

Kosmischer Regen

In Bezug auf den Beitrag „Die archaische Erdatmosphäre war sehr reich an CO₂“, Brennpunkt 1952 in der Zeitschrift „Sterne und Weltraum“ 7/2020 und in Bezug zu „Sternstaub auf dem Dach“, Sterne und Weltraum 6/2020, S. 42, WIS-ID: 1421039, Zielgruppe: Mittelstufe bis Oberstufe

Olaf Fischer

Im [Brennpunkt-Beitrag 152 in SuW 7/2020](#) wird davon berichtet, dass Planetologen Mikrometeorite dazu nutzen, um mehr über die Urzusammensetzung der Erdatmosphäre zu erfahren. Die von ihnen untersuchten Mikrosphärulen gelangten vor 2,7 Mrd. Jahren auf die Erde und wurden hier in sich bildenden Kalksteinablagerungen konserviert. Auch wenn sich der Zustrom von Mikrometeoriten auf die Erde seit jener Zeit verringert hat, so fallen trotzdem noch jährlich einige hundert Milliarden dieser Objekte auf die Erde. Und das Phantastische daran ist: jedermann kann sie finden, auch mitten in der Stadt.

Im WIS-Beitrag geht es vor allem um verschiedene Fragen rund um Mikrosphärulen: [Was genau versteht man darunter?](#) [Woraus bestehen sie?](#) [Woher kommen sie?](#) [Wie viele davon regnen täglich auf uns herab?](#) [Warum sind sie ungefährlich?](#) [Und wie findet man sie?](#) Die Antworten werden durch Aufgaben und einfache Experimentierideen begleitet. Schließlich wird kurz von einem [Citizen-Science-Projekt](#) berichtet, an dem sich auch Schüler beteiligten. Am Ende wird der Bogen zurück zum SuW-Beitrag geschlagen und die Frage geklärt, [woher die Planetologen die Altersangabe von 2,7 Mrd. Jahren haben.](#)

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Astronomie	Kleinkörper	Meteoroid , Meteorit , Mikrometeorit , Mikrosphärule , Meteoritenklassifikation , Chondrit , Achondrit , differenzierte Meteorite
Physik	Mechanik, Thermodynamik	Kinetische Energie , Luftwiderstand , Schmelzen , Wärmeleitung
Fächer- verknüpfung	Astro-Ma, Astro-Geo, Astro-Ch, Astro-Technik, Astro-Geschichte, Astro-Informatik	Ma: Kugelvolumen , Kugeloberfläche , Kugelquerschnitt ; Geo: Altersbestimmung von Gestein , Elementhäufigkeiten in Erde ; Ch: Elemente in Meteoroiden und im Erdkörper ; Technik: Turmgießverfahren ; Geschichte: Schrotttürme (Hageltürme) ; Informatik: Computergrafik
Lehre allgemein	Kompetenzen (Wissen und Erkenntnisgewinn), Lehrformen	Kennenlernen neuer Begriffe, vertiefen wesentlicher Begriffe, recherchieren nach Information , führen abschätzende Rechnungen durch, nutzen Analogie, führen Experimente durch, Schülerprojekt , Citizen-Science-Projekt , Freihandversuch zum Luftwiderstand , Versuch zur Kugelbildung im freien Fall , Freihandversuch zur Stofftrennung

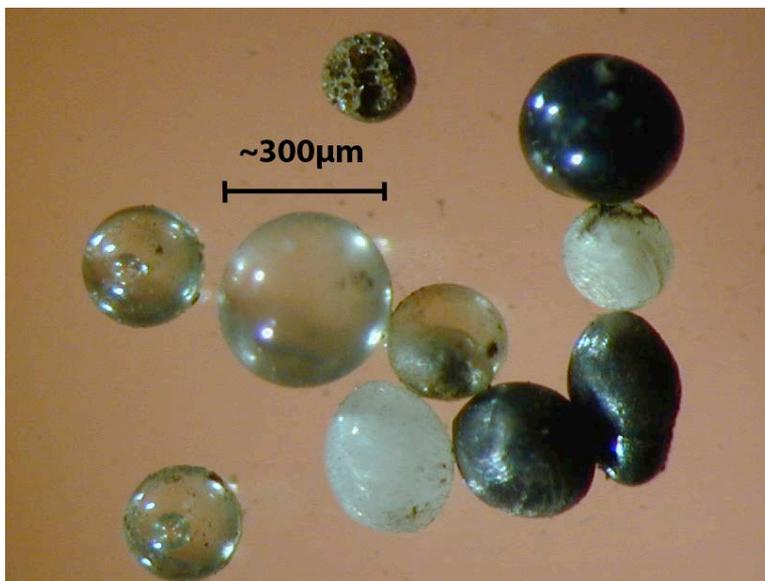


Abbildung 1: Mikrosphärulen unter dem Mikroskop. Mikrosphärulen bilden eine Untergruppe der Mikrometeorite. Sie erscheinen nahezu kugelförmig (sphärisch), weil sie beim Durchflug durch die Erdatmosphäre erst aufschmolzen und vor dem Niedergang als „Tropfen“ wieder kristallisierten. ©: By Shaw Street - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=23722854>, https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6e/Light_microscope_images_of_stony_cosmic_spherules.png

