

# Wo ist das Wasser im Sonnensystem?

In Bezug zu den SuW-Beiträgen „Venusatmosphäre zu trocken für Leben“ (Brennpunkt 2099) aus der Rubrik: „Blick in die Forschung: Nachrichten“ in Heft 6/2022 und schon vorausschauend „Ein Wasserozean im Inneren von Mimas?“ (Brennpunkt 2160) im kommenden Heft 7/2022, WIS-ID: 1571156, Zielgruppe: Mittelstufe bis Oberstufe

Olaf Fischer

Flüssiges Wasser gilt als das Elixier des Lebens. Schon deswegen ist das Aufspüren von Wasser im Weltraum immer auch mit dem Hintergedanken der Suche nach Leben verbunden. Aus irdischer Sicht könnten wir die Vorstellung entwickeln, dass die Erde ein mit Wasser gesegneter Himmelskörper ist. Ist dem wirklich so? Befindet sich die Erde im Sonnensystem an einem wasserreichen Ort (wobei natürlich auch Wassereis einbezogen wird)?

Dieser Frage wollen wir im WIS-Beitrag nachgehen. Schüler können sich der Beantwortung der Frage, wie das Wasser (in allen Aggregatzuständen) im Sonnensystem verteilt ist, selbst nähern, indem sie Daten recherchieren, kleine Rechnungen durchführen und die Ergebnisse grafisch auswerten.

In SuW erscheinen immer wieder Nachrichten, die Bezüge zum Wasservorkommen im Sonnensystem haben (so z. B. im aktuellen Heft 6/2022: „Venusatmosphäre zu trocken für Leben“ und im kommenden Heft 7/2022: „Ein Wasserozean im Inneren von Mimas?“).

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Astronomie	Planeten, Kleinkörper	Sonnensystem, <a href="#">Wasser im Sonnensystem</a> , <a href="#">Klassifikation der solaren Himmelskörper</a> , <a href="#">Eisriesen</a> , <a href="#">Eismonde</a> , <a href="#">Europa</a> , <a href="#">Mimas</a> , <a href="#">Triton</a> , <a href="#">Polkappen des Mars</a> , <a href="#">Merkur</a> , <a href="#">Radius-Dichte-Diagramm</a> , <a href="#">Schalenaufbau von differenzierten Himmelskörpern</a>
Physik	Mechanik	<a href="#">Dichte</a> , <a href="#">mittlere Dichte</a>
Fächer- verknüpfung	Astronomie – Mathematik Astronomie – Informatik	Volumina von <a href="#">Kreiszylinder</a> , Kugel und <a href="#">Kugelschale</a> <a href="#">computergestützte Erfassung und Auswertung von Daten mittels EXCEL</a>
Lehre allgemein	Kompetenzen (Erkenntnisgewinnung, Kommunikation), Unterrichtsmittel	<a href="#">Recherchieren von Daten</a> , <a href="#">Berechnen von Volumina und Dichte</a> , <a href="#">computergestütztes Erstellen von Diagrammen</a> , <a href="#">Interpretieren von Diagrammen</a> , <a href="#">Arbeitsblatt</a> , <a href="#">EXCEL-Datei</a>

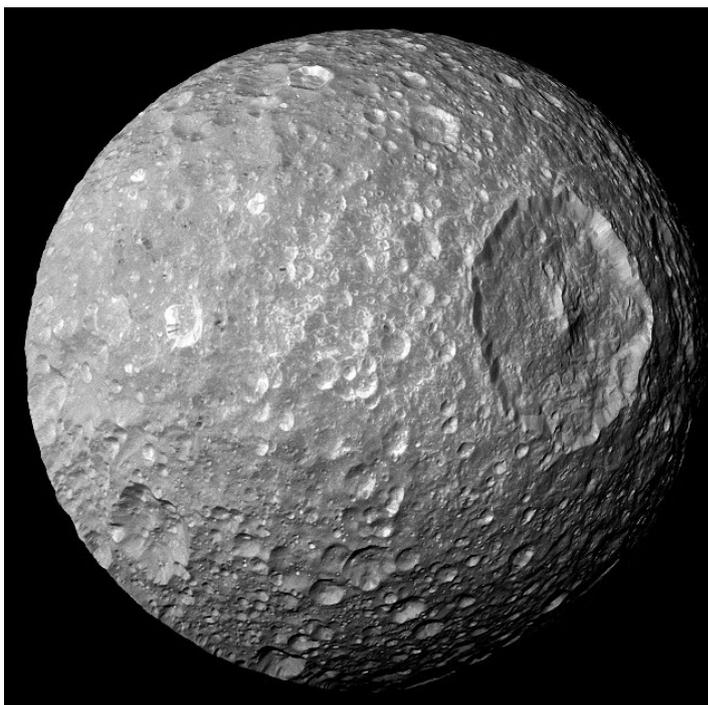


Abbildung 1: Saturnmond Mimas. 10 Eismonde wie Mimas würden ausreichen, um den Atlantischen Ozean zu füllen.

©: NASA / JPL-Caltech / Space Science Institute - Diese Mediendatei wurde vom Jet Propulsion Lab der US-amerikanischen National Aeronautics and Space Administration (NASA) unter der Datei-ID PIA12570 kategorisiert., Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10371541>.

[Zurück zum Anfang](#)

## Datenrecherche zu ausgewählten Himmelskörpern im Sonnensystem

Die Grundlage aller Wissenschaft bilden Daten. Diese liegen dank der vielen erfolgreichen Satellitenmissionen der vergangenen Jahrzehnte zu allen größeren Körpern des Sonnensystems vor und können aus dem Internet abgerufen werden.

Auch die Datensuche muss gelernt sein, weil die Frage nach deren Verlässlichkeit immer im Raum steht. Hinsichtlich der hier benötigten Daten (mittlerer Radius, mittlere Dichte, mittlerer Abstand zur Sonne, Angaben zum Wassergehalt der Himmelskörper) verlassen wir uns auf die Angaben, die auf den deutsch- und englischsprachigen Wikipedia-Seiten zu finden sind, weil diese in der Regel auf dort aufgeführten wissenschaftlichen Veröffentlichungen beruhen.

Der Umfang der **Rechercheaufgaben** kann beliebig variiert werden. Hier werden lediglich die fehlenden Angaben zu vier solaren Himmelskörpern (Mars, Europa, Triton und Mimas) gesucht (siehe [Arbeitsblatt](#) hinten). Alle weiteren Angaben (samt den Ergebnissen) werden in Tab. 1 bereitgestellt.

