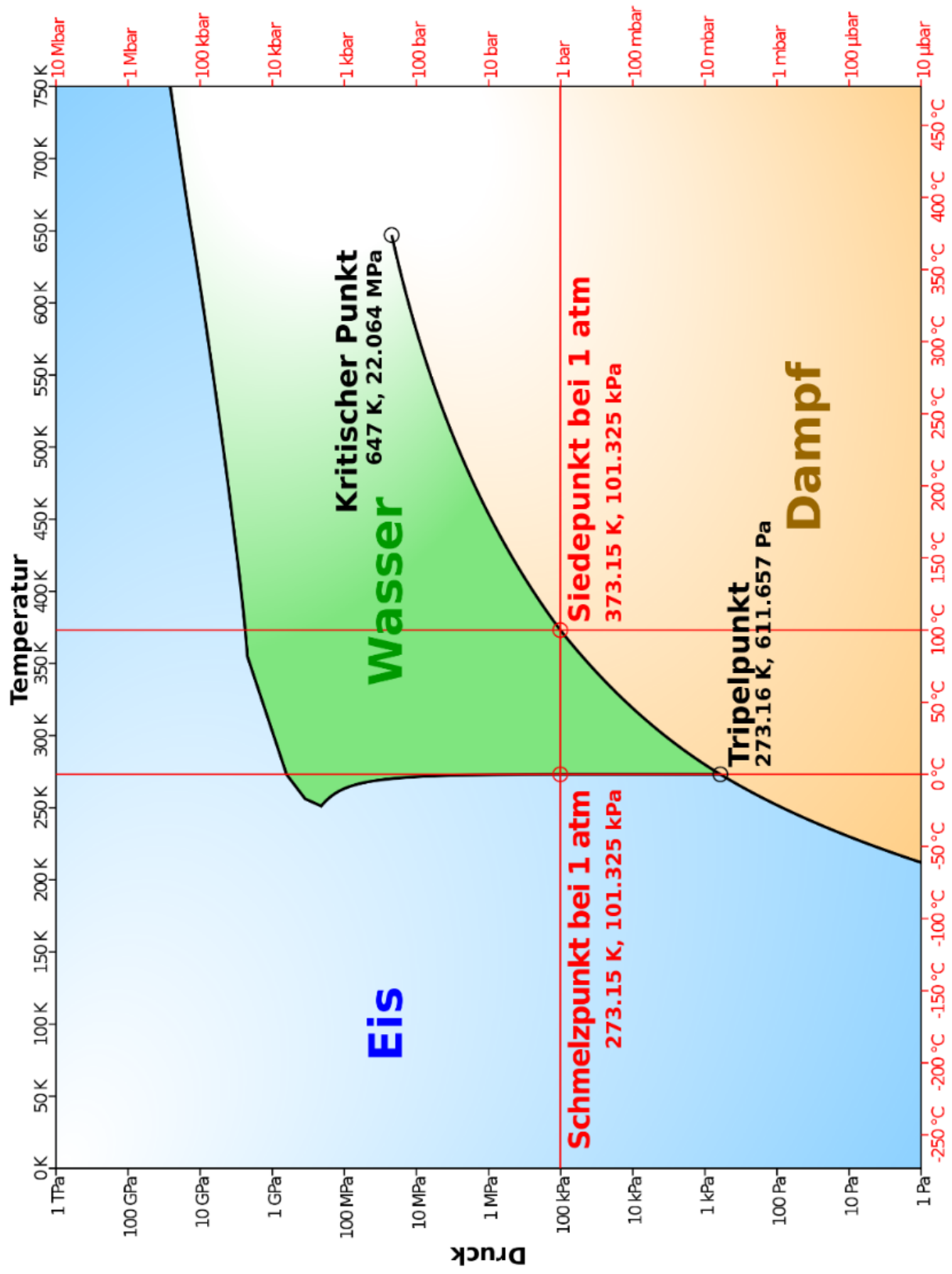


Phasendiagramm von Wasser. Bei Temperaturen und Drücken oberhalb des kritischen Punkts spricht man von überkritischem Wasser.
 ©: author of the original work: Cmglee - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=34865054>.

Aufgaben

- 1.) Markiere im **Phasendiagramm** (Rückseite des Blatts) grob den Wertebereich von Drücken und Temperaturen, die im Alltagsleben in Deutschland üblicherweise eine Rolle spielen. Diese „Alltagsregion“ habe folgende Grenzwerte: $T = -50\text{ °C}$ (Winter in der Arktis) ... 130 °C (finnische Sauna), $p = 870\text{ hPa}$... 1085 hPa (Extremwerte für den gemessenen Luftdruck, die den Luftdruck in 1000 m Höhe einschließen).
- 2.) An den Phasengrenzlinien zwischen den verschiedenen Bereichen finden die jeweiligen **Phasenübergänge** statt. Welche Phasenübergänge kennst du? Markiere die Grenzlinienbereiche innerhalb derer diese stattfinden.
- 3.) An der Oberfläche des **Exoplaneten Kepler 138 c** nimmt man Temperaturen von bis zu 140 °C und Drücke von mindestens dem 100-fachen des Atmosphärendrucks der Erde an. Der Druck wird durch eine vermutete mächtige Wasserdampfatosphäre erzeugt. Zeichne den Punkt ins Phasendiagramm ein, beschrifte ihn und begründe, warum der Ozean trotz seiner hohen Temperatur flüssig ist.
- 4.) **Kepler 138 c** gehört wahrscheinlich zur Kategorie der Wasserplaneten, der von einem gigantischen Ozean mit etwa 2000 km Wassertiefe komplett bedeckt wird. Wie groß ist der Druck am Boden dieses Ozeans? Nutze zur Berechnung des **Schweredrucks** die Formel $p = \rho \cdot g \cdot h$ mit $g = \gamma \cdot \frac{M}{R^2}$, wobei für M die Planetenmasse ($2,3 M_{\text{Erde}}$) und für R der Einfachheit halber der Planetenradius ($1,51 R_{\text{Erde}}$) genutzt werden. Für die Temperatur am Ozeanboden werden hier Werte von 300 bis 500 °C angenommen.
 Zeichne nun auch diesen Zustandspunktbereich ins Phasendiagramm ein, beschrifte ihn und beschreibe den erwartbaren Zustand.

→ Lösungen



[Zurück zum Anfang](#)

Ist die Erde eine Wasserwelt?

Astronomie – Geografie / Mathematik

Information



Beim Blick auf den Erdglobus dominiert meist die Farbe Blau. Diese zeigt an, wo sich auf der Erdoberfläche Wasser befindet (siehe Bild links).

Folgt daraus, dass man die Erde als eine Wasserwelt bezeichnen kann?

Erdgloben können den Betrachter zur Aussage verleiten, dass die Erde ein sehr feuchter Planet ist. ©: Liuxingy - Eigenes Werk, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=80791378>.

Aufgaben

- 1.) Recherchiere, welche Fläche Deutschland hat und wie groß die **ozeanische Wasserfläche der Erde** ist. Vergleiche die Werte miteinander. Vergiss nicht, **immer die Quellen anzugeben**.
- 2.) In Ermangelung an umfassenden Daten zu den Wassertiefen der Ozeane kann deren Volumen nur geschätzt werden - 2009 wurden $1,33 \cdot 10^9 \text{ km}^3$ geschätzt, (<https://de.wikipedia.org/wiki/Ozean>). Berechne den Volumenanteil x_{Volumen} und den Masseanteil x_{Masse} des flüssigen Wassers an der Erde? Nutze dabei deine Kenntnisse aus dem Bereich der **Prozentrechnung**.)
Recherchiere, ob man die Erde als eine Wasserwelt bzw. einen Ozeanplaneten bezeichnen kann.
- 3.) Der **Klimawandel** hat auch zur Folge, dass der Meeresspiegel ansteigt und damit tief gelegene Küstenregionen überflutet werden. Dies geschieht durch die thermische Ausdehnung des Wassers und mehr und mehr durch schmelzendes Eis. Das größte Eisvorkommen auf der Erde, in dem etwa 70 % des gesamten irdischen Süßwassers gebunden sind, ist der antarktische Eisschild. Dieser hat bei einer Fläche von ca. 13,9 Mio km² und einer mittleren Dicke von 2,16 km ein Volumen von 26,92 Mio km³ (https://de.wikipedia.org/wiki/Antarktis#Antarktischer_Eisschild).
Berechne den Anstieg des Meeresspiegels, wenn der gesamte antarktische Eisschild schmilzt und ins Meer gelangt.
Informiere dich unter <https://sealevel.climatecentral.org/maps/> über die zukünftige Situation an den deutschen Küsten und über eine spezielle dich interessierende Region in Deutschland.
Weitere Quellen zu diesem Thema:
https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Kryosph%C3%A4re_im_Klimasystem
https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Meeresspiegel_der_Zukunft
https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Langfristiger_Meeresspiegelanstieg

→ **Lösungen**

[Zurück zum Anfang](#)

Unsichtbare Wasserreserven der Erde

Astronomie – Geografie / Mathematik

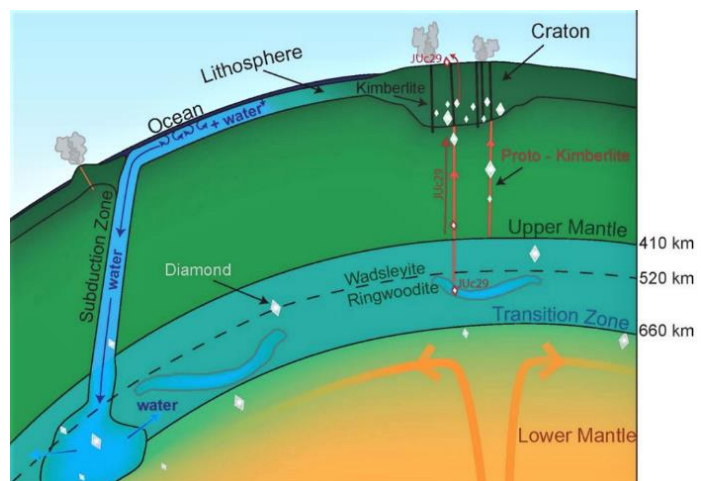
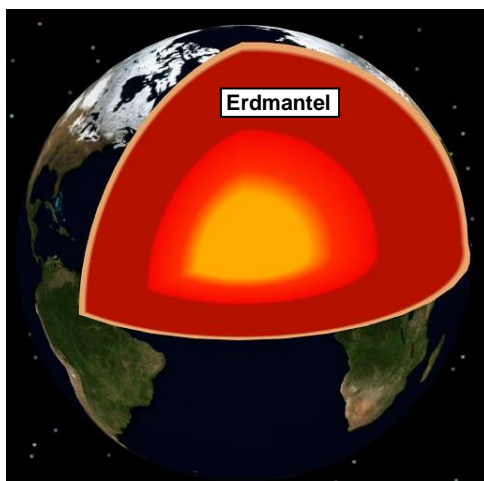
Information

Ein aus großer Tiefe zur Erdoberfläche gelangter Diamant lieferte anhand des in ihm eingeschlossenen Minerals **Ringwoodit** (eine Hochdruck-Modifikation des Minerals **Olivin**) das überaus interessante Indiz, dass in der Übergangsregion zwischen oberem und unterem Erdmantel (dort, wo Ringwoodit vermutlich existiert) ein **gigantischer Wasservorrat** in gebundener Form (im Ringwoodit) vorliegt.