1 Was versteht man unter kosmischen Mikrosphärlen?

Betrachtet man die Körper im interplanetaren Raum der Größe nach absteigend, gelangt man nach den Planeten und ihren Monden, den Asteroiden und Kometenkernen zu den Meteoroiden mit Größen von $30\ \mu\text{m}$ bis zu $1\ \text{m}$ (IAU 2017). Am unteren Ende dieser Objektgruppe stehen die **Mikrometeoroiden** ($30\ \mu\text{m}$ bis einige mm). Sind die Objekte noch kleiner, so hat man es mit dem interplanetaren Staub zu tun. Erreicht ein Meteoroid nach Durchqueren der Erdatmosphäre den Erdboden, so bezeichnet man den verbliebenen Körper als Meteorit oder eben **Mikrometeorit**, falls er klein genug ist.

70 – 90 % der Mikrometeoroiden $> 0,1\ \text{mm}$ schmelzen beim Durchgang durch die Erdatmosphäre infolge der Reibungshitze teilweise oder ganz auf. Während der flüssigen Phase formt sich der Mikrometeoroid im freien Fall (bei dem der Körper schwerelos ist und nur die intermolekularen Kräfte wirken) zu einer mehr oder weniger gut ausgeformten Kugel und fällt so zu Boden. Eine **Mikrosphärule** ist entstanden. Mikrosphärlen haben Durchmesser von einigen $10\ \mu\text{m}$ bis $1\ \text{mm}$. Ergänzend muss erwähnt werden, dass der Fall in der Erdatmosphäre nicht völlig frei erfolgt. Der Luftwiderstand verändert die Kugelform aerodynamisch.

Der freie Fall wurde und wird übrigens auch technologisch zur Herstellung von kleineren Kugeln verwendet. Zur Produktion von Schrotkugeln ließ man in sogenannten **Schrottürmen** flüssiges Blei in ein wassergefülltes Becken am Boden tropfen. Dieses **Turmgießverfahren** findet auch noch heute z. B. bei der Herstellung von Wackelkugeln Anwendung.

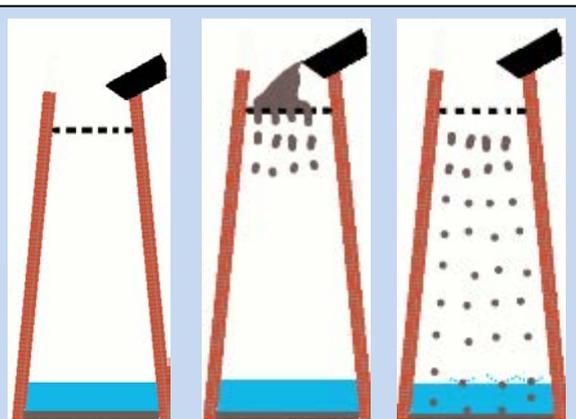


Abbildung 2: Der Stadtmauerturm von Münden (Fährnfortenturm, auch Hagelturm genannt) wurde bis 1983 als Schrottturm zum Gießen von Schrotkugeln genutzt. © Von Foto: Axel Hindemith, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=39955218>.

Kleines Experiment zur Kugelformung:

Verflüssige etwas Kerzenwachs im Wasserbad (Schmelztemperatur ca. 50°C – 60°C) und gieße es aus einigen Meter Höhe tropfenweise in einen Eimer kalten Wassers.

Drei Ausschnittsbilder aus einer Animation zum Turmgießverfahren zur Herstellung von Schrotkugeln.
© MdeVicente - Own work, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9624356>



[zurück zum Anfang](#)

Zwischenfrage / Antwort:

Warum schmelzen nicht alle Meteoroiden komplett auf, obwohl deren kinetische Energie dazu doch allemal ausreicht?



© Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=22884176>

Dazu zunächst die folgende stark vereinfachte Betrachtung der physikalischen Situation:

Beim Eintauchen der Meteoroiden in die Erdatmosphäre werden diese durch die Reibung mit den Luftmolekülen stark erhitzt. Man kann sagen, dass ein Teil ihrer kinetischen Energie in die Erwärmung fließt. Aber wieviel **Wärmeenergie** wird eigentlich benötigt, um einen Meteoroiden komplett aufzuschmelzen und wieviel **kinetische Energie** bringt er mit?

Für das **Aufschmelzen** muss einem Körper mit der Masse m , der spezifischen Wärme c , und der spezifischen Schmelzwärme q die Wärmemenge $Q = Q_{\text{Erwärmen}} + Q_{\text{Schmelzen}} = c_{\text{Fe}} \cdot m \cdot \Delta\vartheta + q_{\text{Fe}} \cdot m$ zugeführt werden, wobei $\Delta\vartheta$ die Temperaturdifferenz zwischen Start- und Schmelztemperatur (ϑ_0, ϑ_s) ist. Für z. B. Eisen ($c_{\text{Fe}} = 439 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $q_{\text{Fe}} = 268 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\vartheta_s = 1535 \text{ °C}$) gilt dann mit $\Delta\vartheta \approx 1800 \text{ K}$:

$$Q = (790,2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} + 268 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) \cdot m = 1058,2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot m = 1058,2 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 \cdot m.$$

Die kinetische Energie eines Meteoroiden erhält man aus $E_{\text{kin}} = \frac{m}{2} \cdot v^2$. Schon bei Annahme einer

sehr kleinen Geschwindigkeit von $v = 20 \text{ km/s}$ erhält man dann: $E_{\text{kin}} = 2 \cdot 10^6 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 \cdot m$.