Himmelskörper im Sonnensystem		Mittlerer Radius [km]	Mittlere Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Mittlerer Abstand zur Sonne [AE]	Angaben zum Wassergehalt (alle Aggregatzustände)	Wassermenge in Erd-Wassermassen
Name	Klassifizierung					
Jupiter	Planet, Gasriese	69911	1,33	5,2	geschätzt mind. 1 Erdmasse im Gestein-Eis-Kern	4000
Saturn	Planet, Gasriese	58232	0,69	9,6	geschätzt mind. 1 Erdmasse im Gestein-Eis-Kern	4000
Saturnring	Ringstruktur			9,6		25
Uranus	Planet, Eisriese	25362	1,27	19,2	geschätzt mind. 1 Erdmasse in Wasser-Ammoniak-Ozean im Mantel	4000
Neptun	Planet, Eisriese	24622	1,64	30,0	geschätzt mind. 1 Erdmasse in Wasser-Ammoniak-Ozean im Mantel	4000
Erde	Planet, Gesteinsplanet	6371	5,51	1,0	$1,4 \cdot 10^9 \text{ km}^3$	1
Venus	Planet, Gesteinsplanet	6052	5,24	0,7	nur noch Spuren	0
Mars	Planet, Gesteinsplanet	3389	3,93	1,5	N-Polkappe: $\varnothing = 1100 \text{ km}$ , $d = 1 \text{ km}$ S-Polkappe: $\varnothing = 400 \text{ km}$ , $d = 1,5 \text{ km}$ $\rightarrow 1,1 \cdot 10^6 \text{ km}^3$	0,0008
Ganymed	Mond, Eismond	2631	1,94	5,2	800 km dicker Mantel $\rightarrow 5 \cdot 10^{10} \text{ km}^3$	36
Titan	Mond, Eismond	2575	1,88	9,6	ca. 50 % $\rightarrow 3,6 \cdot 10^{10} \text{ km}^3$	26
Merkur	Planet, Gesteinsplanet	2440	5,43	0,4	Spuren in polnahen Kratern	0
Kallisto	Mond, Eismond	2410	1,83	5,2	210 km dicker Mantel $\rightarrow 1,4 \cdot 10^{10} \text{ km}^3$	10
Mond	Mond, Gesteinsmond	1737	3,34	1,0	Spuren in polnahen Kratern	0
Europa	Mond, Eismond	1651	3,01	5,2	15+100 km H <sub>2</sub> O-Hülle $\rightarrow 3,7 \cdot 10^9 \text{ km}^3$	2,6
Triton	Mond, Eismond	1353	2,06	30,0	ca. 25 % $\rightarrow 2,6 \cdot 10^9 \text{ km}^3$	1,9
Titania	Mond, Eismond	789	1,71	19,2	ca. 270 km Eismantel $\rightarrow 3,5 \cdot 10^8 \text{ km}^3$	0,25
Rhea	Mond, Eismond	765	1,24	9,6	ca. 75 % $\rightarrow 1,4 \cdot 10^9 \text{ km}^3$	1,0
Oberon	Mond, Eismond	761	1,63	19,2	ca. 50 % $\rightarrow 9,2 \cdot 10^8 \text{ km}^3$	0,7
Iapetus	Mond, Eismond	736	1,08	9,6	fast komplett $\rightarrow 1,7 \cdot 10^9 \text{ km}^3$	1,2
Charon	Mond, Eismond	604	1,65	39,5	ca. 45 % $\rightarrow 4,2 \cdot 10^8 \text{ km}^3$	0,3
Pluto	Zwergplanet	594	1,85	39,5	ca. 30 % $\rightarrow 2,6 \cdot 10^8 \text{ km}^3$	0,2
Umbriel	Mond, Eismond	585	1,39	19,2	ca. 60 % $\rightarrow 5 \cdot 10^8 \text{ km}^3$	0,36
Ariel	Mond, Eismond	580	1,66	19,2	ca. 50 % $\rightarrow 4,1 \cdot 10^8 \text{ km}^3$	0,29
Dione	Mond, Eismond	561	1,48	9,6	160 km Eiskruste $\rightarrow 1,1 \cdot 10^8 \text{ km}^3$	0,08
Tethys	Mond, Eismond	533	0,97	9,6	fast komplett $\rightarrow 6,3 \cdot 10^8 \text{ km}^3$	0,45
Ceres	Zwergplanet	470	2,16	2,8	ca. 20 % $\rightarrow 8,7 \cdot 10^7 \text{ km}^3$	0,06
Vesta	Asteroid	262	3,46	2,4	-	0
Enceladus	Mond, Eismond	252	1,61	9,6	50 km Kruste (Eis+Ozean) $\rightarrow 7,8 \cdot 10^6 \text{ km}^3$	0,006
Miranda	Mond, Eismond	236	1,21	19,2	ca. 80 % $\rightarrow 4,4 \cdot 10^7 \text{ km}^3$	0,03
Mimas	Mond, Eismond	199	1,15	9,6	Annahme hier: fast komplett $\rightarrow 3,3 \cdot 10^7 \text{ km}^3$	0,02

Tabelle 1: Ausgesuchte Daten zu Himmelskörpern im Sonnensystem. Die Auflistung folgt der Größe der Himmelskörper. Das wesentliche Ziel besteht darin, den insgesamt in diesen Himmelskörpern enthaltenen Wasseranteil (alle Aggregatzustände) in Einheiten der Menge des gesamten Wassers auf der Erde ( $1,4 \cdot 10^9 \text{ km}^3$ ) anzugeben. Die Daten stammen in der Regel von den deutsch- und englischsprachigen Wikipedia-Seiten. Die Wasseranteile für die großen Planeten wurden grob geschätzt. Die Ergebnisse der Wassermengen wurden stark gerundet.

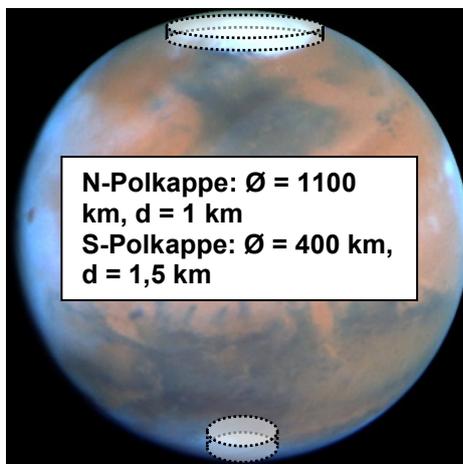
Die gelb markierten Daten sollen von den Schülern selbst recherchiert und ausgewertet werden (siehe [Arbeitsblatt](#) hinten).

[Zurück zum Anfang](#)

## Rechnerische Datenauswertung – Bestimmung der Wassermengen

Der gesuchte Anteil des Wassers an der Zusammensetzung der solaren Himmelskörper wird durch die Fachleute für einige Objekte abschätzend in Prozent angegeben. Es finden sich aber auch genauere Angaben zum Aufbau der Himmelskörper und dabei zu den Gebieten, in denen Wasser in Form von Eis oder auch in flüssiger Form vermutet wird. Die Volumina dieser Gebiete können durch **einfache Körper** angenähert werden, so dass schon Kenntnisse aus der Mittelstufe ausreichen.

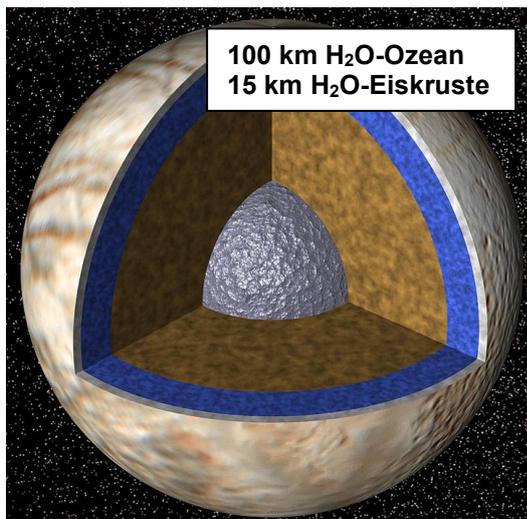
Die unterschiedlichen Wasserdichten in den verschiedenen Aggregatzuständen und bei verschiedenen Drücken werden hier nicht berücksichtigt. Als Vergleichsgröße für die Wassermenge eines Himmelskörpers dient hier die Wassermenge der Erde ( $1,4 \cdot 10^9 \text{ km}^3$ ).