(siehe <https://de.wikipedia.org/wiki/Ringwoodit>, <https://www.nationalgeographic.de/wissenschaft/2022/09/unterirdischer-ozean-gigantische-wassermengen-im-erdmantel-entdeckt>).

Die Übergangszone zwischen oberem und unterem Erdmantel erstreckt sich von 410 bis 660 km Tiefe (siehe Bild). Ringwoodit existiert im Tiefenbereich von 520 bis 660 km. Zum Wassereintrag in diese Zone kommt es, wenn eine Platte der ozeanischen Erdkruste in den Erdmantel abtaucht, weil sie von einer anderen, angrenzenden Platte „überfahren“ wird.

Für die mittlere Dichte des Erdmantels wird ein Wert von $\rho = 3,5 \text{ g/cm}^3 (= 3,5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3)$ angenommen. Untersuchungen des eingeschlossenen Ringwoodits mithilfe von Infrarotstrahlung zeigten, dass das Mineral bis zu 1,5 Masseprozent Wasser enthält.



Links: Schalenbau der Erde. Auf dem (weichplastischen) oberen Erdmantel findet die Bewegung der Kontinentalplatten der Erdkruste (Lithosphären-Platten) statt. ©: SoyLentGreen - Myself, Earth-Texture is from NASA., CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1447709>.

Rechts: Mit dem Abtauchen der Kontinentalplatten gelangt auch Wasser in den oberen Erdmantel, welches zum leichteren Aufschmelzen führt. ©: D. G. Pearson et al.: „Hydrous mantle transition zone indicated by ringwoodite included within diamond“, Nature, 2014, Graham Pearson, University of Alberta, Department of Earth and Atmospheric Sciences, University of Alberta.

Aufgabe

- 1.) Berechne die Menge an Wasser, welches im „Ringwooditbereich“ der Übergangsregion zwischen 520 und 660 km Tiefe im Mineral Ringwoodit eingeschlossen ist. (**Volumen der Kugelschale**)

Sonderaufgabe: Informiere dich über Gesteine, die das Mineral Olivin enthalten und suche in deiner Umgebung nach Gestein, welches dieses enthält.

→ **Lösung**

[Zurück zum Anfang](#)

Kleine Wasserwelten „vor der Haustür“ – z. B. Eismond ‚Europa‘

Astronomie – Mathematik

Information



Eine der Forscherfragen, zu deren Beantwortung die Sonde Juice stark beitragen kann. ©: ESA, CC BY-SA IGO 3.0, CC BY-SA 3.0 igo, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=126887368>.

Im Sonnensystem kennen wir mittlerweile einige Himmelskörper mit einem relativ hohen Wasseranteil. Der **Jupitermond Europa** gehört zu ihnen.

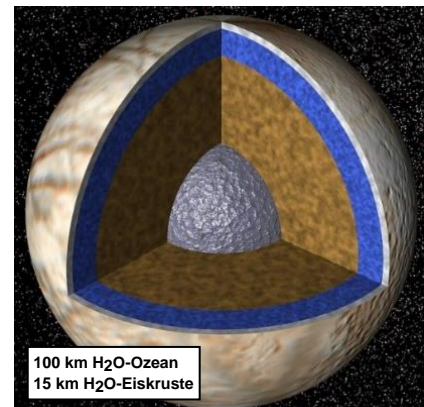
Die relative Nähe von Jupiter ermöglichte uns schon bald die Bestimmung seiner mittleren Dichte aus seiner Masse (die Massenbestimmung erfolgte von der Erde aus durch Messungen von Bahnstörungen natürlicher Himmelskörper oder von Raumsonden) und seinem Volumen (der Durchmesser kann trigonometrisch aus Winkeldurchmesser und Abstand berechnet werden) erfolgen.

Spektroskopische Daten und Bilder von Raumsonden weisen auf eine Wassereisbedeckung mit Gesteinseinlagerungen hin. Im Falle von Europa spricht man von einem **Eismond**.

Die zukünftige nähere Untersuchung von Europa (u. a. mit Hilfe der Sonde JUICE, siehe dazu auch nächstes Thema) wird uns der Beantwortung der Frage näherbringen, was Ozeanwelten bzw. Wasserwelten auszeichnet.

Aufgaben

- Bestimme den Masseanteil des Wassers des Jupitermonds Europa an der Gesamtmasse des Himmelskörpers und vergleiche ihn mit dem Wert für die Erde.
- Welche mittlere Dichte haben die Forscher Francis Nimmo und Michael Manga² für das Innere von Europa angenommen, als sie ihre Idee zur Wasserbedeckung von Europa (15 km Eis + 100 km Ozean unter dem Eis) veröffentlichten? Berechne den Wert mit Hilfe folgender Angaben:
 - Masse von Europa $m_{\text{Europa}} \approx 4,8 \cdot 10^{22}$ kg
 - Mittlerer Durchmesser von Europa $D_{\text{Europa}} = 3121,6$ km
 - Mittlere Dichte von Europa $= 3,010$ g/cm³
- Recherchiere, welche Materialien im Inneren von Europa vermutet werden. Vergleiche die mittlere Dichte von Europa mit der von der Erde und informiere dich auch über die mittlere Dichte der Erdkruste. Vergiss nicht, immer auch die Quellen anzugeben.



Modellidee zum inneren Aufbau von Europa. Im Kern vermutet man flüssiges Eisen, das von einem mächtigen Mantel aus Silikatgesteinen umgeben ist. Die äußere Schicht besteht aus Wasser und gliedert sich in einen „Ozean“ und eine Eishülle.

©: unknown author of the NASA derivative work: MagentaGreen - Diese Datei wurde von diesem Werk abgeleitet: PIA 01130 Interior of Europa.jpg; Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=35754618>.

→ Lösungen

² Francis Nimmo, Michael Manga: Geodynamics of Europa's Icy Shell. In: Pappalardo et al. (Hrsg.): Europa. 2009 (siehe Literatur), S. 381–404

Mit der JUICE-Mission zu den Eismonden

Astronomie – Physik / Technik / Mathematik

Information

Seit dem 14. April 2023 ist die ESA-Sonde JUICE (JUperiter ICE moon explorer) auf dem Weg zu Jupiter und zu dessen Eismonden Kallisto, Europa und Ganymed. In etwas mehr als 8 Jahren (im Juli 2031) wird sie nach mehreren Swing-by-Manövern (siehe folgende Seite) dort ankommen. Ein Schüler, der in 2023 die 5. Klasse abschließt, wird ihre Ankunft kurz nach seinem Abitur (nach 13 Schuljahren) erleben.

JUICE soll u. a. Erkenntnisse zur neuen Planetengattung der Ozeanwelten bzw. Wasserwelten liefern.

Raumfahrzeuge beziehen heutzutage ihre Energie vor allem aus der Strahlung der Sonne. Insbesondere für Forschungs-Missionen weitab der Sonne sind leistungsfähige Solarzellen wichtig. Die Entwicklung besserer Solarzellen wird auf diese Weise durch die Erfordernisse der Raumfahrt vorangebracht (siehe z. B. https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2020/03/20200813_neue-solarzellen-fuer-den-weltraum.html).



Abbildung: Eine der Forscherfragen, zu deren Beantwortung Juice stark beitragen kann. ©: ESA, CC BY-SA IGO 3.0, CC BY-SA 3.0 igo, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=126887368>.

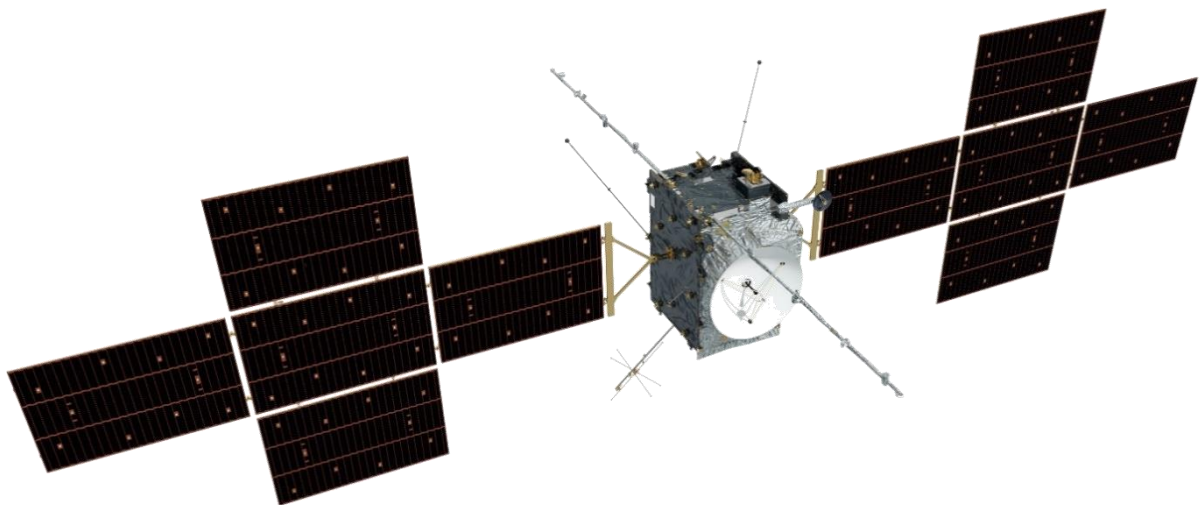
Raumfahrzeuge beziehen heutzutage ihre Energie vor allem aus der Strahlung der Sonne. Insbesondere für Forschungs-Missionen weitab der Sonne sind leistungsfähige Solarzellen wichtig. Die Entwicklung besserer Solarzellen wird auf diese Weise durch die Erfordernisse der Raumfahrt vorangebracht (siehe z. B. https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2020/03/20200813_neue-solarzellen-fuer-den-weltraum.html).