E_{kin} würde also allemal ausreichen, um Q bereitzustellen (weitere Senken für E_{kin} sind: Anregung und Ionisierung von Luftteilchen, Verdrängung und akustische Anregung, ...).

Aufgabe zur Wärmeleitung

Beantworte die zuvor genannte Zwischenfrage unter Nutzung des im Folgenden dargestellten Sachverhalts! Vergleiche dazu einen kugelförmigen Meteoroid von 2 cm Durchmesser mit einem von 2 mm Durchmesser. Es soll sich dabei um Eisenmeteoroiden handeln. Eisen besitzt eine Wärmeleitfähigkeit λ von $80 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$.

Der Franzose Joseph Fourier (1768-1830) war nicht nur ein begnadeter Mathematiker, sondern auch äußerst erfolgreich auf dem Gebiet der Physik. So beschäftigte er sich auch mit der Wärmeausbreitung in Festkörpern und stellte dabei ein Gesetz auf (das Fourier'sche Gesetz), das es ermöglicht, die Dauer t der Weiterleitung einer bestimmten Wärmemenge Q beim Temperaturunterschied ΔT entlang einer Strecke d mit dem Leitungsquerschnitt A und der Wärmeleitfähigkeit λ zu ermitteln. Es gilt: $\frac{dQ}{dt} = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{d}$.

Mit der groben Annahme von $A = \pi \cdot r^2$, $d = r$ und $dQ = \Delta Q$

sowie der Näherung $dt = \Delta t$ gilt: $\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \lambda \cdot \pi \cdot r \cdot \Delta T$.

Man kann so die Zeit für die Wärmeleitung berechnen: $\Delta t = \frac{\Delta Q}{\lambda \cdot \pi \cdot r \cdot \Delta T}$.



Abbildung: Graviertes Porträt von Joseph Fourier.

©: Von Foto: Axel Hindemith, CC Von Louis-Léopold Boilly - <https://www.gettyimages.com.au/license/169251384>, Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3308441>

2 Woher kommen die kosmischen Mikrosphärulen?



Asteroid Eros. ©: NASA/JHUAPL



Mond. ©: By Gregory H. Revera - Own work, CC BY-SA 3.0



Kern des Kometen Halley. ©: MPAE

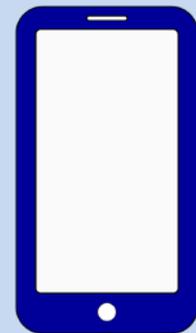
Die Meteoroiden stammen in der Regel aus dem Sonnensystem, wobei drei Quellen genannt werden sollen.

Die Hauptquelle ist der Asteroidengürtel, aus dem immer wieder Asteroiden oder Meteoroiden durch die gravitative Wirkung vor allem von Jupiter oder nach Zusammenstößen zwischen Objekten im Gürtel aus diesem herausgeschleudert werden.

Eine weitere Quelle sind die Oberflächen der Gesteinplaneten und ihrer Monde. An allererster Stelle muss der Erdmond als das uns nächste Objekt genannt werden. Einschläge von Meteoroiden, Asteroiden oder Kometen erzeugen Materialauswurf, der bei Entweichgeschwindigkeit auch zur Erde gelangen kann.

Vermutlich nur sehr kleine Meteoroiden stammen aus den sich in Sonnennähe durch Sublimation auflösenden Kometenkernen. Etliche Meteorströme werden damit in Verbindung gebracht (einige stammen aber auch von Asteroiden).

Einfache Recherche-Aufgabe:



- Was bedeutet ‚Sublimation‘?
- Wo im Sonnensystem befindet sich der Asteroidengürtel?
- Wie groß sind die drei dargestellten Himmelskörper?
- Welcher Meteorstrom wird mit dem Kometen Halley in Verbindung gebracht?

3 Woraus bestehen die kosmischen Mikrosphärulen?

Die Erforschung der Meteorite macht es auch erforderlich, diese nach bestimmten Merkmalen zu sortieren und damit zu klassifizieren. Das älteste **Klassifikationsschema** teilt die Meteorite nach ihrem Aufbau und ihrer Zusammensetzung in Steinmeteorite, Stein-Eisen-Meteorite und Eisenmeteorite ein.



Steinmeteorite

Chondrite – ca. 86 %¹ aller Meteorite

Chondrite haben ihren Namen von ihrer Struktur. Im Schnittbild sieht man viele Kügelchen, die in eine Masse feineren Materials eingebettet sind. Die Kügelchen nennt man Chondren (griechisch: Körner).

Chondrite bestehen aus den Mineralien Olivin, Pyroxen und Plagioklas. Zudem enthalten sie Nickeleisen.

