

Vom Ursprung unserer Ozeane

In Bezug zu „Alles klar zur Landung“ in der Zeitschrift »Sterne und Weltraum« 9/2016, Sparte „Welt der Wissenschaft“, ab S. 26, Zielgruppe: Oberstufe, WIS-ID: 1377456

Harald Krüger (Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung Göttingen)
Olaf Fischer

Die Frage nach dem Ursprung des Lebens bewegt die Menschen seit jeher. Ihr Reiz kann dazu motivieren, sich weiter mit den Naturwissenschaften zu beschäftigen und auch ihr mathematisches Handwerkszeug anzunehmen.

Im nachfolgenden kurzen WIS-Beitrag geht es um das Problem, wie die Erde zu ihren Ozeanen kam, in denen ja bekanntlich das Leben seinen Anfang nahm. Dazu wird ein **Arbeitsblatt** angeboten, welches den Schüler in den Gedankengang eines Planetologen mitnimmt, der herausbekommen möchte, ob Kometenkerne als „Wasserträger“ zur Ozeanfüllung ausreichen würden.

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Astronomie	Kleinkörper, Planeten	Kometenkerne, Impakt, Erdgeschichte, Ozeanwasser der Erde, Mondoberfläche
Physik	Grundlagen	Rate und Fluss
Fächer-Verknüpfung	Astro-Ma	Kugel (Oberfläche, Volumen), logarithmische Achsteilung
Lehre allgemein	Kompetenzen (Erkenntnis), Unterrichtsmittel	Diagramme lesen, in Diagramm eintragen, Rechnen, Arbeitsblatt



Abbildung 1: Künstlerische Darstellung eines Kometensturms im inneren Bereich des angenommenen Planetensystems beim Stern Eta Corvi. Beobachtungsergebnisse des Infrarotsatelliten Spitzer aus dem Jahre 2011 lieferten Hinweise auf dieses Geschehen, welches auch im frühen Sonnensystem stattfand. Im Rahmen des „Großen Bombardements“ durch Kometenkerne gelangte vermutlich ein Großteil des Wassers der heutigen Ozeane auf die Erde.
© NASA/JPL-Caltech (https://www.nasa.gov/sites/default/files/images/597250main_pia14739-full_full.jpg)

Arbeitsblatt: Der Ursprung unserer Ozeane

Man hört oft die Ansicht, dass die Ozeane der Erde sich einst aus dem Wasser einstürzender Kometenkerne füllten. Was ist dran an dieser Annahme? Wir wollen dies im Folgenden prüfen, indem wir die Wassermenge der Ozeane und eine realistische Einfallrate der Kometenkerne abschätzen und die Ergebnisse miteinander in Beziehung setzen.



- 1.) Berechne abschätzend das Volumen der irdischen Ozeane, indem du annimmst, dass 70 % der Erdoberfläche durch diese bedeckt werden und ihre Tiefe im Mittel 2 km beträgt.
- 2.) Schätze nun ab, wie viele Kometenkerne pro Jahr auf der Erde einschlagen müssen, um die Ozeane zu füllen. Nimm dazu vereinfachend an, dass die Kometenkerne kugelförmig sind und im Mittel einen Radius von 1 km besitzen, vollständig aus Wassereis bestehen und seit der Entstehung des Sonnensystems vor 4,56 Mrd. Jahren mit einer konstanten Rate einschlagen. Vergleiche diese angenommene Impaktrate (abgeleitet vom lateinischen Wort ‚impactus‘: einschlagen) mit der heutzutage beobachteten Impaktrate. Letztere kann man aus der Zeit zwischen zwei Einschlägen (dem Impaktintervall), d. h. der Zeit, innerhalb derer ein Einschlag stattfindet (siehe Diagramm in Abb. 2), ermitteln.