Zu den **Polkappen des Mars** (als den vermutlich hauptsächlich marsianischen Wasserreservoirs) findet man unter [https://de.wikipedia.org/wiki/Polkappen\\_des\\_Mars](https://de.wikipedia.org/wiki/Polkappen_des_Mars) folgende Angaben: Die nördliche Polkappe hat einen Durchmesser von 1100 km und ist 2 km dick, besteht aber nur zur Hälfte aus  $\text{H}_2\text{O}$ -Eis. Für die südliche Polkappe findet man die Werte  $\text{Ø} = 400 \text{ km}$  und  $d = 1,5 \text{ km}$ .

Mittels der Annäherung durch **Kreiszyylinder** erhält man eine Gesamtwassermenge von rund  $1,1 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ . Im Vergleich zur Erde ( $1,4 \cdot 10^9 \text{ km}^3$ ) ist das etwas 1300-tel, würde aber ausreichen, um die Ostsee (laut Wikipedia  $21.630 \text{ km}^3$  samt Kattegat) 50-mal zu füllen.

Abbildung 2: Zur Volumenberechnung der Polkappen des Mars können diese durch Kreiszyylinder angenähert werden. ©: Marsbild: NASA, Philip James (University of Toledo), Steven Lee (University of Colorado) – <http://imgsrc.hubblesite.org/hu/db/ images/hs-1995-16-b-full .jpg.jpg>, Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=38374863>.



Auf der Internetseite zum **Jupitermond Europa** ([https://de.wikipedia.org/wiki/Europa\\_\(Mond\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Europa_(Mond))) findet man die aus Bahndaten von Satelliten gewonnene **Modellidee zum Aufbau des Himmelskörpers**, wonach dieser eine äußere Schale aus  $\text{H}_2\text{O}$  (Eiskruste+Ozean) mit den links angegebenen Dicken besitzt. Die Annäherung durch eine **Kugelschale** ergibt für das Wasservolumen einen Wert von etwa  $3,7 \cdot 10^9 \text{ km}^3$ .

$$V = \frac{4}{3} \pi (R_{\text{außen}}^3 - R_{\text{innen}}^3)$$

$$V = \frac{4}{3} \pi \cdot (1651^3 - 1536^3) \text{ km}^3 \approx 3,7 \cdot 10^9 \text{ km}^3.$$

Damit erhält man das erstaunliche Ergebnis, dass allein schon dieser Mond des Jupiters die 2,6-fache Wassermenge der Erde besitzt.

Abbildung 3: Modellidee zum inneren Aufbau von Europa. Im Kern vermutet man flüssiges Eisen, dass 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>.

[Zurück zum Anfang](#)

Zum **Neptunmond Triton** findet man unter [https://en.wikipedia.org/wiki/Triton\\_\(moon\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Triton_(moon)) die Information, dass dieser zu ca. 15 – 35 % aus Wassereis besteht. Wir nehmen als Mittelwert hier 25 % an und erhalten damit für Triton (mittlerer Radius: 1353 km) ein Wasservolumen von rund  $2,6 \cdot 10^9 \text{ km}^3$ , also die 1,9-fache Menge des Erdwassers.

Der **Saturnmond Mimas** könnte sogar überwiegend aus Wassereis bestehen ([https://de.wikipedia.org/wiki/Mimas\\_\(Mond\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Mimas_(Mond))). Das hieße, das Wasservolumen dieses Eismonds (mittlerer Radius: 199 km) beträgt rund  $3,3 \cdot 10^7 \text{ km}^3$  und würde ausreichen, die Ostsee ( $21.630 \text{ km}^3$  samt Kattegat) mehr als 1500-mal zu füllen.

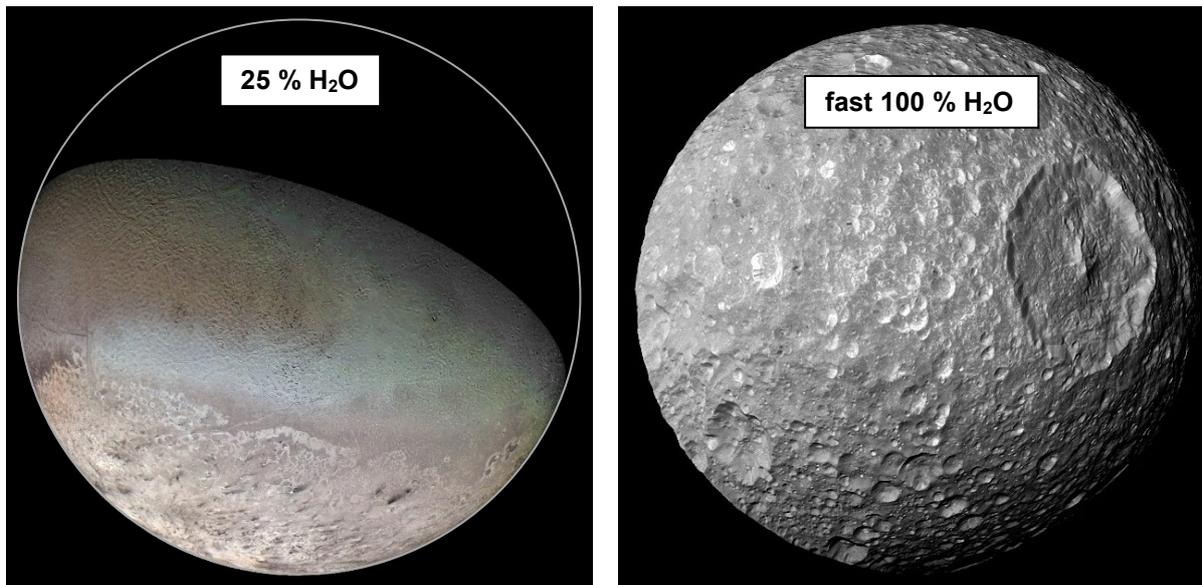


Abbildung 4: Links: Von Triton nehmen wir an, dass er zu 25 % aus Wasser besteht. Die Aufnahme des „Halbriton“ entstand schon 1989 durch die Raumsonde Voyager 2. ©: NASA / Jet Propulsion Lab / U.S. Geological Survey - <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA00317>, Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=96172>. Rechts: Der Saturnmond Mimas besteht nahezu vollständig aus Wasser. 10 Eismonde wie Mimas würden ausreichen, um den Atlantischen Ozean zu füllen. ©: NASA / JPL-Caltech / Space Science Institute - Diese Mediendatei wurde vom Jet Propulsion Lab der US-amerikanischen National Aeronautics and Space Administration (NASA) unter der Datei-ID PIA12570 kategorisiert., Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10371541>.