Chondrite sind **undifferenzierte Meteorite**, d. h. sie stammen aus solchen Objekten des frühen Sonnensystems, die nicht genügend Masse hatten, um aufzuschmelzen und in der Schmelze je nach Dichte aufzusteigen oder ins Zentrum zu sinken.

Abbildung 3: Oben: Steinmeteorit vom Typ Chondrit aus dem „Allende-Fall“ (520 g, ca. 8 cm), gefunden 1969 in Mexiko. © Original uploader was Model Citizen at en.wikipedia - Transferred from en.wikipedia, Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3954290>.

Unten: Der Anschliff eines Allende-Meteoriten zeigt die vielen Chondren (Körner) meist aus Silikat. © Shiny Things - originally posted to Flickr as AMNH - Meteorite, CC BY 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4196153>



Steinmeteorite

Achondrite – ca. 8 %¹ aller Meteorite

Achondrite zeigen im Schnittbild keine oder kaum Chondren, deshalb die Vorsilbe ‚A‘.

Sie bestehen wie die Chondrite aus den Silikatmineralien Olivin, Pyroxen und Plagioklas. Ihr Eisen-Nickel-Gehalt ist aber wegen eines Differentiationsprozesses im Inneren eines größeren Objekts im frühen Sonnensystem stark reduziert. Achondrite gehören demnach zu den **differenzierten Meteoriten**.

Abbildung 4: Oben: Steinmeteorit vom Typ Achondrit aus dem „Millbillillie-Fall“ (175 g, ca. 6 cm), gefunden 1960 in Australien. © By H. Raab (User:Vesta) - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=291448>.

Unten: Der Anschliff eines Achondriten zeigt, dass dieser im Gegensatz zu einem Chondriten schon im Inneren eines Himmelskörpers reprozessiert wurde. © Claire H. - originally posted to Flickr as Stone Achondrite (Aubrite) Meteor, CC BY-SA 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10389394>



Eisenmeteorite

ca. 5 %¹ aller Meteorite

Genauer gesagt handelt es sich um Nickel-Eisen-Meteorite mit einem Nickelgehalt von ca. 5-20%.

Die Nickel-Eisen-Meteorite haben sich vermutlich im Inneren größerer aufgeschmolzener früher Sonnensystemobjekte (in deren Kern) angesammelt. Nach Zusammenstößen dieser Objekte mit anderen ist das mehr oder weniger gut ausdifferenzierte Kernmaterial dann frei geworden. Die Eisen-Meteorite gehören zu den **differenzierten Meteoriten**.

Abbildung 5: Oben: Der Eisenmeteorit „Old Woman“ (80,5 kg, 38 cm × 34 cm × 30 cm, gefunden in den gleich-namigen Bergen in Südkalifornien, USA. © Original uploader was Model Citizen at en.wikipedia - Transferred from en.wikipedia, Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3954290>.

Unten: Die angeätzte Schnittfläche des Meteoriten Muonionalusta zeigt die typischen Muster, die nur für die meisten Nickel-Eisen-Meteorite typisch sind. © Daderot - Eigenes Werk, CC0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=47485916>.



Stein-Eisen-Meteorite

ca. 1 %¹ aller Meteorite

Auch Stein-Eisen-Meteorite sind differenzierte Meteorite, die vermutlich aus dem Kern-Mantel-Bereich früh entstandener und teils schon ausdifferenzierter Sonnensystemobjekte, die später wieder zerstört wurden, stammen.

Sie bestehen aus einer anteilmäßig nicht weit auseinanderliegenden Mischung aus Silikat-Mineralien und Nickel-Eisen.

Abbildung 6: Der Brahmin-Meteorit, ein 3 kg schwerer Stein-Eisen-Meteorit vom Typ Pallasit. © Von Steve Jurvetson - Flickr: The rich history of the Brahmin Pallasite, CC BY 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?Curid=16399128>.

¹ Die Anteilsprozente der Meteoritenklassen beziehen sich auf die Anzahlen der Funde, die in der Antarktis und in Wüstengebieten, d. h. aus Gegenden, in denen beinahe jeder niedergegangene Meteoroid (also dann Meteorit) aufgespürt werden kann, gemacht wurden.

Hinsichtlich der Masse haben die gefundenen Eisenmeteoriten aber einen Anteil von 64 % und Steinmeteoriten nur von 33 %, weil Eisenmeteorite schwerer, meist größer (weil stabiler) und witterungsbeständig sind. (Dies gilt für die Funde weltweit.)

Abschließend noch ein kurzer Blick auf die **Elemente**, die anteilmäßig am stärksten in den Meteoriten vorkommen. Bei Steinmeteoriten (überwiegend aus Silikaten) sind das: 42 % Sauerstoff, 20,6 % Silizium, 15,8 % Magnesium und 15,6 % Eisen. Eisenmeteorite bestehen aus Eisen, das 6-12 % Nickel und bis zu 0,5 % Kobalt und Spuren anderer Elemente enthält [6].

[zurück zum Anfang](#)

Analogie zur Differenzierung - Freihandexperiment Stofftrennung

Fülle Wasser in ein Reagenzglas, gib etwas Erde hinzu und schüttele das Ganze. Du erhältst ein ‚Suspension‘ genanntes Stoffgemisch. Dieses bleibt stabil, wenn es schockgefroren wird. Beim Auftauen können sich die Bestandteile wieder im Schwerfeld voneinander trennen.