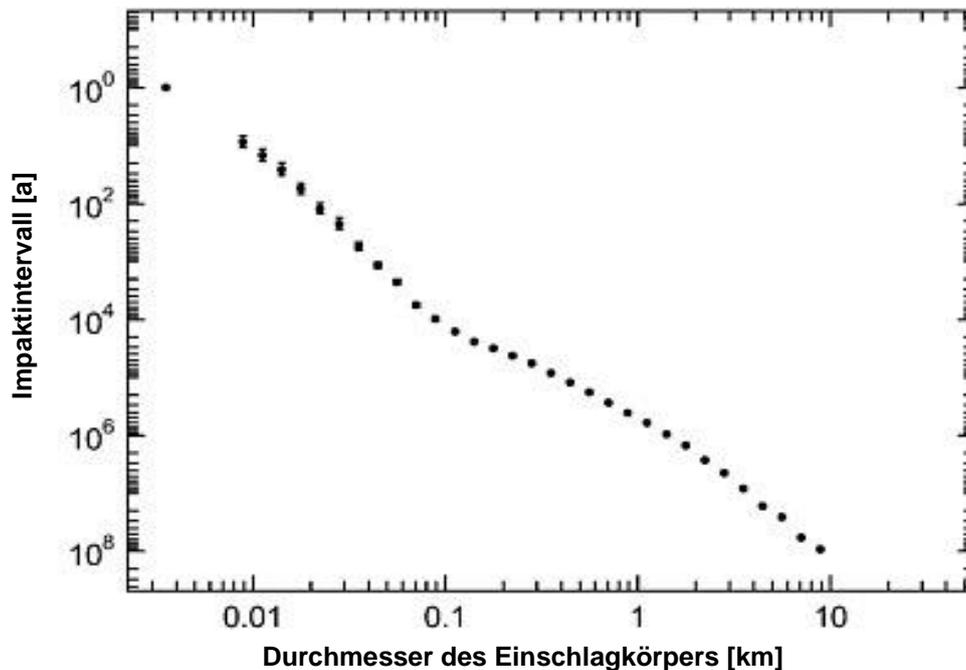


Abbildung 2: Impaktrate auf die Erde von Kleinkörpern des Sonnensystems aus ihrem Nahbereich in Abhängigkeit von deren Durchmesser. Die Impaktrate ergibt sich aus dem reziproken Wert der Impaktintervall. © Alan W. Harris, Space Science Institute.

- 3.) Bestimme die Impaktrate nun unter der Annahme, dass die Füllung der Ozeane innerhalb der ersten 50 Mio. Jahre nach der Bildung der Erde (vor 4,56 Mrd. Jahren) von statten ging.
- 4.) Bestimme aus der zuvor ermittelten Impaktrate (Anzahl der Einschläge auf einen Himmelskörper pro Zeiteinheit) den Impaktmassenfluss (die Masse, die pro Zeiteinheit auf die Oberfläche eines Himmelskörpers fällt) von Kometenkernen auf die Erde.

- 5.) Könnte das gesamte Ozeanwasser von Kometenkerneinschlägen stammen?

Um diese Frage zu beantworten, schauen die Planetologen auch auf den Mond, weil dieser durch seine Nähe zur Erde einem etwa gleich starken Bombardement durch Kometenkerne ausgesetzt war. Im Gegensatz zur Erde sind die Einschlagspuren auf dem Mond zum größten Teil erhalten geblieben und können nun zur Ermittlung des Impaktmassenflusses herangezogen werden.

So stellte man nach der Altersbestimmung von Gesteinsproben (mitgebracht durch Mondlandemissionen) fest, dass es im Zeitraum vor etwa 3,7 bis 4 Mrd. Jahren zu einer Häufung gigantischer Einschläge kam, in deren Folge die meisten der Maria entstanden. So sind u. a. die Maria Nectaris, Imbrium und Orientale entstanden. Nach Erfassung der Einschlagspuren des sogenannten „Großen Bombardements“ („Late Heavy Bombardement“) konnte der Impaktmassenfluss in dieser Zeitspanne ermittelt werden (siehe Abb. 4).

Um die oben gestellte Frage zu beantworten, musst du nun den Impaktmassenfluss auf den Mond mit demjenigen, der zuvor in Aufgabe 3 für die Erde ermittelt wurde, vergleichen. Dabei ist zu beachten, dass der Impaktmassenfluss umso größer ausfallen kann, je größer die (auffangende) Himmelskörperoberfläche ist. Rechne also zunächst den zuvor ermittelten Impaktmassenfluss für die Erde in denjenigen für den Mond um, zeichne diesen in das Diagramm in Abb. 4 mit ein und vergleiche erst dann.

Was ist hinsichtlich der Kurvenform beim Vergleich noch zu beachten?