## Grafische Datenauswertung

Grafische Veranschaulichungen (Visualisierungen) haben für die wissenschaftliche Arbeit und weit darüber hinaus eine wesentliche Bedeutung, die vermutlich damit zusammenhängt, dass das Auge den wesentlichen Sinneskanal darstellt. Sie stellen eine Brücke dar, die für die Interpretation von Daten erforderlich ist.

Die vorliegenden Daten zu den solaren Himmelskörpern sollen hinsichtlich dreier Zusammenhänge visualisiert werden: die Verteilung des Wassers im Sonnensystem im Abstand-Wassermenge-Diagramm, die Verteilung der Elemente (schwere und leichte Elemente) im Sonnensystem im Abstand-Dichte-Diagramm und für die Himmelskörper selbst die Abhängigkeit der mittleren Dichte von ihrer mittleren Größe im Radius-Dichte-Diagramm (einem Diagramm, welches auch für die Exoplanetenforschung bedeutsam ist).

### Abstand-Wassermenge-Diagramm

Im Abstand-Wassermenge-Diagramm zeigt sich eine Zweiteilung des Sonnensystems in eine wasserarme Region im Zentrum (die etwa bis zum Asteroidengürtel reicht) und eine wasserreiche Region außerhalb. Diese Zweiteilung scheint einer jüngst veröffentlichten Studie [1] nach das Ergebnis von zwei Schüben der Entstehung von Planetesimalen in der Bildungsphase des Sonnensystems zu sein. Die Objekte der älteren sonnennahen Planetesimalpopulation wurden danach durch das im Baumaterial noch stärker vertretene radioaktive Isotop Aluminium 26 mehr aufgeheizt und dadurch entwässert. Der relative Wasserreichtum der Erde scheint das Ergebnis vom nachträglichem massivem „Wasserimport“ zu sein.

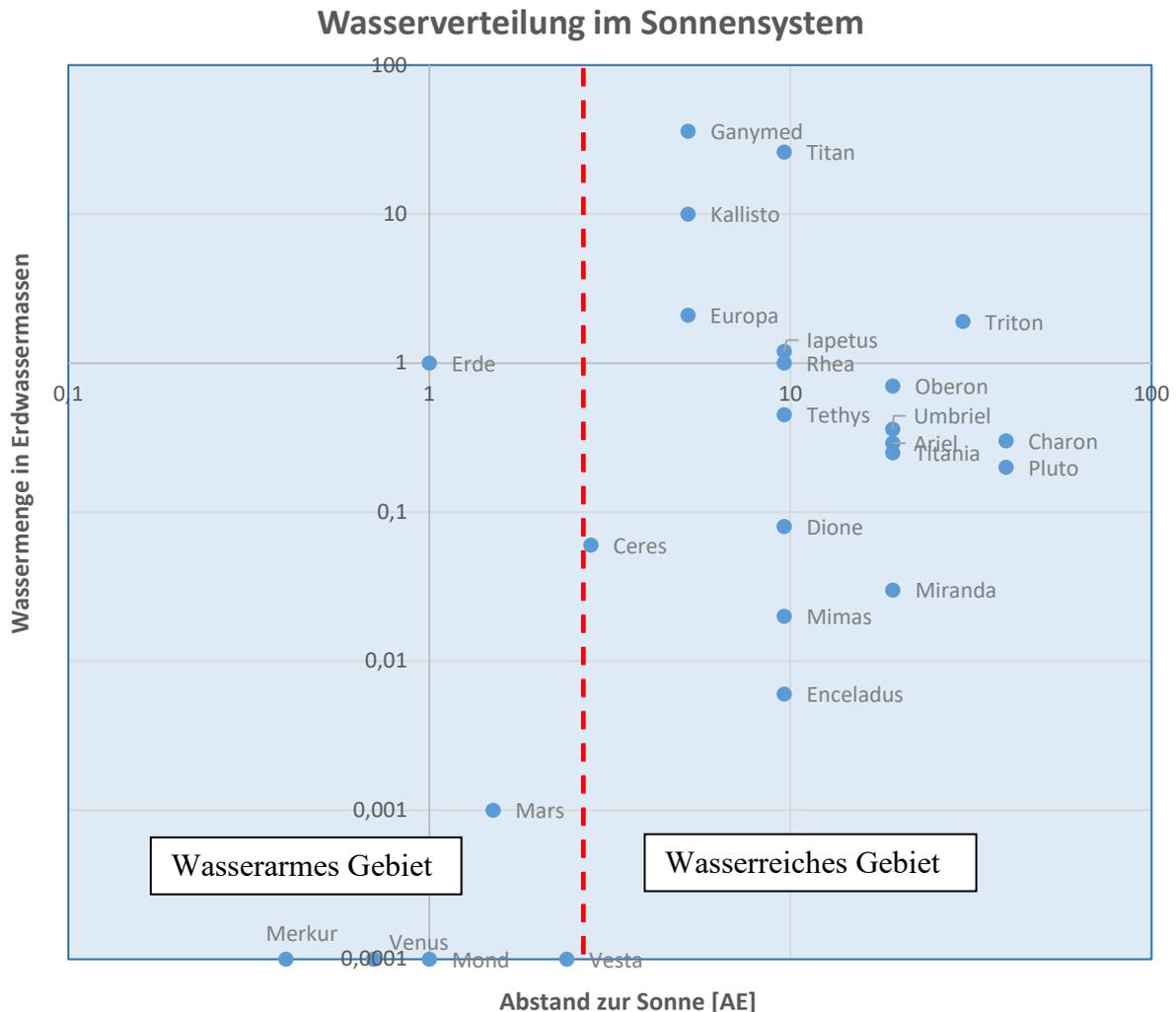


Abbildung 5: Das Diagramm zeigt die Wassermengen der in Tab. 1 aufgeführten Objekte des Sonnensystems. Deutlich wird, dass die Objekte außerhalb des Asteroidengürtels deutlich wasserhaltiger sind. Die Erde hat ihr Wasser wahrscheinlich nachträglich durch einströmende wasserreiche Objekte aus dem Außenbereich des Sonnensystems bekommen.

Die zur Erzeugung des Diagramm genutzte EXCEL-Datei (samt allen in Tab. 1 aufgeführten Daten und den damit erzeugten Grafiken) kann als [Zusatzmaterial](#) heruntergeladen werden.

### Abstand-Dichte-Diagramm

Im Abstand-Wassermenge-Diagramm zeigt sich ein deutlicher Trend der Abnahme der mittleren Dichte der solaren Himmelskörper von innen nach außen im Sonnensystem. Am oberen Ende der Verteilung befinden sich Erde, Merkur und Venus. Nach einem steilen Abfall der Dichten geht die Trendlinie etwa ab dem Bereich des Asteroidengürtels über zu geringen Dichten um die 2 g/cm<sup>3</sup>, was ein Hinweis auf ein mehr an leichten Elementen ist und auch einher geht mit der Wasserverteilung im Sonnensystem.