Aufgabe

Die JUICE-Sonde besitzt ein ungewöhnlich großes „Solarpaneel-Kraftwerk“ mit einer Empfängerfläche von 85 m² um seine wissenschaftlichen Instrumente zu betreiben und die Kommunikation mit der Erde zu gewährleisten.

Für die Paneele wird ein hoher Wirkungsgrad von 0,25 angenommen.

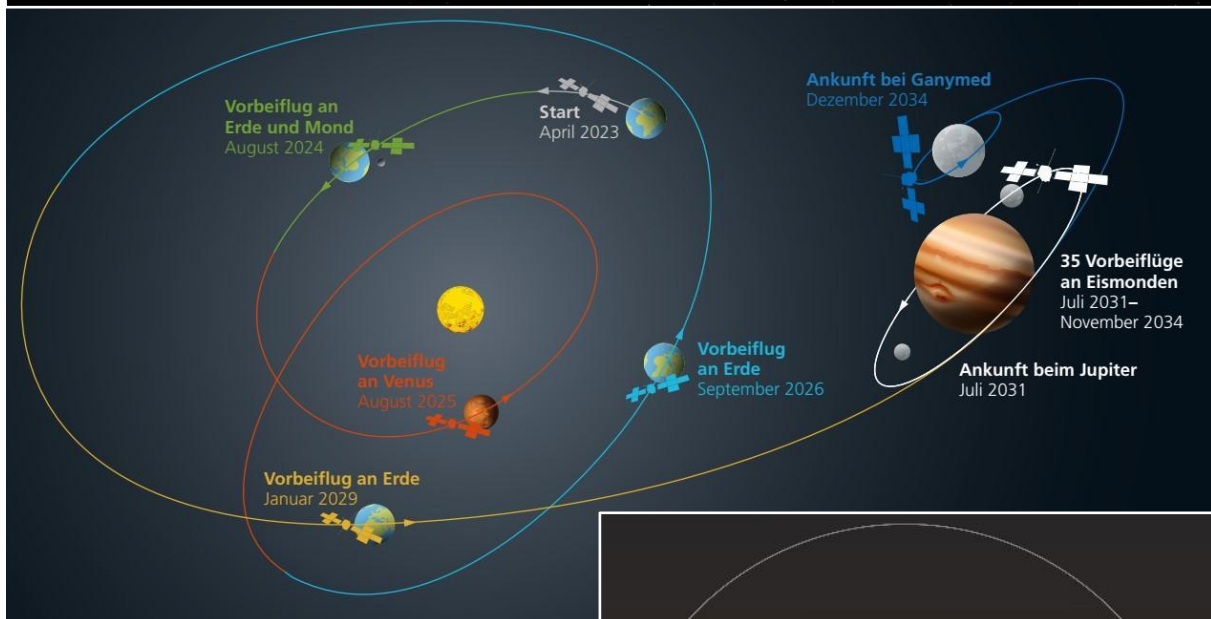
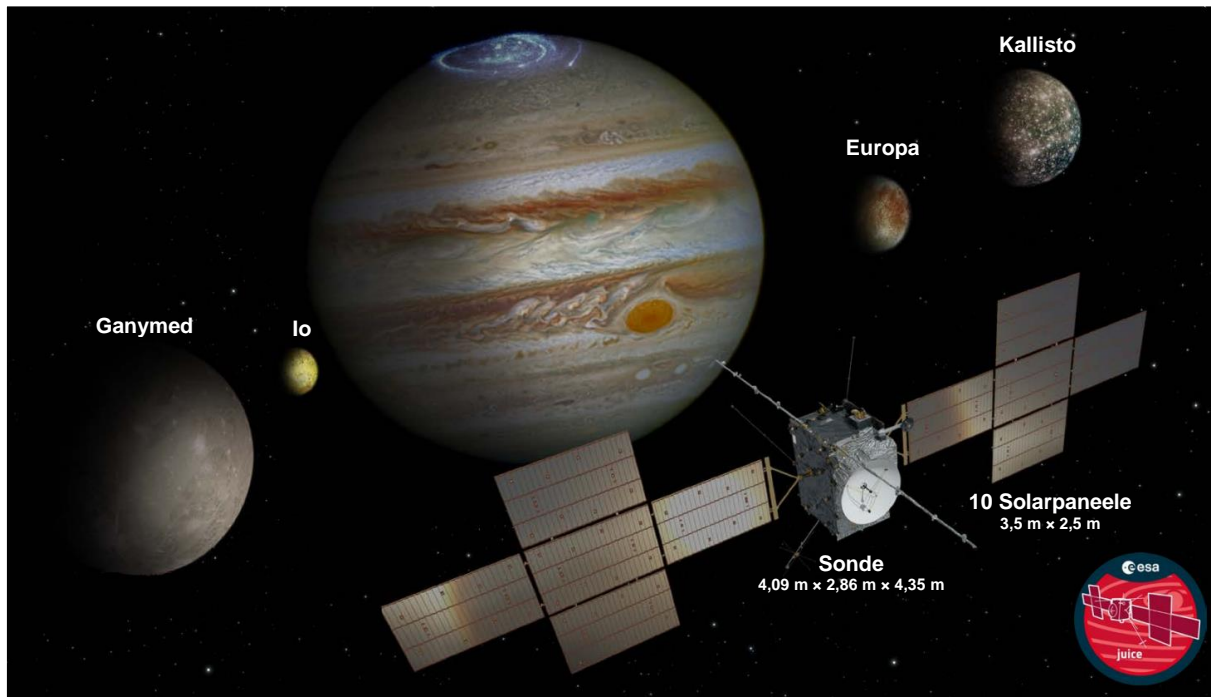
Bestimme die elektrische Leistung, die mittels der Solarpaneele von JUICE im Abstand von Jupiter aus der dort ankommenden Strahlungsleistung der Sonne erzeugt werden kann.



JUICE-Satellit mit „Solarpaneel-Kraftwerk“ in künstlerischer Darstellung. ©: ESA / ATG medialab.

→ [Lösung](#)

[Zurück zum Anfang](#)



Die Reise der Sonde JUICE.

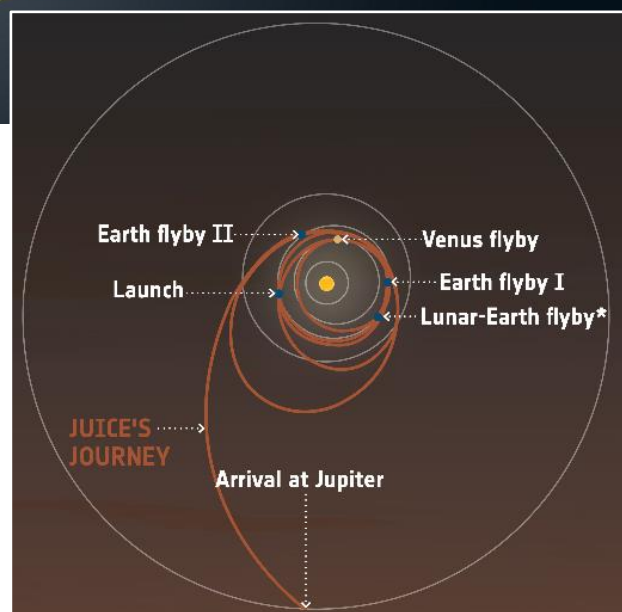
Oben: Die Mission JUICE (Jupiter Icy Moons Explorer) ist seit dem 14. 4. 2023 auf dem Weg zu Jupiter und dessen Eismonden Kallisto, Europa und Ganymed.

©: ESA, CC BY-SA IGO 3.0, CC BY-SA 3.0 igo, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=130683933>.

Mitte und unten: Nach mehreren Swing-by-Manövern (auch Fly-by-Manöver genannt) gelangt die Sonde im Juli 2031 bei Jupiter an.

©: German Space Agency at DLR <https://www.dlr.de/content/de/artikel/missionen-projekte/juice/juice-missionsablauf.html>,

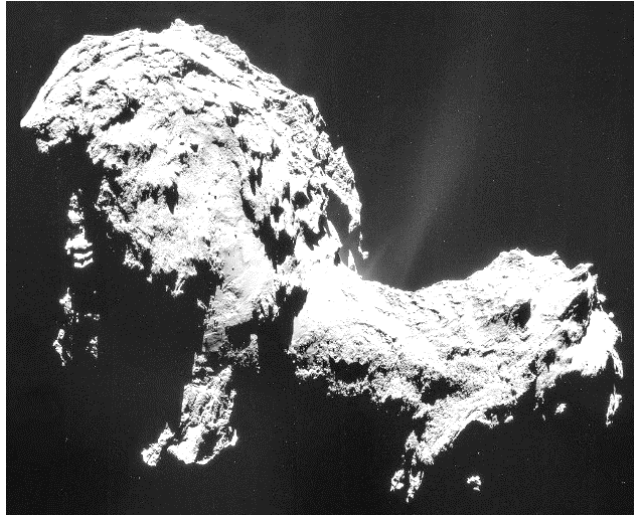
©: ESA, CC BY-SA IGO 3.0, CC BY-SA 3.0 igo, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=126887240>.



Wasser in der Oortschen Wolke – Wasser in Kometenkernen

Astronomie – Chemie / Physik / Mathematik

Information



Kern des Kometen Tschurjumow-Gerassimenko (Masse $\approx 10^{13}$ kg, Mittlere Dichte = $0,533 \text{ g/cm}^3$), aufgenommen von der Kometensonde Rosetta. © ESA/Rosetta/NAVCAM, CC BY-SA IGO 3.0, CC BY-SA 3.0 IGO, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=36603034>.

Die **Oortsche Wolke** ist der Teil des Sonnensystems, der die weitaus größte Ausdehnung hat (Kugelschale mit Radien bis zu 100.000 AE). Sie besteht im Wesentlichen aus Objekten, die wir als mineralisch „verschmutzte“ Schneebälle (Kerne möglicher Kometen) kennen. Man vermutet einige Billionen (10^{12}) Objekte größer als 1 km und einige Milliarden (10^9) Objekte mit Größen um die 20 km. Nach heutigen Abschätzungen ergibt sich eine Gesamtmasse von ca. fünf Erdmassen an Material (https://en.wikipedia.org/wiki/Oort_cloud).

Die Oortsche Wolke entstand vermutlich aus den nicht „verbrauchten“ protoplanetaren Körpern, die durch den gravitativen Einfluss der Riesenplaneten aus der protoplanetaren Scheibe herausgeschleudert wurden. Die Kometenkerne zeugen davon, dass große Mengen an Wasser ursprünglich vorhanden waren und eine Ozeanwelt im Sonnensystem evt. möglich gewesen wäre.