Analog wurden die zunächst undifferenzierten Mutterkörper der differenzierten Meteorite so stark erhitzt, dass sie aufschmolzen und sich im eigenen Schwerfeld differenzieren konnten, indem die schweren Elemente in deren Zentrum sanken (Kern-Mantel-Bildung).



4 Wie stark „regnet es“ kosmische Mikrosphärchen?

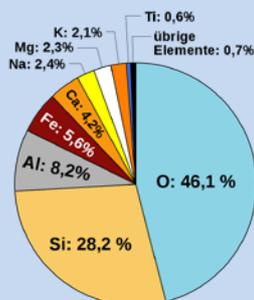
Pro Jahr gelangen ca. 50 t größere Meteoroiden bis zur Erdoberfläche [7], [13] wo sie dann als Meteorite mit Größen von mind. einigen Millimetern vorliegen. Genauer findet man in [13] auf S. 876 die Angabe, dass Meteorite im Massebereich zwischen 10 g und 1 t $5,38 \cdot 10^4$ kg pro Jahr den Erdboden erreichen.

Die Masse des in die Erdatmosphäre eintretenden kosmischen Staubs und an Mikrometeoroiden ist mit 40.000 ± 20.000 t/Jahr deutlich größer. Die Annahme ist, dass davon weniger als 10 % (2700 ± 1400 t/Jahr) als Mikrometeorite die Erdoberfläche erreichen [7].

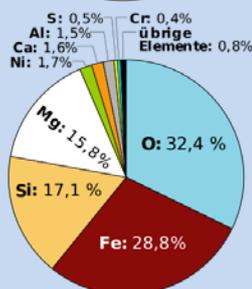
Die Anzahl der Mikrometeorite, die pro Jahr auf eine Fläche eines Quadratmeters oder eines Volleyballfeldes oder eines Garagendachs fällt, wird also nicht unerheblich sein.

Aufgabe zur Computergrafik – Diagrammerstellung mittels WORD:

Nutze die zuvor gegebenen Daten zum mittleren Elementengehalt der Steinmeteorite und erzeuge daraus im Textverarbeitungsprogramm ‚Word‘ ein Tortendiagramm! Beschreibe dein Vorgehen! Vergleiche dieses Tortendiagramm mit den unten gegebenen Tortendiagrammen zu den **Elementehäufigkeiten** in der Erdkruste und in der Erde insgesamt und ziehe daraus Schlüsse! Was erstaunt dich besonders bei den Elementeverteilungen?



Die Häufigkeit der Elemente der kontinentalen Erdkruste (Masseanteile). © By Henry Mühlpfordt - Own work, data from German Wikipedia: Liste der Häufigkeiten chemischer Elemente, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=68277401>.



Die Häufigkeit der Elemente der gesamten Erde (Masseanteile). © Von Henry Mühlpfordt - Eigenes Werk, data from German Wikipedia: Liste der Häufigkeiten chemischer Elemente, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=68417823>.

[zurück zum Anfang](#)

Aufgabe zur Abschätzung der Mikrospärulenhäufigkeit

Berechne, wieviele Mikrospärulen pro Jahr auf eine Fläche der Größe eines Volleyballfelds fallen. Gehe dazu von der Annahme aus, dass pro Jahr 2700 t an Mikrometeoroiden den Erdboden erreichen. (Durch das Aufschmelzen beim Durchqueren der Erdatmosphäre wurden diese meist „gerundet“ und sind entsprechend als Mikrospärulen auffindbar.)

Weiter angenommen wird, dass der mittlere Durchmesser der Mikrospärulen $0,25 \mu\text{m}^1$ und deren mittlere Dichte 5 g/cm^3 betragen.

¹ Dieser Wert stammt aus dem Diagramm in Abb. 7.



© Stefan Kühn (Fotograf) - Eigenes Werk (selbst erstellt), CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=89234>