## Dichteverteilung im Sonnensystem

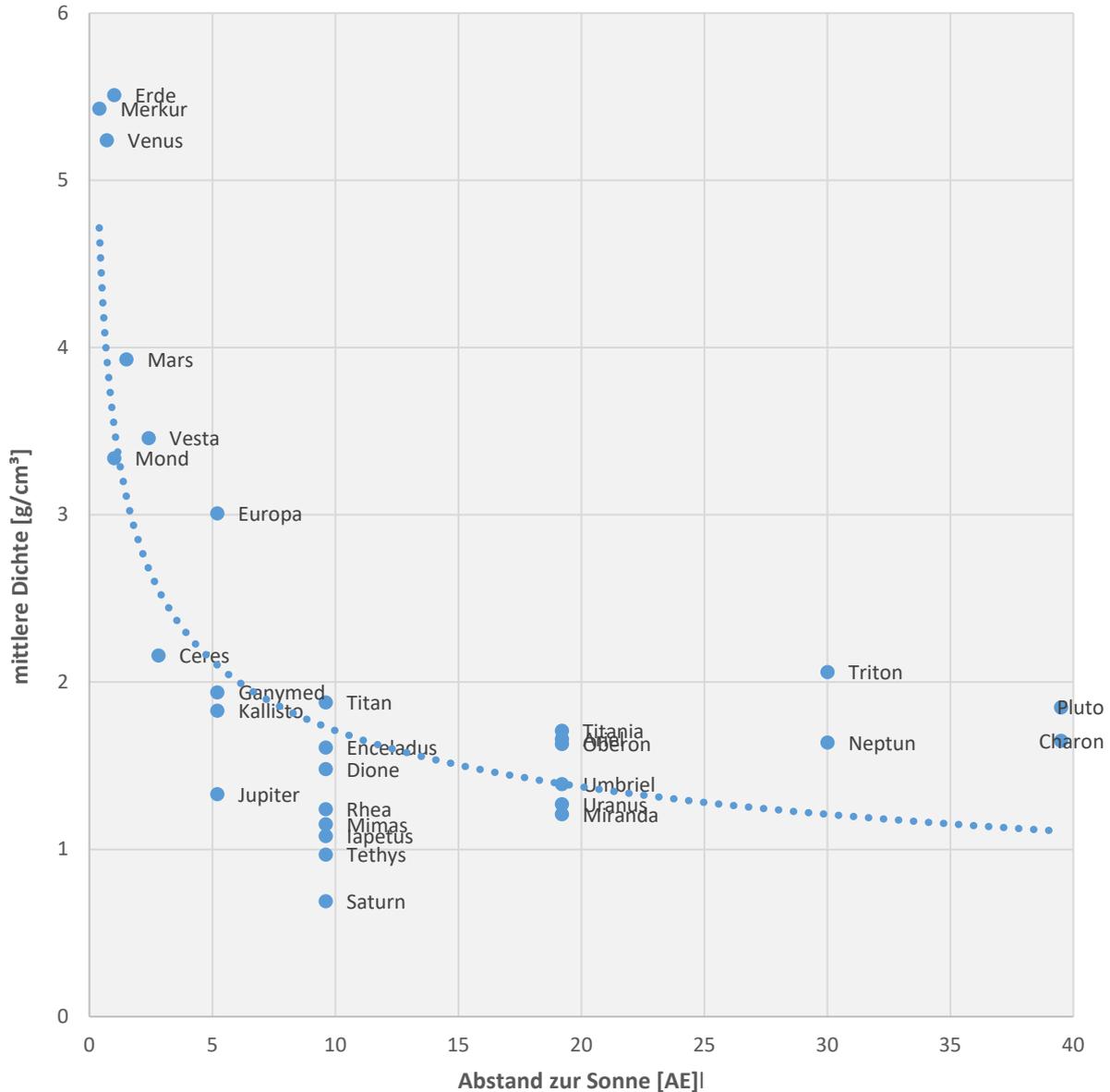


Abbildung 6: Aufgetragen sind die mittleren Dichten der in Tab. 1 aufgeführten solaren Himmelskörper über ihrem Abstand zur Sonne. Die geringen mittleren Dichten der Objekte jenseits des Asteroidengürtels (zwischen Mars und Jupiter) sind ein Hinweis auf die Dominanz leichter Elemente insbesondere auch in Form von Wasser. Im äußeren Sonnensystem (Abstände bis hin zu etlichen zehntausend AU) sind noch die Objekte der Oort'schen Wolke (5 bis 40 Erdmassen) als weiteres großes Wasserreservoir vorhanden. Die zur Erzeugung des Diagramm genutzte EXCEL-Datei (samt allen in Tab. 1 aufgeführten Daten und den damit erzeugten Grafiken) kann als [Zusatzmaterial](#) heruntergeladen werden.

### Radius-Dichte-Diagramm

Planetenforscher nutzen das Radius-Dichte-Diagramm, um Planeten hinsichtlich ihrer Zusammensetzung zu vergleichen und zu **klassifizieren**. Objekte ähnlicher Eigenschaften häufen sich im Diagramm. (Dieses Diagramm ist für die Exoplanetenforschung sehr bedeutsam.)

Aus dem Vergleich der mittleren Dichte von etwa gleich großen Himmelskörpern lässt sich auf die Zusammensetzung schließen. So z. B. wird klar, dass der Planet Merkur (mittlere Dichte  $5,4 \text{ g/cm}^3$ ) deutlich mehr schwere Elemente enthalten muss (ein Gesteinsplanet ist) als die etwa gleich großen Monde Ganymed und Titan (ca.  $1,9 \text{ g/cm}^3$ ), die als Eismonde klassifiziert werden.