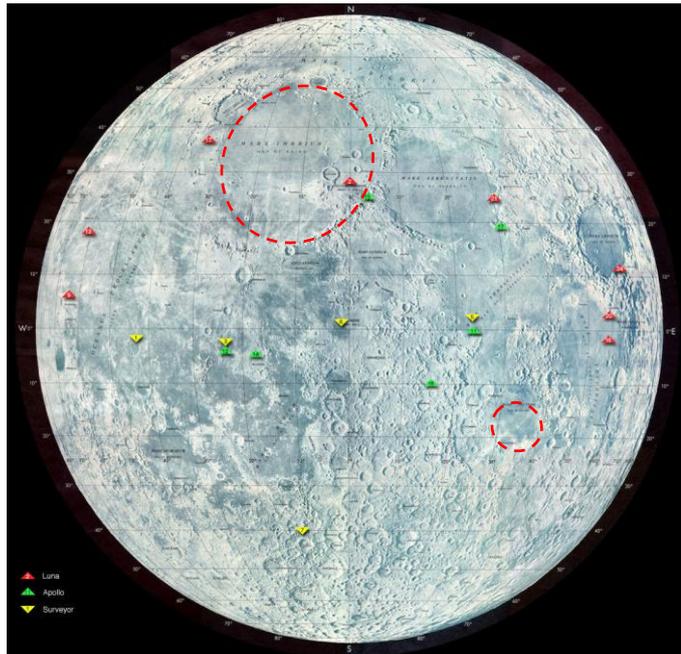


Abbildung 3: Die Maria Nectaris und Imbrium (rot grob umrandet) wurden vor 3,9 und 3,85 Mrd. Jahren durch die Einschläge protoplanetarer Kleinkörper (vor allem Kometenkerne) erzeugt. © http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/lunar/moon_landing_map.jpg

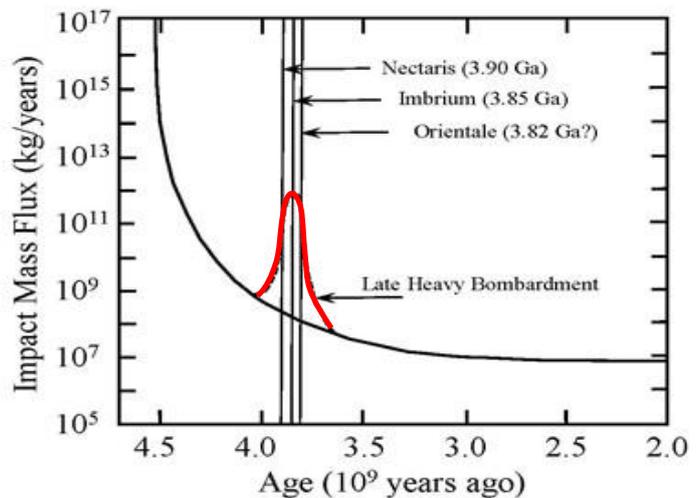


Abbildung 4: Impaktmassenfluss auf den Mond, bedingt durch Einschläge von Kleinkörpern seit der Bildung des Sonnensystems vor 4,56 Mrd. Jahren. Entscheidend war die Zeit des Late Heavy Bombardement (rot hervorgehoben).

© Eiichi Tajika, in: Viva Origino 36 (2008), S. 56, Abb. 2
(<http://www.origin-life.gr.jp/3603/3603055/3603055.pdf>)

- 6.) Welche Quellen für das Ozeanwasser auf der Erde existieren noch?

Lösungen zum Arbeitsblatt: Der Ursprung unserer Ozeane

Zu 1.)

Wasservolumen aller Ozeane:

$$V_{\text{Ozeane}} = A_{\text{Ozeane}} \cdot 0,7 \cdot 2 \text{ km} = R_{\text{Erde}}^2 \cdot 4\pi \cdot 0,7 \cdot 2 \text{ km} = (6371 \text{ km})^2 \cdot 4\pi \cdot 0,7 \cdot 2 \text{ km} \approx 714 \cdot 10^6 \text{ km}^3.$$

Zu 2.)

Volumen eines Kometenkerns mittlerer Größe:

$$V_{\text{Kometenkern}} = R_{\text{Kometenkern}}^3 \cdot \frac{4}{3} \pi = (1 \text{ km})^3 \cdot \frac{4}{3} \pi \approx 4,2 \text{ km}^3.$$

Entsprechend braucht man $N = 714 \cdot 10^6 \text{ km}^3 / 4,2 \text{ km}^3 = 170 \cdot 10^6$ Kometeneinschläge.