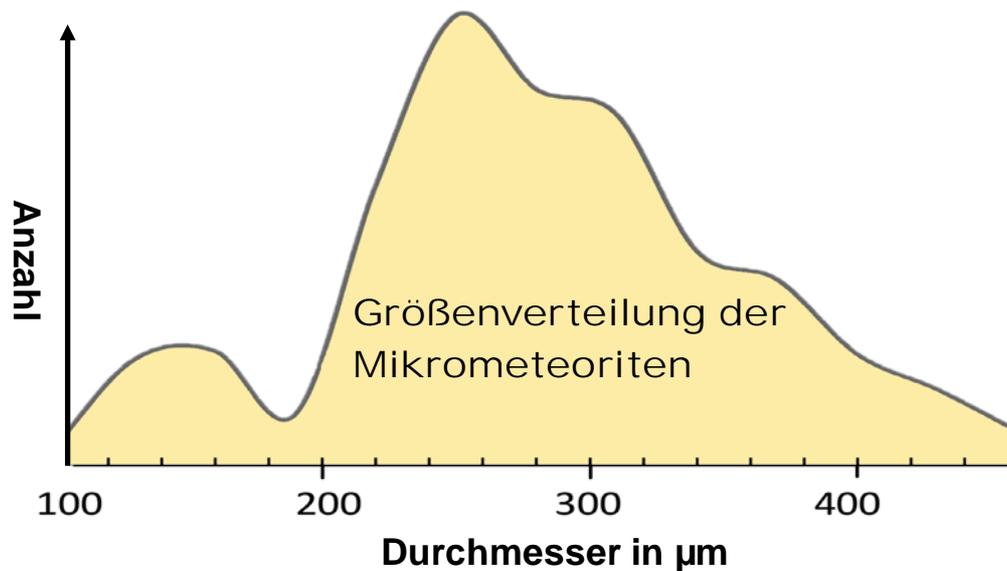


Abbildung 7: Größenverteilung von Mikrometeoriten, die im Transarktischen Gebirge, einer Bergkette in der Antarktis, gefunden wurden. Das Durchmessermaximum liegt bei etwa $250 \mu\text{m}$ (in Übereinstimmung mit anderen Sammlungen).

Die Diagrammdaten stammen aus einer Veröffentlichung von Suttle, M. D., & Folco, L. (2020): The extraterrestrial dust flux: Size distribution and mass contribution estimates inferred from the Transantarctic Mountain (TAM) micrometeorite collection. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 125, e2019JE006241, [5].

Zwischenfrage / Antwort:

Warum sinkt die Anzahl zu größeren Mikrometeoriten ($> 0,5 \text{ mm}$) zunächst ab?

Beim Eintritt in die Erdatmosphäre werden die Meteoroiden durch den Luftwiderstand abgebremst, wobei sie kinetische Energie verlieren und sich gleichzeitig aufheizen. Bei sehr kleinen Meteoroiden reicht die Aufheizung nur zum teilweisen oder völligen Aufschmelzen. Größere Meteoroiden haben mehr kinetische Energie und lösen sich dabei sehr häufig komplett auf.



© Gemein frei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=22884176>

5 Warum sind kosmische Mikrosphärulen ungefährlich?

Meteoriten sind selten. Trotzdem kam es schon vor, dass Menschen davon indirekt oder sogar direkt von ihnen betroffen waren. So trafen Meteorite desöfteren auch Hausdächer wie es z. B. in Abb. 8 zu sehen ist. Auch Schiffe wurden schon getroffen, wie z. B. das Segelschiff „Eklipse“, das auf seiner Fahrt von Newcastle nach San Francisco Anfang des 20. Jh. dadurch sogar versenkt wurde [8]. Tiere und Menschen traf es auch schon, wie z. B. 1880 einen Esel in den USA, 1911 einen Hund in Ägypten oder vor Millionen von Jahren ein Riesenfaultier im Gebiet von Argentinien. Der Meteorit lag gleich neben dem Skelett [8]. Leider kamen auch schon Menschen zu Schaden. Am 6. 2. 2016 wurden vier Menschen beim Einschlag eines Meteoriten auf dem Campusgelände der indischen Universität Bharathidasan verletzt; einer starb an den Folgen [9].

Im Vergleich zu Meteoriten sind Mikrometeoriten nicht mehr ganz so selten, wie wir zuvor gesehen haben. Dafür sind sie weitaus weniger gefährlich. Dazu müssen wir betrachten, welche kinetische Energie diese Körper mitbringen, um eine Wirkung zu entfalten.



Abbildung 8: 1928 schlug ein Meteorit durch das Dach einer Garage im kleinen Ort Benld (Illinois, USA) und traf den Sitz eines Autos. Das Bild zeigt den 1,77-kg-Meteoriten [2], den durch ihn beschädigten Sitz und im Weiteren eingeweichten Schalldämpfer des Autos. ©: Shsilver at English Wikipedia, CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10506633>. Das rechte Bild zeigt den Krater auf einem Hausdach im Ort Novato (Kalifornien, USA), den ein 62 g schwerer Meteorit beim Einschlag 2012 verursachte. ©: NASA - <http://cams.seti.org/impactonroof.jpg>, CC BY-SA 1.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=33037793> [3].

Die Frage, die hier betrachtet werden soll ist, wie schnell Mikrosphärulen am Erdboden ankommen. Im Idealfall, d.h. im Vakuum, fallen die Körper unabhängig von ihrer Beschaffenheit. Auf der Erde gilt dies nicht. Ein sich durch die Lufthülle bewegendes Körper erfährt den sogenannten **Luftwiderstand**, eine Widerstandskraft (die Luftkraft L), die anhängig ist von der Luftdichte ρ , der Geschwindigkeit zwischen Körper und Luft v , der Querschnittsfläche des Körpers A in Bezug auf die Bewegungsrichtung und eine empirische Konstante c (Strömungswiderstandskoeffizient bzw. c_w -Wert).

$$L = c_w \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot A$$

Die Formel zeigt, dass die Widerstandskraft mit anwachsender Geschwindigkeit größer wird. Hat L die Größe der Gewichtskraft $m \cdot g$ des Körpers, d.h. in unserem Falle des Meteoroiden, erreicht, wirkt keine Beschleunigung mehr und er fällt mit der zuletzt erreichten Geschwindigkeit. Es gilt:

$$m \cdot g = c_w \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot A \quad \rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{m \cdot g \cdot 2}{A \cdot c_w \cdot \rho}}$$

[zurück zum Anfang](#)

Die Luftkraft erreicht die Größe der Gewichtskraft (diesen Punkt nennt Heide „Hemmungspunkt“ [10]) aber nur für Mikrometeorite und kleinere Meteorite. Größere Objekte erfahren eine mit zunehmender Masse immer geringere Abbremsung.