Aufgabe

Bestimme den Masseanteil des Wassers im Kern des Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko (eingezeichnet Tschurjumow-Gerassimenko) auf Grundlage der in der Tabelle unten angegebenen **Molekühlhäufigkeiten**. Dazu musst du deine Kenntnisse aus der Chemie aktivieren, um aus den im Periodensystem der Elemente gegebenen **relativen Atommassen** die **absoluten Atommassen** und daraus die Molekülmassen zu bestimmen.

Molecule	Deduced bulk abundance	Name
H ₂ O	100	Water
CO ₂	4.7 ± 1.4	Carbon dioxide
CO	3.1 ± 0.9	Carbon monoxide
O ₂	3.1 ± 1.1	Molecular oxygen
CH ₄	0.34 ± 0.07	Methane
C ₂ H ₆	0.29 ± 0.06	Ethane
C ₃ H ₈	0.018 ± 0.004	Propane

Molekühlhäufigkeiten im Eis des Kerns des Kometen Tschurjumow-Gerassimenko in Bezug auf das Wassermolekül. Gezeigt wird nur ein Ausschnitt der Tabelle aus der Originalveröffentlichung, der die Moleküle enthält, die den allergrößten Teil der Masse (also rund 100 %) ausmachen.

©: Aus Tabelle 2 in „Elemental and molecular abundances in comet 67P/Churyumov-Gerasimenko“ von Martin Rubin, Kathrin Altwegg, u. a., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 489, Issue 1, October 2019, Pages 594–607, <https://doi.org/10.1093/mnras/stz2086>.

Notiere deine Ergebnisse in dieser Tabelle:

Molekül	Trivialname	Absolute Molekülmasse	Masseanteil am Kometenkern (Summe = 100 %)	Prozentualer Anteil an Gesamtmasse des Kometenkerns ($\approx 10^{13}$ kg), gerundet

→ Lösung

Quellen

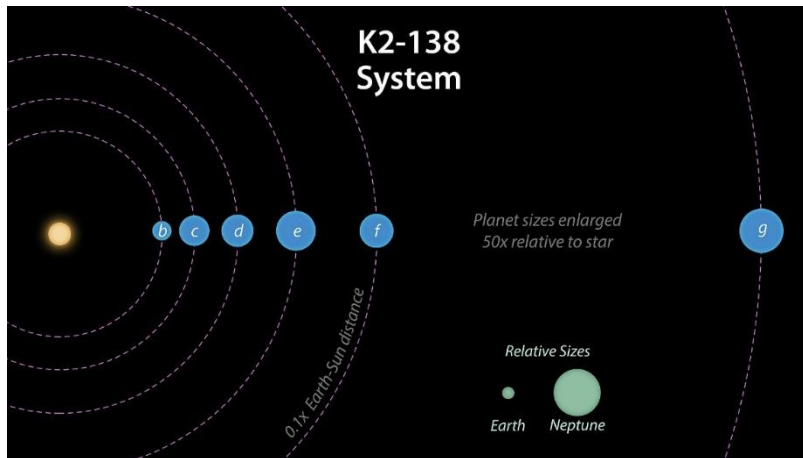
- [1] Olaf Fischer: Modelle und Experimente Brücken zu Vorstellungen und Erkenntnissen der Astronomie (Habilitationsschrift), Astronomisch-Physikalische Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2002
- [2] Bildquellen zu Moleküldarstellungen:
- **CO₂**
Von Benjah-bmm27 - Eigenes Werk, Gemeinfrei,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=940830>
 - **H₂O**
Böi Dbc334 (first version); Jynto (second version) – Water-3D-vdW.png, Phạm vi công cộng, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1332739>
 - **CO**
Von Hoa112008 - Eigenes Werk, Gemeinfrei,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=80599627>
 - **O₂**
By Ulflund - Own work, CC0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=20317308>
 - **CH₄**
By Dbc334 (first version); Jynto (second version). - Own work, Public Domain,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1306975>
 - **C₂H₆**
By Benjah-bmm27 - Own work, Public Domain,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2034949>
 - **C₃H₈**
By Ben Mills - Own work, Public Domain,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4415920>
- [3] H.-G. Reimann (Hrsg.): Wellenlängen einiger Spektrallinien und -banden, aus: Astronomisches Praktikum, Jena 2000, http://www.wissenschaft-schulen.de/sixcms/media.php/1308/lambda_tab.pdf
- [4] Caroline Piaulet u. a.: Evidence for the volatile-rich composition of a 1.5-Earth-radius planet, in: Nature Astronomy volume 7, pages 206–222 (2023), <https://www.nature.com/articles/s41550-022-01835-4>
- [5] https://www.haus-der-astronomie.de/3769656/Die_Stromversorgung_der_ISS_Lehrer.pdf
- [6] D. G. Pearson et al.: „Hydrous mantle transition zone indicated by ringwoodite included within diamond“, Nature, 2014, Graham Pearson, University of Alberta, Department of Earth and Atmospheric Sciences, University of Alberta
- [7] Martin Rubin, Kathrin Altwegg, u. a., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 489, Issue 1, October 2019, Pages 594–607, <https://doi.org/10.1093/mnras/stz2086>. M



LÖSUNGEN

Lösung

Entdeckbarkeit von Kepler 138 c und d

[Zurück zum Anfang](#)


Gegeben sind:

Sternmasse:

$$m_S \approx 0,57 \cdot 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$$

Sternradius:

$$R_S = 0,54 \cdot 6,96342 \cdot 10^8 \text{ m}$$

Erdmasse:

$$M_{\text{Erde}} = 5,9722 \cdot 10^{24} \text{ kg}$$

Erdradius:

$$R_{\text{Erde}} = 6,371 \cdot 10^6 \text{ m}$$

Ruhewellenlänge

einer der Titan-Oxid-Linien:
 $\lambda_0 = 466,7 \text{ nm [3]}$

Gravitationskonstante:

$$\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2}$$

Abbildung 2: Planetensystem von Kepler 138. Die Planetenabstände können miteinander verglichen werden. Ebenso (aber in einem anderen Maßstab) gilt dies für die Planetenradien.

©: NASA/JPL-Caltech - Catalog page · Full-res (JPEG · TIFF), Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=75716503>.

Man beachte die **Potenzgesetze** bei der Rechnung.

Kepler 138 c: $T = 13,78 \text{ d}$; $m_P = 2,3 M_{\text{Erde}}$; $R_P = 1,51 R_{\text{Erde}}$

$$m_P = \frac{m_S^{\frac{2}{3}} \cdot T^{\frac{1}{3}} \cdot v_{\text{Beob}}}{(2\pi \cdot \gamma)^{\frac{1}{3}}} \rightarrow v_{\text{Beob}} = \frac{(2\pi \cdot \gamma)^{\frac{1}{3}}}{m_S^{\frac{2}{3}}} \cdot \frac{m_P}{T^{\frac{1}{3}}} = \frac{(2\pi \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2})^{\frac{1}{3}}}{(0,57 \cdot 2 \cdot 10^{30} \text{ kg})^{\frac{2}{3}}} \cdot \frac{2,3 \cdot 5,9722 \cdot 10^{24} \text{ kg}}{(13,78 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s})^{\frac{1}{3}}}$$

$$= \frac{1,028 \cdot 10^{22}}{1,157 \cdot 10^{22}} \cdot \frac{\text{m} \cdot \text{kg}}{\text{kg}^{\frac{1}{3}} \cdot \text{s}^{\frac{2}{3}} \cdot \text{kg}^{\frac{2}{3}} \cdot \text{s}^{\frac{1}{3}}} \approx 0,89 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$m_P = \frac{m_S^{\frac{2}{3}} \cdot T^{\frac{1}{3}} \cdot c}{(2\pi \cdot \gamma)^{\frac{1}{3}}} \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \rightarrow \Delta\lambda \approx \frac{v_{\text{Beob}}}{c} \cdot \lambda_0 = \frac{0,89 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \cdot 466,7 \text{ nm} \approx 1,4 \cdot 10^{-6} \text{ nm}$$

$$\frac{R_P^2}{R_S^2} = \frac{\Delta S}{S_0} \rightarrow \Delta S = \frac{R_P^2}{R_S^2} \cdot S_0 = \frac{(1,51 \cdot 6,371 \cdot 10^6 \text{ m})^2}{(0,54 \cdot 6,96342 \cdot 10^8 \text{ m})^2} \cdot S_0 \approx 0,026$$

Kepler 138 d: $T = 23,09 \text{ d}$; $m_P = 2,1 M_{\text{Erde}}$; $R_P = 1,51 R_{\text{Erde}}$

$$m_P = \frac{m_S^{\frac{2}{3}} \cdot T^{\frac{1}{3}} \cdot v_{\text{Beob}}}{(2\pi \cdot \gamma)^{\frac{1}{3}}} \rightarrow v_{\text{Beob}} = \frac{(2\pi \cdot \gamma)^{\frac{1}{3}}}{m_S^{\frac{2}{3}}} \cdot \frac{m_P}{T^{\frac{1}{3}}} = \frac{(2\pi \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2})^{\frac{1}{3}}}{(0,57 \cdot 2 \cdot 10^{30} \text{ kg})^{\frac{2}{3}}} \cdot \frac{2,1 \cdot 5,9722 \cdot 10^{24} \text{ kg}}{(23,09 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s})^{\frac{1}{3}}}$$

$$= \frac{9,385 \cdot 10^{21}}{1,374 \cdot 10^{22}} \cdot \frac{\text{m} \cdot \text{kg}}{\text{kg}^{\frac{1}{3}} \cdot \text{s}^{\frac{2}{3}} \cdot \text{kg}^{\frac{2}{3}} \cdot \text{s}^{\frac{1}{3}}} \approx 0,68 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$m_P = \frac{m_S^{\frac{2}{3}} \cdot T^{\frac{1}{3}} \cdot c}{(2\pi \cdot \gamma)^{\frac{1}{3}}} \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \rightarrow \Delta\lambda \approx \frac{v_{\text{Beob}}}{c} \cdot \lambda_0 = \frac{0,68 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \cdot 466,7 \text{ nm} \approx 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ nm}$$

$$\frac{R_P^2}{R_S^2} = \frac{\Delta S}{S_0} \rightarrow \Delta S = \frac{R_P^2}{R_S^2} \cdot S_0 = \frac{(1,51 \cdot 6,371 \cdot 10^6 \text{ m})^2}{(0,54 \cdot 6,96342 \cdot 10^8 \text{ m})^2} \cdot S_0 \approx 0,026$$