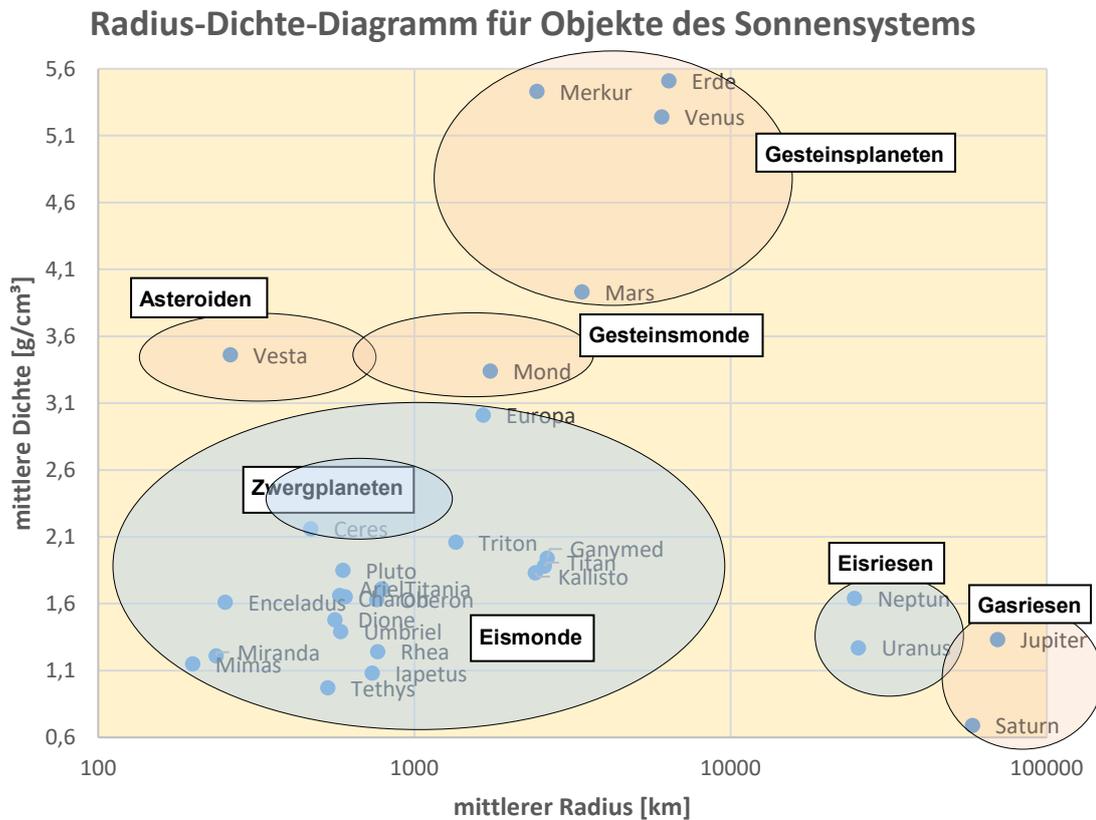


Abbildung 7: Radius-Dichte-Diagramm für die in Tab. 1 aufgeführten Objekte des Sonnensystems (außer Saturnring). Die unterschiedlichen Klassen der solaren Himmelskörper gruppieren sich entsprechend ihrer Zusammensetzung und ihres inneren Aufbaus.

Die zur Erzeugung des Diagramm genutzte EXCEL-Datei (samt allen in Tab. 1 aufgeführten Daten und den damit erzeugten Grafiken) kann als [Zusatzmaterial](#) heruntergeladen werden.

Wenn sich Himmelskörper zu Kugeln formen, kann im aufgeschmolzenen Zustand eine Differenzierung der Stoffe erfolgen und es bildet sich eine Schalenstruktur heraus. Im Kern sammeln sich die schweren Elemente (z. B. bei Gesteinsplaneten Eisen + Nickel) und in den Mantelschalen bleiben die leichteren Elemente (z. B. bei Gesteinsplaneten Silikate) übrig. Nimmt man für einen Himmelskörper ein einfaches Kern-Mantel-Modell an, dann erhält man dessen **mittlere Dichte**  $\bar{\rho}$  aus den Dichten des Kernmaterials ( $\rho_{\text{Kern}}$ ) und des Mantelmaterials ( $\rho_{\text{Mantel}}$ ) sowie dem Kernradius ( $R_{\text{Kern}}$ ) und dem Radius des Himmelskörpers ( $R$ ) wie folgt:

$$\bar{\rho} = \frac{\frac{4}{3}\pi \cdot R_{\text{Kern}}^3 \cdot \rho_{\text{Kern}} + \frac{4}{3}\pi \cdot (R^3 - R_{\text{Kern}}^3) \cdot \rho_{\text{Mantel}}}{\frac{4}{3}\pi \cdot R^3} = \frac{R_{\text{Kern}}^3}{R^3} \cdot (\rho_{\text{Kern}} - \rho_{\text{Mantel}}) + \rho_{\text{Mantel}}$$

Daraus kann der Anteil des Kernradius ermittelt werden:

$$\frac{R_{\text{Kern}}}{R} = \sqrt[3]{\frac{\bar{\rho} - \rho_{\text{Mantel}}}{\rho_{\text{Kern}} - \rho_{\text{Mantel}}}}$$

Für den Mond erhält man mit den Ad Hoc Annahmen  $\rho_{\text{Kern}} = 9 \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho_{\text{Mantel}} = 3,3 \text{ g/cm}^3$  und  $\bar{\rho} = 3,34 \text{ g/cm}^3$  ein Verhältnis  $\frac{R_{\text{Kern}}}{R}$  von 0,19 und für den ähnlich großen **Merkur** ( $\bar{\rho} = 5,43$ ) ein Verhältnis  $\frac{R_{\text{Kern}}}{R}$  von 0,72. Diese Werte kommen der Realität recht nahe.

[Zurück zum Anfang](#)

Nutzen wir die Dichtewerte auch für die deutlich größere Erde ( $\bar{\rho} = 5,51 \text{ g/cm}^3$ ), so kommt für das Verhältnis  $\frac{R_{\text{Kern}}}{R}$  ein Wert von 0,73 heraus. Messungen haben aber einen Wert von 0,54 ergeben. Der Unterschied begründet sich dadurch, dass bei gleichem Kernmaterial (Eisen-Nickel) dieses in der Erde (wie auch der Venus) viel stärker verdichtet wird.

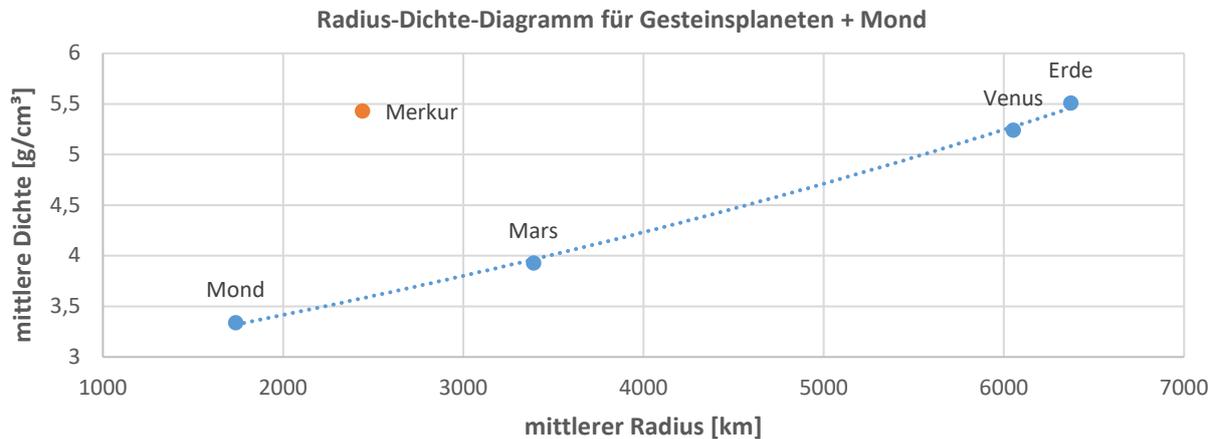


Abbildung 8: Bei ähnlicher stofflicher Zusammensetzung sieht man einen Zusammenhang zwischen den mittleren Dichten und den mittleren Radien (hier grob proportional). Die Dichteänderung bei Radiusänderung muss also bei Annahme von gleichen Kern- und Mantelmaterialien (für Gesteinsplaneten im Kern Eisen-Nickel und im Mantel Silikatgestein) damit zusammenhängen, dass die Kerne der Himmelskörper verschiedene große Anteile an der Gesamtgröße haben. Während es beim Mond (theoretisch und auch in Realität) noch 0,19 sind, erhält man für die Erde theoretisch ein Verhältnis von 0,73. Messungen zeigen aber, dass der Wert bei 0,54 liegt. Um trotzdem eine mittlere Dichte von 5,51 g/cm³ zu erreichen, müsste das Material des jetzt kleineren Kerns (mit den hier angenommenen einfachen Modell) statt der Dichte von 9 g/cm³ nun eine Dichte von ca. 17 g/cm³ aufweisen. (Bessere Modelle führen zu Dichten von 12-13 g/cm³). Die Überlegungen zum Aufbau der Himmelskörper müssen entsprechend die Kompression in ihren Zentren mit einbeziehen.