Innerhalb von 4,56 Mrd. Jahren müssten bei einer konstanten Einschlagrate pro Jahr etwa 0,04 Kometenkerne dieser mittleren Größe einschlagen ($170 \cdot 10^6 / 4,56 \cdot 10^9 \text{ a}$).

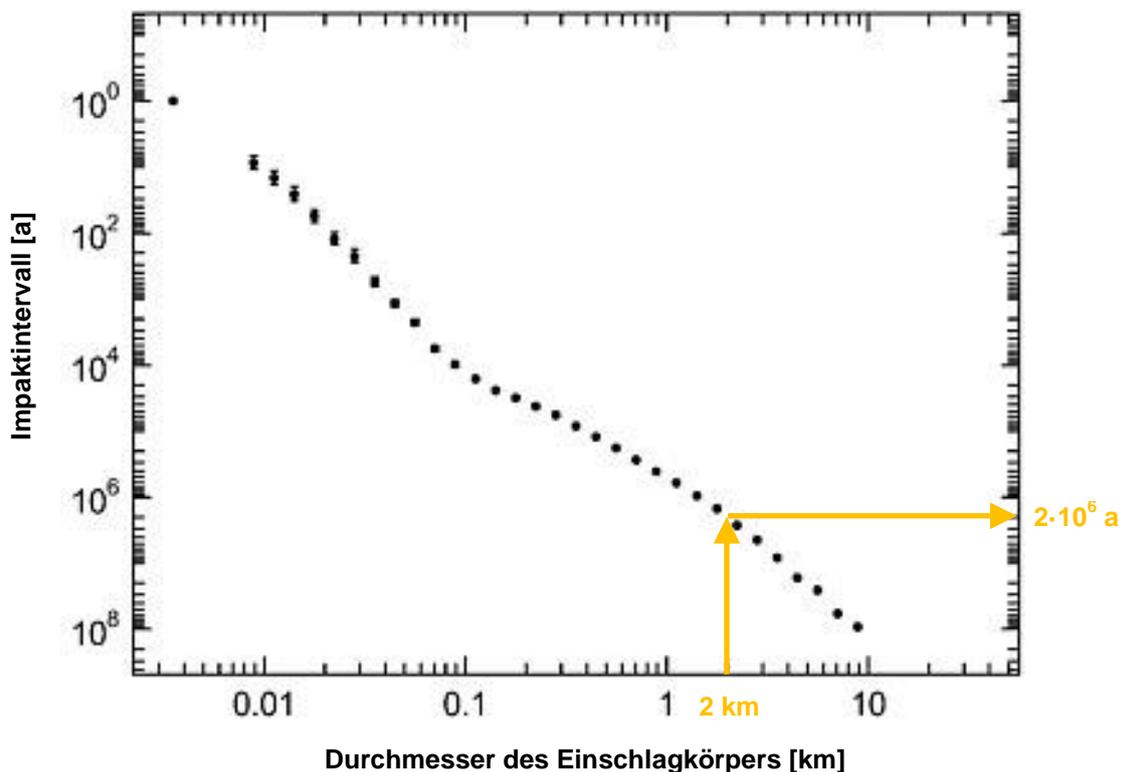
Die nachgewiesene Einschlagrate von Kometenkernen mit einem Radius von 1 km, d. h. einem Durchmesser von 2 km, beträgt laut Diagramm: ein Einschlag alle $2 \cdot 10^6$ Jahre, also 0,000002 Einschläge pro Jahr (0,000002/a).

Diese ist damit um den Faktor 20000 ($0,04/a / 0,000002/a$) kleiner.

Zu 3.)

Erhöhte Impaktrate, bei Füllung der Ozeane innerhalb von nur 50 Mio. Jahren:

$$170 \cdot 10^6 / 50 \cdot 10^6 \text{ a} = 3,4/a.$$



Zu 4.)

Berechnung des Impaktmassenflusses auf die Erde, der innerhalb von 50 Mio. Jahren zur Füllung der Ozeane führt:

3,4 Kometenkerne mit einem mittleren Radius von 1 km erreichen pro Jahr die Erdoberfläche.