Lösung

Wasserwelten bei anderen Sternen

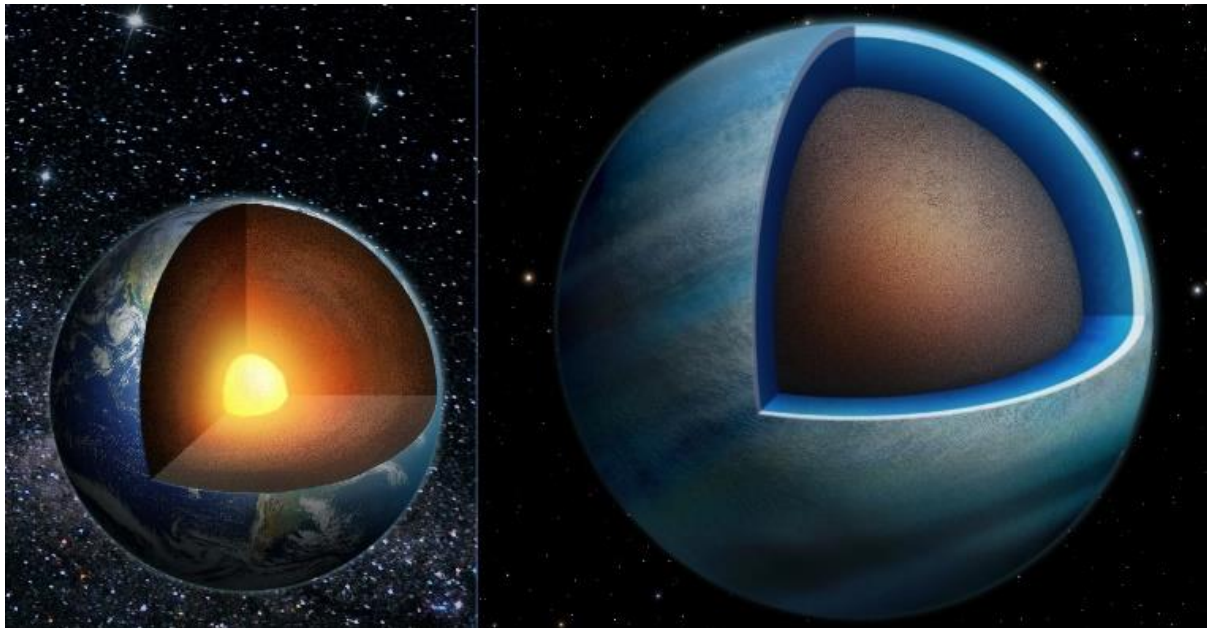
[Zurück zum Anfang](#)


Abbildung 3: Vergleich des Aufbaus des Gesteinsplaneten Erde (links) mit dem (vermuteten) Wasserplaneten Kepler 138 d (künstlerische Darstellung). Erde und Exoplanet gleichen sich hinsichtlich des Inneren, welches aus Eisen und Gestein besteht. Im Außenbereich unterscheiden sie sich deutlich. Während die Erde eine Gesteinskruste besitzt, die zu etwa 70 % von Ozeanen mit einer mittleren Tiefe von 4 km bedeckt ist, besitzt Kepler 138 d vermutlich eine 2000 km dicke Schale aus Wasser in ganz verschiedenen Phasen von Dampf über Wasser bis hin zum „heißen Eis“ (superkritisches Wasser). ©: Benoit Gougeon (University of Montreal), <https://stsci-opo.org/STScI-01GKSB13BVAYFPV47XWA/G7B0R9V.jpg>.

Gegeben sind:

- Massen von Kepler 138 c und d: $m_{\text{Kepler-138c}} \approx 2,3 M_{\text{Erde}}$ und $m_{\text{Kepler-138d}} \approx 2,1 M_{\text{Erde}}$
- Mittlere Radien von Kepler 138 c und d: beide $R_{\text{Kepler-138c,d}} = 1,51 R_{\text{Erde}}$
- Masse Erde: $M_{\text{Erde}} = 5,9722 \cdot 10^{24} \text{ kg}$; Radius der Erde: $R_{\text{Erde}} = 6,371 \cdot 10^6 \text{ m}$

Berechnung der mittleren Dichten von Kepler 138 c und d:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{Kepler-138c}} &= \frac{m_{\text{Kepler-138c}}}{V_{\text{Kepler-138c}}} = \frac{m_{\text{Kepler-138c}}}{\frac{4}{3}\pi \cdot R_{\text{Kepler-138c}}^3} = \frac{m_{\text{Kepler-138c}}}{\frac{4}{3}\pi \cdot (1,51 \cdot R_{\text{Erde}})^3} = \\ &= \frac{2,3 \cdot 5,9722 \cdot 10^{24} \text{ kg}}{\frac{4}{3}\pi \cdot (1,51 \cdot 6,371 \cdot 10^6 \text{ m})^3} \approx \frac{13,736 \cdot 10^{24} \text{ kg}}{3279,428 \cdot 10^{18} \text{ m}^3} \approx 4190 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \approx 4,2 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_{\text{Kepler-138d}} &= \frac{m_{\text{Kepler-138d}}}{V_{\text{Kepler-138d}}} = \frac{m_{\text{Kepler-138d}}}{\frac{4}{3}\pi \cdot R_{\text{Kepler-138d}}^3} = \frac{m_{\text{Kepler-138d}}}{\frac{4}{3}\pi \cdot (1,51 \cdot R_{\text{Erde}})^3} = \\ &= \frac{2,1 \cdot 5,9722 \cdot 10^{24} \text{ kg}}{\frac{4}{3}\pi \cdot (1,51 \cdot 6,371 \cdot 10^6 \text{ m})^3} \approx \frac{12,542 \cdot 10^{24} \text{ kg}}{3279,428 \cdot 10^{18} \text{ m}^3} \approx 3824 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \approx 3,8 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}. \end{aligned}$$

Die sich ergebenden mittleren Dichten für die Exoplaneten Kepler 138 c und d sind für einen von der Größe her erdähnlichen Planeten zu gering (mittlere Dichte der Erde: ca. $5,5 \text{ g/cm}^3$). Um diese relativ geringen Dichtewerte zu erreichen, muss das vermutlich deutlich dichtere Innere von Kepler 138 c und d eine „Zugabe“ besitzen, die seine mittlere Dichte reduziert. Wasser ist der Stoff, der dafür sehr wahrscheinlich in Frage kommt (schon deshalb, weil er aufgrund der Häufigkeitsverhältnisse der Elemente im Universum in großen Mengen vorkommen kann).

Wir nehmen hier für das Innere von Kepler 138 c und d eine mittlere Dichte von $\rho_{\text{Inneres}} = 4,6 \text{ g/cm}^3$ an. Diese Annahme beruht auf der Olivindichte in der Erde, die von $4,2$ im Mantelgestein bis zu $5,0 \text{ g/cm}^3$ im unteren Erdmantel reicht (siehe auch <https://de.wikipedia.org/wiki/Erdmantel>).

Berechnung des Masseanteils x_{Planet} von Wasser an gesamter Planetenmasse:

$$x_{\text{Planet}} = \frac{\rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot x_{\text{Planet}} \cdot V_{\text{Planet}} + \rho_{\text{Inneres}} \cdot (1 - x_{\text{Planet}}) \cdot V_{\text{Planet}}}{V_{\text{Planet}}} \\ = \frac{V_{\text{Planet}} \cdot (\rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot x_{\text{Planet}} + \rho_{\text{Inneres}} - \rho_{\text{Inneres}} \cdot x_{\text{Planet}})}{V_{\text{Planet}}} = (\rho_{\text{H}_2\text{O}} - \rho_{\text{Inneres}}) \cdot x_{\text{Planet}} + \rho_{\text{Inneres}}$$

Für Kepler 138c:

$$x_{\text{Kepler-138c}} = \frac{\rho_{\text{Kepler-138c}} - \rho_{\text{Inneres}}}{(\rho_{\text{H}_2\text{O}} - \rho_{\text{Inneres}})} = \frac{4,2 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} - 4,6 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}{(1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} - 4,6 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3})} = \frac{0,4 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}{3,6 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} \approx 0,11.$$

Für Kepler 138d:

$$x_{\text{Kepler-138d}} = \frac{\rho_{\text{Kepler-138d}} - \rho_{\text{Inneres}}}{(\rho_{\text{H}_2\text{O}} - \rho_{\text{Inneres}})} = \frac{3,8 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} - 4,6 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}{(1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} - 4,6 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3})} = \frac{0,8 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}{3,6 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} \approx 0,22.$$

Berechnung des Volumenanteils y_{Planet} von Wasser am gesamten Planetenvolumen:

$$y_{\text{Planet}} = \frac{V_{\text{H}_2\text{O-Planet}}}{V_{\text{Planet}}} \\ V_{\text{Planet}} = \frac{4}{3} \pi \cdot R_{\text{Planet}}^3 \\ V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O-Planet}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{x_{\text{Planet}} \cdot m_{\text{Planet}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}}$$

Für Kepler 138c:

$$y_{\text{Kepler-138c}} = \frac{x_{\text{Kepler-138c}} \cdot m_{\text{Kepler-138c}}}{\frac{4}{3} \pi \cdot R_{\text{Kepler-138c}}^3 \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{0,11 \cdot 13,736 \cdot 10^{24} \text{ kg}}{3279,428 \cdot 10^{18} \text{ m}^3 \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \approx 0,46.$$

Für Kepler 138d:

$$y_{\text{Kepler-138d}} = \frac{x_{\text{Kepler-138d}} \cdot m_{\text{Kepler-138d}}}{\frac{4}{3} \pi \cdot R_{\text{Kepler-138d}}^3 \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{0,22 \cdot 12,542 \cdot 10^{24} \text{ kg}}{3279,428 \cdot 10^{18} \text{ m}^3 \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \approx 0,84.$$

Berechnung der Dicke einer möglichen äußeren Wasserschale:

$$V_{\text{Inneres}} = (1 - y_{\text{Planet}}) \cdot V_{\text{Planet}} \\ \frac{4}{3} \pi \cdot R_{\text{Inneres}}^3 = (1 - y_{\text{Planet}}) \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot R_{\text{Planet}}^3 \\ R_{\text{Inneres}} = \sqrt[3]{(1 - y_{\text{Planet}})} \cdot R_{\text{Planet}} \\ \Delta R_{\text{Wasserschale}} = R_{\text{Planet}} \cdot (1 - \sqrt[3]{(1 - y_{\text{Planet}})})$$

Für Kepler 138c:

$$\Delta R_{\text{Wasserschale}} = R_{\text{Kepler 138c}} \cdot \left(1 - \sqrt[3]{(1 - y_{\text{Kepler 138c}})}\right) \\ = 1,51 \cdot 6,371 \cdot 10^6 \text{ m} \cdot (1 - \sqrt[3]{(1 - 0,46)}) \approx 1790 \text{ km.}$$

Für Kepler 138d:

$$\Delta R_{\text{Wasserschale}} = R_{\text{Kepler 138d}} \cdot \left(1 - \sqrt[3]{(1 - y_{\text{Kepler 138d}})}\right) \\ = 1,51 \cdot 6,371 \cdot 10^6 \text{ m} \cdot (1 - \sqrt[3]{(1 - 0,84)}) \approx 5220 \text{ km.}$$

(ca. der halbe Planetenradius)

Lösungen

„Heißes Eis“

[Zurück zum Anfang](#)

Zu 1.) Die im Phasendiagramm für Wasser (auf der Rückseite) grau markierte „Alltagsregion“ nimmt nur einen sehr geringen Bereich ein. Dabei ist uns vor allem die Abhängigkeit des Aggregatzustands des Wassers von der Temperatur bewusst.