Merkur muss wegen seiner Abweichung von der Kurve etwa gleicher Zusammensetzung eine andere Zusammensetzung mit einem deutlich höheren Eisen-Nickel-Gehalt besitzen. Sein Kern macht (theoretisch) schon das 0,72-fache des Radius aus.

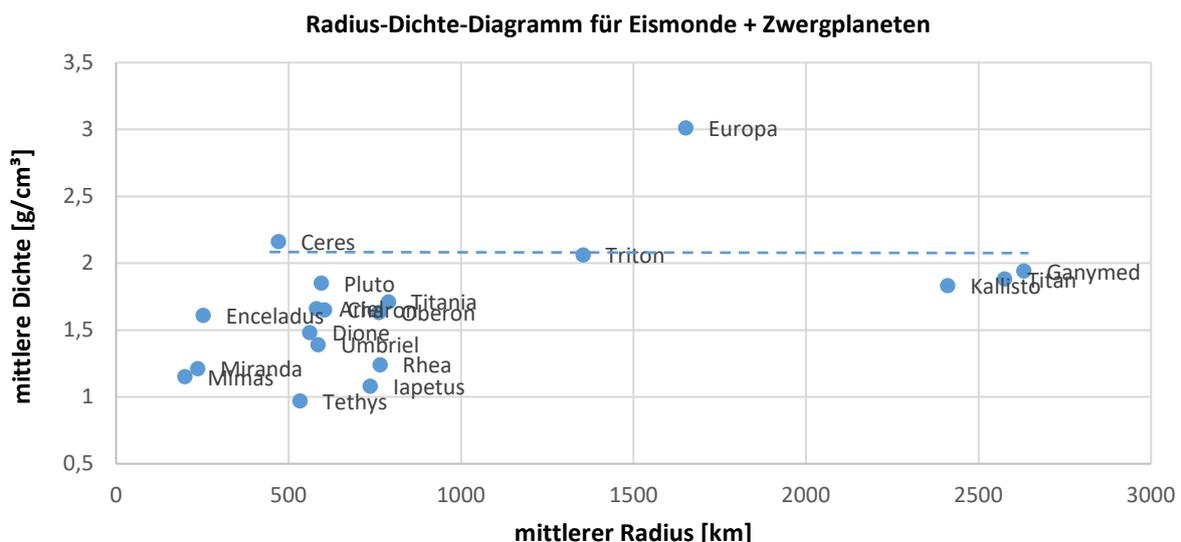


Abbildung 9: Eismonde und auch Zwergplaneten besitzen gegenüber den Gesteinsplaneten eine andere stoffliche Zusammensetzung. Hier spricht man meist von Gestein im Kern und (vor allem) Wassereis im Mantel. Vergleicht man wieder Objekte etwa gleicher mittlerer Dichte, kann man wieder über deren Kerne spekulieren, die im Vergleich zur Größe des Himmelskörpers für kleinere Objekte größer ausfallen (Ceres im Vergleich zu Triton, und Triton im Vergleich zu Ganymed).



[Zurück zum Anfang](#)

## Zusatzmaterialien

- EXCEL-Datei „Mappe – grafische Auswertung.xlsx“

## Quellen

- [1] Tim Lichtenfeld: „Entstehung des Sonnensystems in zwei Schritten“. In: Sterne und Weltraum, September 2021, S. 18-21

## Arbeitsblatt - Wo ist das Wasser im Sonnensystem?

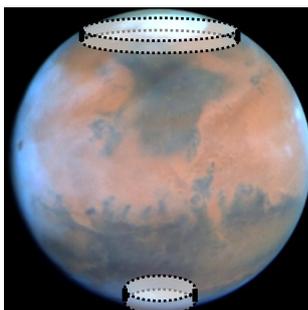
### 1.) Datenrecherche

Recherchiere die fehlenden Angaben zu den vier solaren Himmelskörpern Mars, Europa, Triton und Mimas und ergänze die Tabelle (die letzte Spalte bleibt noch frei).

Himmelskörper im Sonnensystem		Mittlerer Radius [km]	Mittlere Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Mittlerer Abstand zur Sonne [AE]	Angaben zum Wassergehalt (alle Aggregatzustände)	Wassermenge in Vielfachen der Erd-Wassermasse
Name	Klassifizierung					
Jupiter	Planet, Gasriese	69911	1,33	5,2	geschätzt mind. 1 Erdmasse im Gestein-Eis-Kern	4000
Saturn	Planet, Gasriese	58232	0,69	9,6	geschätzt mind. 1 Erdmasse im Gestein-Eis-Kern	4000
Saturnring	Ringstruktur			9,6		25
Uranus	Planet, Eisriese	25362	1,27	19,2	geschätzt mind. 1 Erdmasse in Wasser-Ammoniak-Ozean im Mantel	4000
Neptun	Planet, Eisriese	24622	1,64	30,0	geschätzt mind. 1 Erdmasse in Wasser-Ammoniak-Ozean im Mantel	4000
Erde	Planet, Gesteinsplanet	6371	5,51	1,0	$1,4 \cdot 10^9 \text{ km}^3$	1
Venus	Planet, Gesteinsplanet	6052	5,24	0,7	nur noch Spuren	0
Mars						
Ganymed	Mond, Eismond	2631	1,94	5,2	800 km dicker Mantel $\rightarrow 5 \cdot 10^{10} \text{ km}^3$	36
Titan	Mond, Eismond	2575	1,88	9,6	ca. 50 % $\rightarrow 3,6 \cdot 10^{10} \text{ km}^3$	26
Merkur	Planet, Gesteinsplanet	2440	5,43	0,4	Spuren in polnahen Kratern	0
Kallisto	Mond, Eismond	2410	1,83	5,2	210 km dicker Mantel $\rightarrow 1,4 \cdot 10^{10} \text{ km}^3$	10
Mond	Mond, Gesteinsmond	1737	3,34	1,0	Spuren in polnahen Kratern	0
Europa						
Triton						
Titania	Mond, Eismond	789	1,71	19,2	ca. 270 km Eismantel $\rightarrow 3,5 \cdot 10^8 \text{ km}^3$	0,25
Rhea	Mond, Eismond	765	1,24	9,6	ca. 75 % $\rightarrow 1,4 \cdot 10^9 \text{ km}^3$	1,0
Oberon	Mond, Eismond	761	1,63	19,2	ca. 50 % $\rightarrow 9,2 \cdot 10^8 \text{ km}^3$	0,7
Iapetus	Mond, Eismond	736	1,08	9,6	fast komplett $\rightarrow 1,7 \cdot 10^9 \text{ km}^3$	1,2
Charon	Mond, Eismond	604	1,65	39,5	ca. 45 % $\rightarrow 4,2 \cdot 10^8 \text{ km}^3$	0,3
Pluto	Zwergplanet	594	1,85	39,5	ca. 30 % $\rightarrow 2,6 \cdot 10^8 \text{ km}^3$	0,2
Umbriel	Mond, Eismond	585	1,39	19,2	ca. 60 % $\rightarrow 5 \cdot 10^8 \text{ km}^3$	0,36
Ariel	Mond, Eismond	580	1,66	19,2	ca. 50 % $\rightarrow 4,1 \cdot 10^8 \text{ km}^3$	0,29
Dione	Mond, Eismond	561	1,48	9,6	160 km Eiskruste $\rightarrow 1,1 \cdot 10^8 \text{ km}^3$	0,08
Tethys	Mond, Eismond	533	0,97	9,6	fast komplett $\rightarrow 6,3 \cdot 10^8 \text{ km}^3$	0,45
Ceres	Zwergplanet	470	2,16	2,8	ca. 20 % $\rightarrow 8,7 \cdot 10^7 \text{ km}^3$	0,06
Vesta	Asteroid	262	3,46	2,4	-	0
Enceladus	Mond, Eismond	252	1,61	9,6	50 km Kruste (Eis+Ozean) $\rightarrow 7,8 \cdot 10^6 \text{ km}^3$	0,006
Miranda	Mond, Eismond	236	1,21	19,2	ca. 80 % $\rightarrow 4,4 \cdot 10^7 \text{ km}^3$	0,03
Mimas						