Masse eines dieser Kometenkerne:

$$m_{\text{Kometenkerne}} = V_{\text{Kometenkerne}} \cdot \rho = 4,2 \cdot 10^9 \text{ m}^3 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 = 4,2 \cdot 10^{12} \text{ kg}$$

Pro Jahr müssten also $3,4 \cdot 4,2 \cdot 10^{12} \text{ kg} \approx 14,3 \cdot 10^{12} \text{ kg}$ Kometenmaterial (Wasser) auf die Erde gelangen (fließen).

Zu 5.)

Umrechnung des Impaktmassenflusses auf die Erde in denjenigen auf den Mond (Annahme: die Oberflächen werden gleichverteilt getroffen): Verhältnis Erdoberfläche zu Mondoberfläche:

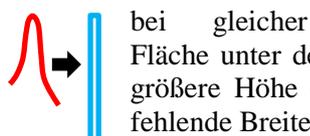
$$\frac{O_{\text{Mond}}}{O_{\text{Erde}}} = \frac{R_{\text{Mond}}^2}{R_{\text{Erde}}^2} = \left(\frac{1737 \text{ km}}{6371 \text{ km}} \right)^2 \approx 0,074$$

Der angepasste Impaktmassenfluss auf den Mond beträgt also

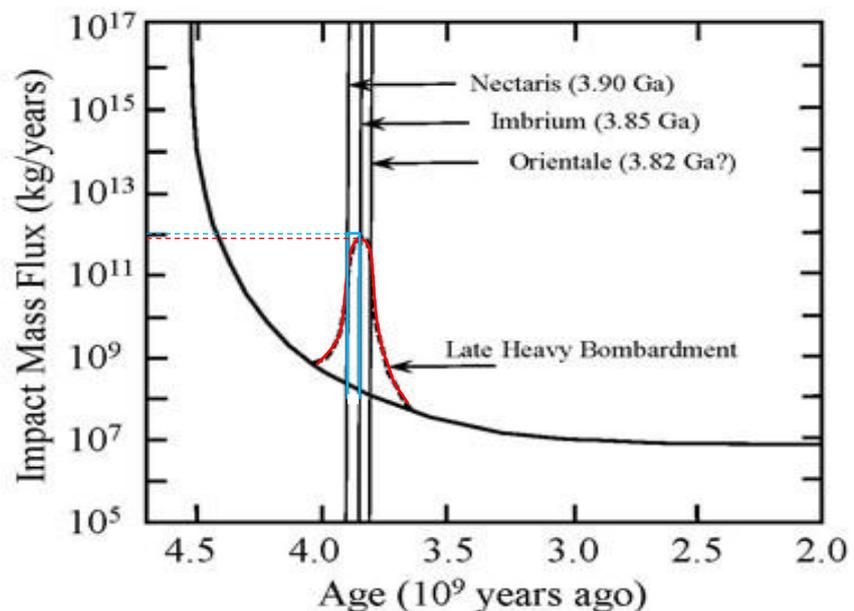
$$0,074 \cdot 14,3 \cdot 10^{12} \text{ kg} \approx 1,06 \cdot 10^{12} \text{ kg} \quad (\text{blaue Rechteckkurve im Diagramm})$$

Der Impaktmassenfluss durch Kometenkerne beim Großen Bombardement genügt also, um den Ursprung des Ozeanwassers auf der Erde zu erklären.

Für den genauen Vergleich wäre es notwendig, die Flächen unter den Kurven zu betrachten. Für die Erde wurde ein konstanter Massenfluss innerhalb von 50 Mio. Jahren angenommen. Für den Mond muss die glockenförmige Kurve in eine Rechteckkurve mit der Breite 50 Mio a



bei gleicher Fläche unter der Kurve umgeformt werden. Wir können davon ausgehen, dass die etwas größere Höhe der Rechteckkurve wegen der logarithmischen Achsteilung ausreicht, die fehlende Breite der Glockenkurve wettzumachen.



Zu 6.)

Asteroiden stellen eine weitere mögliche Quelle für das Ozeanwasser (Teile davon) dar.

Auf einigen Asteroiden des Hauptgürtels (zwischen Mars und Jupiter) wurde Wasser nachgewiesen.

Auch Vesta und Ceres (ein Zwergplanet) gehören vermutlich dazu.