Zu 2.) An den Phasengrenzlinien finden folgende Phasenübergänge statt:

- fest \rightarrow flüssig: Schmelzen
- flüssig \rightarrow fest: Erstarren
- fest \rightarrow gasförmig: Sublimieren
- gasförmig \rightarrow fest: Resublimieren
- flüssig \rightarrow gasförmig: Verdampfen
- gasförmig \rightarrow flüssig: Kondensieren

Zu 3.) Zustand an der Oberfläche des Exoplaneten Kepler 138 c: $T = 140 \text{ }^\circ\text{C}$, $p \approx 10 \text{ MPa}$.
Der Zustandspunkt liegt eindeutig im Bereich der flüssigen Phasen.

Zu 4.) Zustand am Boden des Ozeans des Exoplaneten Kepler 138 c:

- T ca. $300 - 500 \text{ }^\circ\text{C}$
- p ca. 20 GPa

$$p = \rho \cdot g \cdot h$$

$$g = \gamma \cdot \frac{M}{R^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2} \cdot \frac{2,3 \cdot 5,9722 \cdot 10^{24} \text{ kg}}{(1,51 \cdot 6,371 \cdot 10^6 \text{ m})^2}$$
$$\approx 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2} \cdot 1,5 \cdot 10^{11} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \approx 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Für die Dichte von Wasser wird unabhängig vom Druck ein Wert von $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$ angenommen.

$$p = \rho \cdot g \cdot h = 1,0 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 2 \cdot 10^6 \text{ m} = 2 \cdot 10^{10} \frac{\text{kg}}{\text{s}^2 \text{ m}} = 2 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$$
$$p = 20 \text{ GPa}$$

Die Zustandspunkte liegen bis zu einer Temperatur von etwa $400 \text{ }^\circ\text{C}$ im Bereich der festen **superionischen Eis-Phasen**. Bei höheren Temperaturen gelangt man in den Bereich der überkritischen (oberhalb des kritischen Punktes gelegenen) flüssigen Phasen.

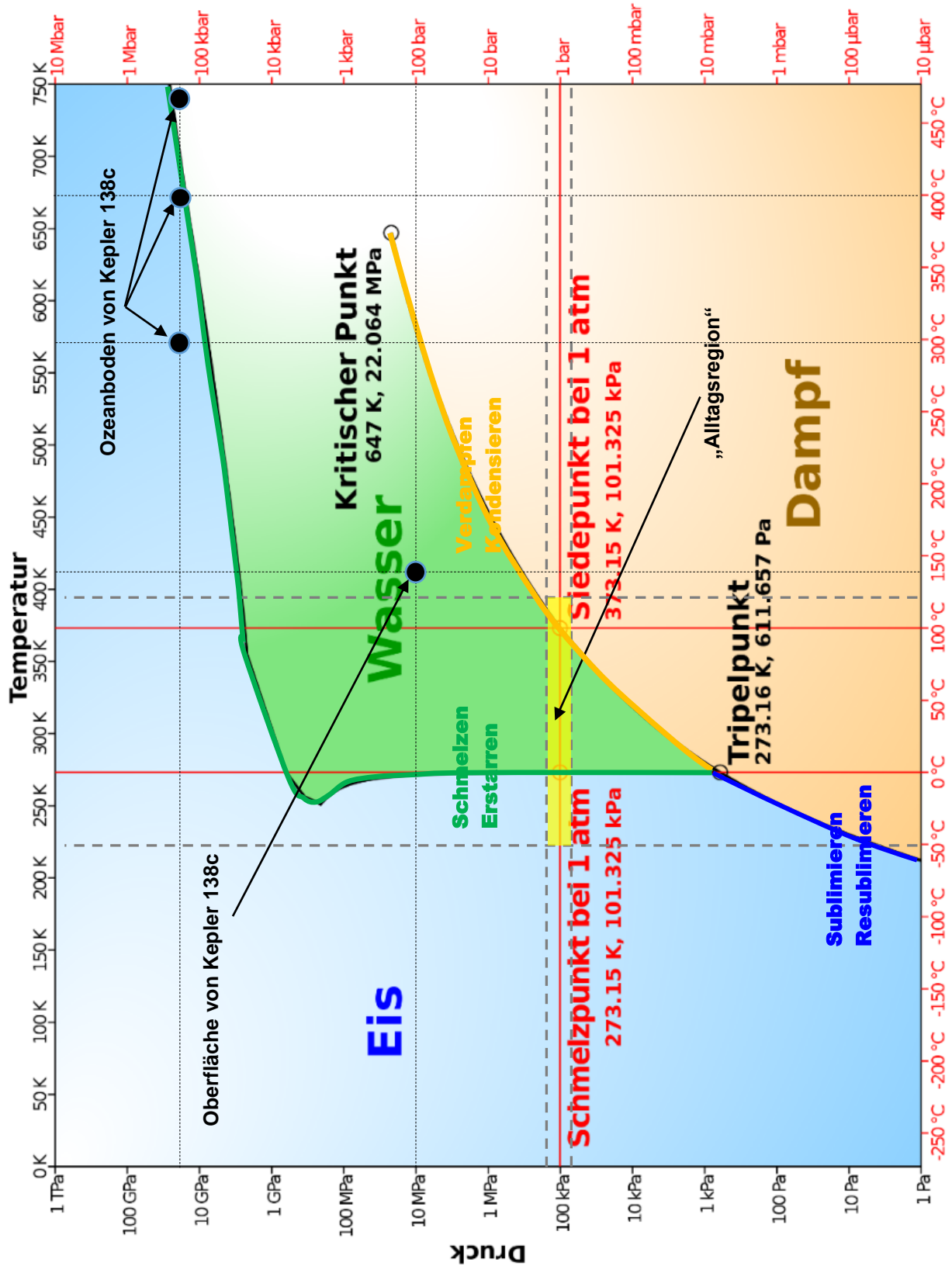


Abbildung 4: Phasendiagramm von Wasser mit Ergänzungen. Bei Temperaturen und Drücken oberhalb des kritischen Punkts spricht man von überkritischem Wasser. ©: author of the original work: Cmglee - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=34865054>.

Lösungen

Ist die Erde eine Wasserwelt?

[Zurück zum Anfang](#)



Abbildung 5: Erdgloben können den Betrachter zur Aussage verleiten, dass die Erde eine Wasserwelt ist. ©: Liuxingy - Eigenes Werk, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=80791378>.

Beim Blick auf den Erdglobus dominiert meist die Farbe Blau, die anzeigt, wo sich auf der Erdoberfläche Wasser befindet (siehe Abb. 5).

Folgt daraus, dass man die Erde als eine Wasserwelt bezeichnen kann?

zu 1.)

- Fläche Deutschlands: 357.588 km² (<https://de.wikipedia.org/wiki/Deutschland>)
- von Ozeanen bedeckte Erdoberfläche (diese haben den allergrößten Anteil): 360.570.000 km² bzw. 70,7 % der gesamten Erdoberfläche von 510.000.000 km² (<https://de.wikipedia.org/wiki/Erdoberfläche>)
- Die von Ozeanen bedeckte Erdoberfläche ist **rund tausendfach größer** als die Fläche von Deutschland.

Zu 2.)

In Ermangelung an umfassenden Daten zu den Wassertiefen der Ozeane kann deren Volumen nur geschätzt werden - 2009 wurden 1,33 · 10⁹ km³ geschätzt, (<https://de.wikipedia.org/wiki/Ozean>).

- Volumenanteil x_{Volumen} des flüssigen Wassers am Erdvolumen:

$$x_{\text{Volumen}} = \frac{V_{\text{Ozeane}}}{V_{\text{Erde}}} = \frac{1,33 \cdot 10^9 \text{ km}^3}{\frac{4}{3}\pi \cdot R_{\text{Erde}}^3} = \frac{1,33 \cdot 10^9 \text{ km}^3}{\frac{4}{3}\pi \cdot (6,371 \cdot 10^3 \text{ km})^3} = \frac{1,33 \cdot 10^9 \text{ km}^3}{\frac{4}{3}\pi \cdot (6,371 \cdot 10^3 \text{ km})^3} \approx 0,0012, (1,2 \%)$$

- Masseanteil x_{Masse} des flüssigen Wassers an der Erdmasse:

$$x_{\text{Masse}} = \frac{m_{\text{Ozeane}}}{m_{\text{Erde}}} = \frac{V_{\text{Ozeane}} \cdot \rho}{5,972 \cdot 10^{24} \text{ kg}} = \frac{1,33 \cdot 10^9 \text{ m}^3 \cdot 10^3 \text{ kg}}{5,972 \cdot 10^{24} \text{ kg}} \approx 0,0002, (0,2 \%)$$

Die Erde ist also keine Wasserwelt, sondern kann eher als ein relativ trockener Ort im Sonnensystem angesehen werden (der aber feucht genug für die Entstehung von Leben ist, siehe dazu auch unter <http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/wo-ist-das-wasser-im-sonnensystem/1571156>).

Zu 3.)