Im Weiteren wollen wir die zuvor gezeigte Formel für die Auftreffgeschwindigkeit v für kugelförmige Mikrometeorite (Mikrosphärulen) noch vereinfachen. Dazu ersetzen wir in der Formel die Masse m und den Querschnitt A der Mikrosphärulen wie folgt: $m = \rho_M \cdot V = \rho_M \cdot A \cdot 4/3 \cdot r$

und erhalten:
$$v = \sqrt{\frac{\rho_M \cdot A \cdot 4/3 \cdot r \cdot g \cdot 2}{A \cdot c_w \cdot \rho}} = \sqrt{\frac{\rho_M \cdot 8/3 \cdot g}{c_w \cdot \rho}} \cdot \sqrt{r} \quad \Rightarrow \quad v \approx \sqrt{436000} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot r.$$

Aufgabe zur Auftreffgeschwindigkeit von Mikrosphärulen und kleinen Meteoriten

Berechne mit Hilfe der Näherungsformel $v \approx \sqrt{436000} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot r$ die durch ihren Luftwiderstand bestimmte Auftreffgeschwindigkeit kugelförmiger Eisenmeteorite mit den Radien 1 cm, 1 mm und 0,1 mm!

Folgende Werte sind gegeben: Dichte von Eisen $\rho_M \approx 8 \text{ g/cm}^3$, c_w -Wert für die Kugel = 0,4 und eine Luftdichte von ca. $1,2 \text{ kg/m}^3$ (Wert für 20°C und bei 1013 mbar).

Vergleiche auch die kinetischen Energien der auftreffenden Meteorite!

Freihand-Versuch und Rechnung zum Fallen mit Luftwiderstand

Lasse gleichzeitig eine Styroporkugel mit 5 cm Durchmesser und eine mit 2 mm Durchmesser aus gleicher Höhe fallen. Welche Kugel kommt zuerst am Boden an? Untermauere dein Versuchsergebnis durch Berechnung der erwartbaren Maximalgeschwindigkeiten!

(Styropor hat eine Dichte von $\rho_M \approx 15 \text{ kg/m}^3$)

Bei Verwendung von größeren Styroporkugeln (z.B. Durchmesser von 5 cm und 15 cm) wird eine größere Fallhöhe benötigt (evt. vom Balkon oder ...).



3 Styroporkugeln (d = 2 mm, 5 cm und 15 cm) für den Fallversuch

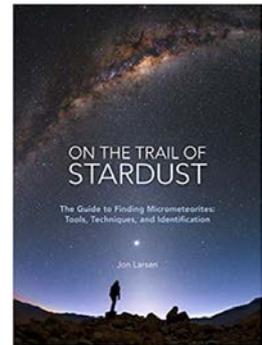
6 Wie findet man kosmische Mikrosphärulen?

Die in Abschnitt 4 festgestellte erstaunliche Häufigkeit der Mikrosphärulen macht Mut. Während sich die Profiforscher an besonderen Orten, die das Auffinden leichter machen (in Wüsten oder in der Antarktis), an die Arbeit machten, suchte und sucht der norwegische Hobbyforscher Jon Larsen in seinem direkten Umfeld auf Dächern oder in Rinnsteinen nach ihnen. Eigentlich ist Jon Larsen ein professioneller Jazz-Gitarrist, doch mittlerweile ist er zu einer anerkannten Kapazität auf dem Gebiet der Mikrometeoritensuche und -identifikation geworden.



Die Schwierigkeit der Suche nach kosmischen Mikrosphärülen besteht darin, diese von den irdischen (zum Teil von Menschen gemachten) Mikrosphärülen zu unterscheiden.

Jon Larsen hat dazu Pionierarbeit geleistet. U. a. in seinem Buch „Die Jagd nach Sternenstaub“ findet man dazu viele Vergleichsbilder. Sein Buch „On the trail of star dust“ gibt eine Handlungsanleitung zum Finden.



Im Folgenden soll dazu in enger Anlehnung an die von Jon Larsen gegebenen Hinweise eine **Anleitung zum Suchen und Finden von Mikrosphärülen** gegeben werden. Siehe dazu auch in facebook unter @micrometeorites und dort ‚Project Stardust – Jon Larsen‘.

Handlungsanleitung für das Finden von Mikrometeoriten (hier auf einem Dach)

https://www.facebook.com/pg/micrometeorites/photos/?tab=album&album_id=2477098688978668&ref=page_internal

(nach Jon Larsen. Vielen Dank an Jon Larsen und Jan Braly Kihle auch für die Zur-Verfügung-Stellung der Bilder.)