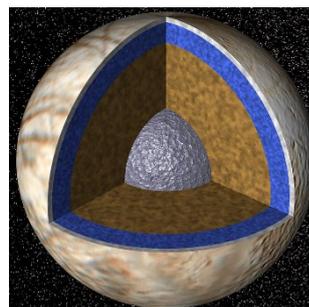
Ausgesuchte Daten zu Himmelskörpern im Sonnensystem. Die Auflistung folgt der Größe der Himmelskörper. Das wesentliche Ziel besteht darin, den insgesamt in diesen Himmelskörpern enthaltenen Wasseranteil (alle Aggregatzustände) in Einheiten der Menge des gesamten Wassers auf der Erde ( $1,4 \cdot 10^9 \text{ km}^3$ ) anzugeben.

Die Daten stammen in der Regel von den deutsch- und englischsprachigen Wikipedia-Seiten. Die Wasseranteile für die großen Planeten wurden grob geschätzt. Die Ergebnisse der Wassermengen wurden stark gerundet.



Zur Volumenberechnung der Polkappen des Mars, können diese durch Kreiszylinder angenähert werden.

©: Von NASA, Philip James (University of Toledo), Steven Lee (University of Colorado) - <http://imgsrc.hubblesite.org/hu/db/images/hs-1995-16-b-full.jpg.jpg>, Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/wiki/index.php?curid=38374863>.

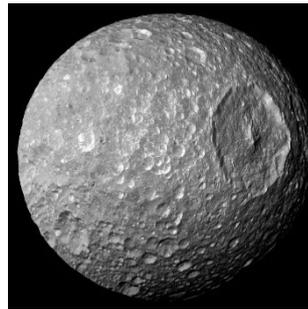


Modellidee zum inneren Aufbau von Europa. Im Kern vermutet man flüssiges Eisen, dass von einem mächtigen Mantel aus Silikatgesteinen umgeben ist. Die äußere Schicht besteht aus Wasser und gliedert sich in einen „Ozean“ und eine Eishülle.

©: unknown author of the NASA derivative work: Magenta Green - Diese Datei wurde von diesem Werk abgeleitet: PIA01130 Interior of Europa.jpg., Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/wiki/index.php?curid=35754618>.



Von Triton nimmt man an, dass er zu 25 % aus Wasser besteht. Die Aufnahme (etwas mehr als „Halbtriton“) entstand schon 1989 durch die Raumsonde Voyager 2.  
©: NASA / Jet Propulsion Lab / U.S. Geological Survey - <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA00317>, Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=96172>.



Auch der Saturnmond Mimas besteht nahezu vollständig aus Wasser. 10 Eismonde wie Mimas würden ausreichen, um den Atlantischen Ozean zu füllen. ©: NASA / JPL-Caltech / Space Science Institute - Diese Mediendatei wurde vom Jet Propulsion Lab der US-amerikanischen National Aeronautics and Space Administration (NASA) unter der Datei-ID PIA12570 kategorisiert., Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10371541>.

## 2.) Berechnung der Wassermenge in Erd-Wassermassen

Berechne nun aus den recherchierten Daten die fehlenden Angaben zu den gesamten in den Objekten enthaltenen Wassermengen (alle Aggregatzustände) in Erd-Wassermassen (eine Erd-Wassermasse entspricht einem Volumen von  $1,4 \cdot 10^9 \text{ km}^3$ ) und trage auch diese in die Tabelle ein. Nähere dazu die Wassergebiete der Himmelskörper durch einfache geometrische Körper an (Marspolkappen  $\rightarrow$  Kreiszyylinder, Eiskruste und darunter liegender Ozean von Europa  $\rightarrow$  Kugelschale, Mimas und Triton  $\rightarrow$  Kugel).

## 3.) Grafische Auswertung mit Hilfe des Programms EXCEL

Stelle nun die Ergebnisse in drei verschiedenen Diagrammen grafisch dar und versuche eine Interpretation. Beschrifte die Datenpunkte in allen Diagrammen mit den Namen der Himmelskörper.

- a.) Veranschauliche die **Wasserverteilung im Sonnensystem**, indem du die ermittelten Wassermengen über dem Abstand der Objekte zur Sonne aufträgst. Nutze dazu für die y-Achse (die Wassermenge) eine logarithmische Achsteilung.  
Was stellst du fest? Markiere eine Grenze zwischen dem wasserreichen und dem wasserarmen Gebiet und kennzeichne diese Gebiete.
- b.) Erstelle jetzt ein **Abstand-Dichte-Diagramm**, welches Rückschlüsse über die abstandsabhängige Zusammensetzung der Himmelskörper des Sonnensystems erlaubt.  
Was stellst du fest? Markiere den Trend im Werteverlauf der mittleren Dichten.
- c.) Trage nun die mittlere Dichte der Himmelskörper über deren mittlerem Radius ab. Für eine bessere Trennung der Werte empfiehlt sich die logarithmische Teilung der x-Achse (mittlere Radien).  
Diese Art von Diagramm (das **Radius-Dichte-Diagramm**) wird von Forschern genutzt, um Aussagen über den Aufbau der Himmelskörper abzuleiten. Im Diagramm werden verschiedene Häufungen von Objekten ersichtlich, was Rückschlüsse zur Klassifikation erlaubt.  
Markiere und benenne im Diagramm die Gebiete, in denen die in der Tabelle genannten Klassen von Himmelskörpern des Sonnensystems sich häufen.

## Zusatzaufgabe

Der Mond soll als Kugel modelliert werden, die aus Kern und Mantel besteht. Das Kernmaterial habe eine Dichte von  $9 \text{ g/cm}^3$ . Die Dichte des Mantelmaterials betrage  $3,3 \text{ g/cm}^3$ .

Berechne aus der mittleren Dichte des Mondes das Verhältnis von Kernradius zum Gesamtradius (Außenradius des Mantels) für den Mond.