Gegeben:

- die im antarktischen Eisschild gebundene Wassermenge: 26,92 · 10⁶ km³
- von Ozeanen bedeckte Erdoberfläche: 360.570.000 km²
- Der Anstieg des Meeresspiegel h kann berechnet werden aus dem im antarktischen Eisschild gebundenen Wasservolumen $V_{\text{Eisschild}}$ (der Dichteunterschied zwischen festem und flüssigem Wasser wird hier vernachlässigt) und der Gesamtfläche der Ozeane A_{Ozeane} :

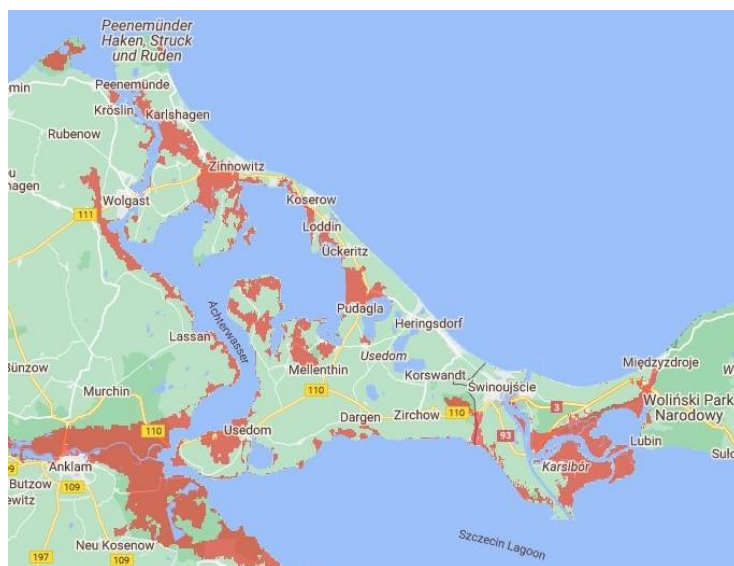
$$h = \frac{V_{\text{Eisschild}}}{A_{\text{Ozeane}}} = \frac{26,92 \cdot 10^6 \text{ km}^3}{360570 \cdot 10^3 \text{ km}^2} \approx 75 \text{ m.}$$

Unter dem Link https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Kryosph%C3%A4re_im_Klimasystem findet man den Wert 58,3 m. Der etwas größere Wert resultiert aus den Annahmen, dass das gesamte Eisvolumen auf dem antarktischen Festland liegt (die Randbereiche liegen schon im Wasser und tragen deshalb nicht zur Volumenvergrößerung bei) und, dass die Erhöhung nur im Bereich der bisherigen Fläche der Ozeane stattfindet (diese überschwemmen bei Anstieg aber auch Küstengebiete.)

Das Bild unten zeigt die unter dem Meeresspiegel liegenden Gebiete im Gebiet der deutschen Nord- und Ostseeküste für das Jahr 2050 (IPCC2021) nach <https://sealevel.climatecentral.org/maps/>.



<https://sealevel.climatecentral.org/maps/>. ©: 2021 Climate Central, Inc.



<https://sealevel.climatecentral.org/maps/>. ©: 2021 Climate Central, Inc.

Als Beispielbereich dient hier die Ostseeinsel Usedom. Diese würde beim für 2050 vorausgesagten Wasserstand ohne Schutzmaßnahmen in drei bis vier Teile zerfallen.

Lösung

Unsichtbare Wasserreserven der Erde

[Zurück zum Anfang](#)

Ein aus großer Tiefe zur Erdoberfläche gelangter Diamant lieferte anhand des in ihm eingeschlossenen Minerals Ringwoodit (eine Hochdruck-Modifikation des Minerals Olivins) das überaus interessante Indiz, dass in der Übergangsregion zwischen oberem und unterem Erdmantel (dort, wo Ringwoodit vermutlich existiert) ein gigantischer Wasservorrat in gebundener Form (im Ringwoodit) vorliegt.

(siehe <https://de.wikipedia.org/wiki/Ringwoodit>, <https://www.nationalgeographic.de/wissenschaft/2022/09/unterirdischer-ozean-gigantische-wassermengen-im-erdmantel-entdeckt>).

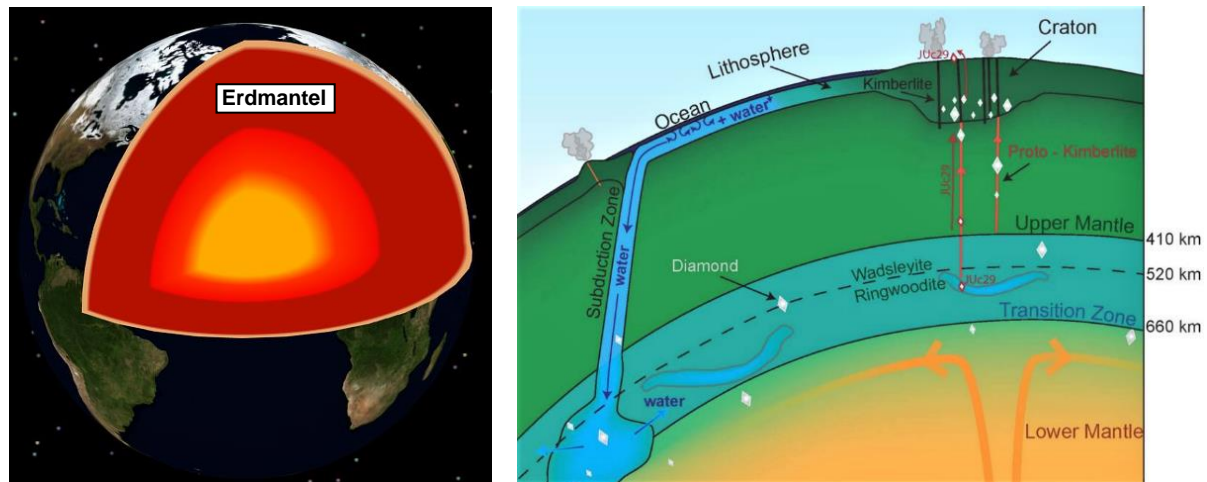


Abbildung 6: Links: Schalenbau der Erde. Auf dem (weichplastischen) oberen Erdmantel findet die Bewegung der Kontinentalschollen der Erdkruste statt. ©: SoyLentGreen - Myself, Earth-Texture is from NASA., CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1447709>.

Rechts: Mit dem Abtauchen der Kontinentalschollen gelangt auch Wasser in den oberen Erdmantel, welches zum Aufschmelzen führt. ©: D. G. Pearson et al.: „Hydrous mantle transition zone indicated by ringwoodite included within diamond“, Nature, 2014, Graham Pearson, University of Alberta, Department of Earth and Atmospheric Sciences, University of Alberta.

Berechnung des Kugelschalenvolumens der Übergangszone zwischen oberem und unterem Erdmantel:

$$V = \frac{4}{3}\pi \cdot (R_a^3 - R_i^3) = \frac{4}{3}\pi \cdot (660^3 \text{ km}^3 - 520^3 \text{ km}^3) = 146888000 \cdot 10^9 \text{ m}^3$$

Berechnung der Masse des Gesteins (Ringwoodit) in der Übergangszone bei Annahme einer Dichte von $\rho = 3,5 \text{ g/cm}^3 = 3,5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$

$$m_{\text{Erdmantel}} = V \cdot \rho = 146888000 \cdot 10^9 \text{ m}^3 \cdot 3,5 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \approx 5,14 \cdot 10^{20} \text{ kg}$$

Untersuchungen des eingeschlossenen Ringwoodits ($\rho = \text{g/cm}^3$) mithilfe von Infrarotstrahlung zeigten, dass das Mineral 1,5 Gewichtsprozent Wasser enthält ...

$$m_{\text{H}_2\text{O im Erdmantel}} = 5,14 \cdot 10^{20} \text{ kg} \cdot 0,015 \approx 7,71 \cdot 10^{18} \text{ kg}$$

$$f = \frac{m_{\text{H}_2\text{O im Erdmantel}}}{m_{\text{Ozeane}}} = \frac{7,71 \cdot 10^{18} \text{ kg}}{1,34 \cdot 10^{18} \text{ kg}} \approx 5,8$$

Dieses Ergebnis (**etwa 6-fache Menge** des ozeanischen Wassers) stellt eine obere Abschätzung dar, weil es davon ausgeht, dass der gesamte Bereich zwischen 520 und 660 km Tiefe aus Ringwoodit besteht und dieses vollständig mit Wasser „angereichert“ ist.

Mögliches Ergebnis zur Sonderaufgabe:



Das gezeigte Gesteinsstück (Fundort: Transsilvanien) stammt aus dem Erdmantel aus 40-50 km Tiefe, von wo aus es in einem Magmastrom nach oben befördert wurde. Der graue Gesteinsmantel stellt das „fest gewordene Transportmedium“ (Basalt) dar. Der größte Teil des eingeschlossenen Mantelgesteins besteht aus Olivin (die hellblassgrünen Kristalle). Die braunen bis fast schwarzen Kristalle sind aus dem Mineral Orthopyroxen, und die ganz kleinen, intensiv grünen Kristalle gehören zum Mineral Clinopyroxen (Gesteinsstück und Auskunft von Dr. Tilmann Althaus). ©: Olaf Fischer / HdA.

Lösungen

[Zurück zum Anfang](#)

Kleine Wasserwelten „vor der Haustür“ – z. B. Eismond ,Europa‘

Masseanteil v von Wasser an Europa

Gegeben sind:

- Masse von Europa $m_{\text{Europa}} \approx 4,8 \cdot 10^{22} \text{ kg}$
- Mittlerer Radius von Europa $R_{\text{Europa}} \approx 1561 \text{ km}$
- Mittlerer Radius des europainneren Europa $R_{\text{Europainneres}} \approx 1446 \text{ km}$
bei angenommene Eis-/Wassertiefen von 115 km ($t_{\text{Eis}} = 15 \text{ km}$, $t_{\text{Ozean}} = 100 \text{ km}$)

$$v = \frac{m_{\text{Europa-H}_2\text{O}}}{m_{\text{Europagesamt}}} = \frac{\frac{4}{3}\pi \cdot [R_{\text{Europa}}^3 - R_{\text{Europainneres}}^3] \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}}}{4,8 \cdot 10^{22} \text{ kg}} = \frac{\frac{4}{3}\pi \cdot [(1,561 \cdot 10^6 \text{ m})^3 - (1,446 \cdot 10^6 \text{ m})^3] \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{4,8 \cdot 10^{22} \text{ kg}}$$

$$\approx \frac{3,27 \cdot 10^{18} \text{ m}^3 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{4,8 \cdot 10^{22} \text{ kg}} = \frac{3,27 \cdot 10^{21} \text{ kg}}{4,8 \cdot 10^{22} \text{ kg}} \approx 0,07, \text{ d. h. der Masseanteil von Wasser beträgt } 7 \text{ \%}.$$

Dichteannahme für das Innere von Europa

Mittlere Dichte für Europa insgesamt: $\rho_{\text{Europa}} = 3,010 \text{ g/cm}^3$

$$\rho_{\text{Europainneres}} = \frac{m_{\text{Europainneres}}}{V_{\text{Europainneres}}} = \frac{m_{\text{Europagesamt}} - m_{\text{Europa-H}_2\text{O}}}{\frac{4}{3}\pi \cdot R_{\text{Europainneres}}^3}$$

$$= \frac{4,8 \cdot 10^{22} \text{ kg} - 3,27 \cdot 10^{21} \text{ kg}}{\frac{4}{3}\pi \cdot 1,446^3 \cdot 10^{18} \text{ m}^3} \approx \frac{4,473 \cdot 10^{22} \text{ kg}}{1,266 \cdot 10^{19} \text{ m}^3} \approx 3533 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \approx 3,5 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Materialien im Inneren von Europa

Die mittlere Dichte der Erde beträgt $\rho_{\text{Erde}} \approx 5,51 \text{ g/cm}^3$ (<https://de.wikipedia.org/wiki/Erde>). Die Erdkruste hat dagegen nur eine mittlere Dichte von etwa $2,7 \text{ g/cm}^3$ (kontinentale Kruste) bzw. etwa 3 g/cm^3 (ozeanische Kruste, <https://de.wikipedia.org/wiki/Erdkruste>).

Das bedeutet, dass die Erde in ihrem Inneren einen großen Eisen-Kern enthalten muss, da die Erdmantel-Materialien (vor allem die Silikate Olivin und Pyroxen) nur Dichten von etwa $3,2$ bis $4,4 \text{ g/cm}^3$ haben.

Im Inneren von Europa vermutet man auch einen kleinen Kern vor allem aus Eisen, der umgeben ist von einem dicken Mantel aus Silikatgestein (siehe Abb. 7).

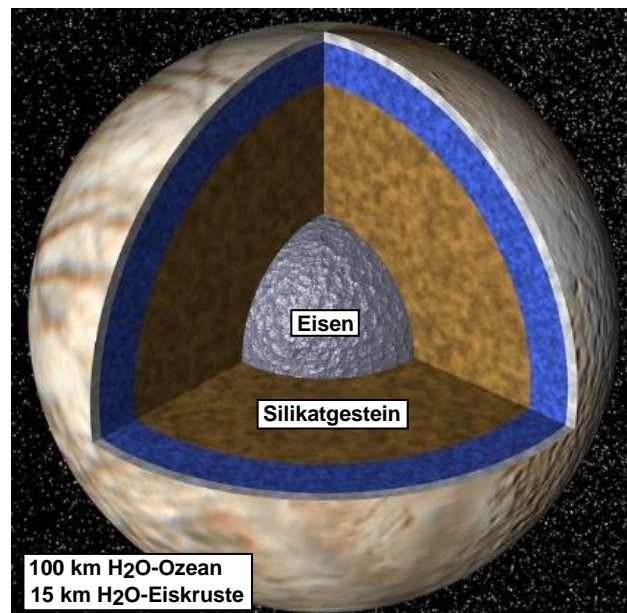


Abbildung 7: Modellidee zum inneren Aufbau von Europa. Im Kern vermutet man flüssiges Eisen, das von einem mächtigen Mantel aus Silikatgesteinen umgeben ist. Die äußere Schicht besteht aus Wasser und gliedert sich in einen „Ozean“ und eine Eishülle. ©: unknown author of the NASA derivative work: MagentaGreen - Diese Datei wurde von diesem Werk abgeleitet: PIA01130 Interior of Europa.jpg; Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=35754618>. Siehe auch: <http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/wo-ist-das-wasser-im-sonnensystem/2012137>.

Lösung

Mit der JUICE-Mission zu den Eismonden

[Zurück zum Anfang](#)

Gegeben bzw. zu recherchieren sind:

- Leuchtkraft (Gesamtstrahlungsleistung) der Sonne $L_{\text{Sonne}} = 3,828 \cdot 10^{26} \text{ W}$
- Abstand des Jupiter von der Sonne $r_{\text{Jupiter}} = 5,2 \text{ AE}$ (Astronomische Einheiten)
- Umrechnung AE zu km: $1 \text{ AE} \approx 150 \cdot 10^6 \text{ km}$
- Fläche der Solarpaneele $A_{\text{JUICE}} = 85 \text{ m}^2$
- Wirkungsgrad der verwendeten Solarzellen $\eta = 0,25$



Abbildung 8: JUICE-Satellit mit Solar-Paneele in künstlerischer Darstellung.
©: ESA / ATG medialab.

Für die Berechnung der im Abstand von Jupiter r_{Jupiter} (5,2 AE (Astronomische Einheiten) bzw. 778,51 Mio. km) noch ankommenden Strahlungsleistung S_{Jupiter} (eine Art Solarkonstante für Jupiter) muss man die Gesamtstrahlungsleistung (Leuchtkraft) der Sonne L_{Sonne} ($3,828 \cdot 10^{26} \text{ W}$) auf die Oberfläche O_{Jupiter} einer Kugelschale mit dem Radius r_{Jupiter} verteilen:

$$S_{\text{Jupiter}} = \frac{L_{\text{Sonne}}}{O_{\text{Jupiter}}} = \frac{L_{\text{Sonne}}}{4\pi \cdot r_{\text{Jupiter}}^2} = \frac{3,828 \cdot 10^{26} \text{ W}}{4\pi \cdot (778,51 \cdot 10^9 \text{ m})^2} \approx 50,26 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Die aus dem Strahlungsfluss bei Jupiter durch die Solarpaneele mit der Fläche A_{JUICE} von JUICE aufgefängene Leistung P_{JUICE} erhält man durch:

$$P_{\text{JUICE}} = A_{\text{JUICE}} \cdot S_{\text{Jupiter}} = 85 \text{ m}^2 \cdot 50,26 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \approx 4272 \text{ W}.$$

Die für den Betrieb der Instrumente von JUICE verwertbare **elektrische Leistung** $P_{\text{JUICE,el}}$ berechnet sich dann mittels des Wirkungsgrads η der Solarpaneele aus

$$P_{\text{JUICE,el}} = P_{\text{JUICE}} \cdot \eta = 4272 \text{ W} \cdot 0,25 = 1068 \text{ W}.$$

Für den Betrieb der Instrumente von JUICE steht eine elektrische Leistung von 1068 W zur Verfügung. Diese Leistung würde in unserem Haushalt allein zum Betrieb einer größeren Mikrowelle ausreichen.

(siehe auch: https://www.haus-der-astronomie.de/3769656/Die_Stromversorgung_der_ISS_Lehrer.pdf).

Lösung

Wasser in der Oort'schen Wolke – Wasser in Kometenkernen [Zurück zum Anfang](#)

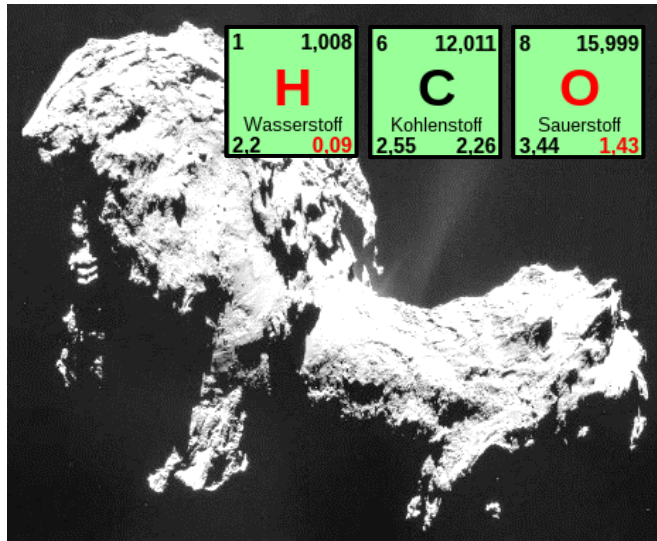


Abbildung 9: Kern des Kometen Tschurjumow-Grassimenko, aufgenommen von der Kometensonde Rosetta.
© ESA/Rosetta/NAVCAM, CC BY-SA IGO 3.0, CC BY-SA 3.0 igo,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=36603034>.

Um die absolute Masse eines Atoms zu berechnen, braucht man dessen im Periodensystem ablesbare relative Masse (siehe Teilbilder für die Elemente H, C und O). Diese gibt an, wievielfach größer die Masse eines Atoms als die **atomare Masseneinheit** ist. Die atomare Masseinheit hat den Wert $1,66053906660 \cdot 10^{-27}$ kg (<https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?u>).

Die Massen der stabilen Atome (der stabilen Isotope) von Wasserstoff, Kohlenstoff und Sauerstoff betragen demnach:

- Für H: $1,008 \cdot 1,660\,539\,066\,60 \cdot 10^{-27}$ kg $\approx 1,6738 \cdot 10^{-27}$ kg
- Für C: $12,011 \cdot 1,660\,539\,066\,60 \cdot 10^{-27}$ kg $\approx 19,9447 \cdot 10^{-27}$ kg
- Für O: $15,999 \cdot 1,660\,539\,066\,60 \cdot 10^{-27}$ kg $\approx 26,5670 \cdot 10^{-27}$ kg

Aus den absoluten Atommassen können die absoluten Molekülmassen entsprechend den Summenformeln ermittelt werden.

Molekül	Trivialname	Absolute Molekülmasse	Masseanteil am Kometenkern (Summe = 100 %)	Prozentualer Anteil an Gesamtmasse des Kometenkerns ($\approx 10^{13}$ kg), gerundet
H ₂ O	Wasser	$29,9146 \cdot 10^{-27}$ kg	2991,46	81,54 %
CO ₂	Kohlendioxid	$73,0787 \cdot 10^{-27}$ kg	343,4699	9,36 %
CO	Kohlenmonoxid	$46,5117 \cdot 10^{-27}$ kg	144,1863	3,93 %
O ₂	Sauerstoff (molekular)	$53,1340 \cdot 10^{-27}$ kg	164,7154	4,49 %
CH ₄	Methan	$26,6399 \cdot 10^{-27}$ kg	9,0576	0,25 %
C ₂ H ₆	Äthan	$49,9322 \cdot 10^{-27}$ kg	14,4803	0,39 %
C ₃ H ₈	Propan	$73,2245 \cdot 10^{-27}$ kg	1,3180	0,04 %
			3668,6875	

Die Kometenkerne zeugen davon, dass große Mengen an Wasser ursprünglich vorhanden waren und eine Ozeanwelt im Sonnensystem evt. möglich gewesen wäre.