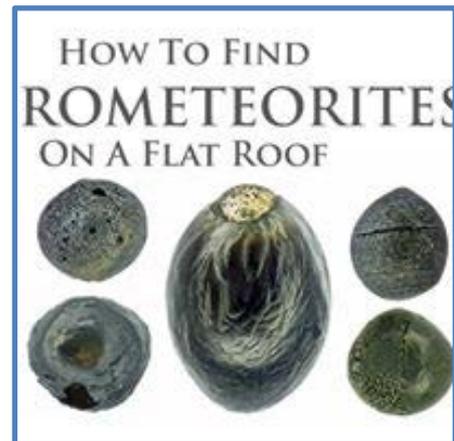
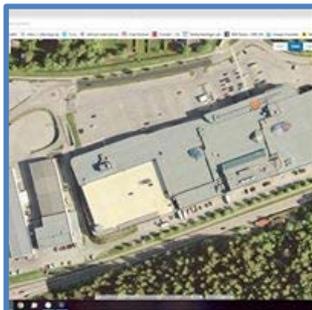


Photo: Jan Braly Kihle/Jon Larsen



1. Schritt: **Dachsuche mittels Google Earth**

Großes begehbares Flachdach, schon einige Jahre existent, Dachhaut möglichst glatt, Kontaktaufnahme zu Besitzer: Projektbeschreibung, Erlaubniseinholung zur Dachbegehung.



Photo: Jan Braly Kihle/Jon Larsen

2. Schritt: **Erfolg versprechende Orte lokalisieren**

Wo sich Regenwasser sammelt, sammeln sich auch die Mikrometeorite. (Dort, wo in Dachrinnen oder Regenabflußschächten das Wasser zur Ruhe kommt, lohnt sich die Suche auch.)



Photo: Jan Braly Kihle/Jon Larsen

Erfolg versprechende Suchorte lokalisieren

Wo der Wind zur Ruhe kommt (im Windschatten), auch dort sammeln sich vom Wind transportierte Körnchen, wie auch die Mikrometeorite.

[zurück zum Anfang](#)



Photo: Jan Braly Kihle/Jon Larsen

3. Schritt: Erste Selektion

Erste Selektion von möglichen Mikrometeoriten aus den zusammengefügten feinkörnigen Material mit Hilfe eines starken Magneten (Neodym).

Da ca. 80 % der Mikrometeorite ferromagnetisch sind (die Chondrite als die Meisten der Steinmeteorite können einen zweistelligen Prozentsatz an Nickel-Eisen enthalten), lassen sie sich durch einen Magneten „herausfischen“.



Photo: Jan Braly Kihle/Jon Larsen

4. Schritt: Sichern / Lagern des Fundes

Im gezeigten Beispiel hat Jon Larsen nach drei Stunden etwa 30 g Material eingesammelt und in eine Plastiktüte gefüllt.



Photo: Jan Braly Kihle/Jon Larsen

5. Schritt: Dokumentieren des Fundes

Die wissenschaftliche Vorgehensweise erfordert zunächst eine exakte Dokumentation:

- des Fundorts (hier im Bsp.: Vinterbro)
- der Zeit des Fundes (hier im Bsp.: 5. 8. 2019)
- der Feld-Nr. (hier im Bsp.: 986)
- der Methode der Partikelselektion (hier im Bsp.: ‚M‘ für magnetisch).



Photo: Jan Braly Kihle/Jon Larsen

6. Schritt: Reinigung (Trennung von Feinbestandteilen)

Hilfsmittel:

Schüssel, flacher Teller, Plastiklöffel, Spülmittel (Spültab)



Photo: Jan Braly Kihle/Jon Larsen

Mit Hilfe des Spülmittels werden anklebende Staubteilchen im Wasser abgelöst.



Durch kräftiges Umrühren werden die anhaftenden Staubteilchen von den „Mikrometeoriten-Anwärtern“ gelöst und werden mit Hilfe der Schaumblasen im Wasser nach oben transportiert (falls sie sich an diese Blasen anlagern). Diese Trennung nennt man Flotation.



Nachdem sich die größeren Teilchen (unter ihnen die möglichen Mikrometeorite) am Boden abgesetzt haben (wie beim Dekantieren), wird das Wasser mit den Feinbestandteilen vorsichtig abgossen.



Erneut mit Wasser auffüllen (warmes Wasser wäre noch besser), gut umrühren und das Absetzen der größeren Teilchen wieder abwarten.



Nach dem Absetzen wird das Wasser wiederum vorsichtig abgossen.



Dieser Vorgang (neues Wasser auffüllen, umrühren, absetzen lassen, abgießen) wird solange wiederholt bis das abgegossene Wasser klar, d. h. frei von Schmutzpartikeln ist.



[zurück zum Anfang](#)



7. Schritt: **Trocknung**

Etwa ein Drittel der Anfangsmasse (hier im Beispiel), Teilchen im Größenbereich um 0,1 mm, ist übrig. Das nasse Material wird auf einen Teller gegeben und dort zum Trocknen ausgebreitet.

Die allermeisten Teilchen sind jedoch irdischen Ursprungs. In diesem speziellen Fall sind viele Rostpartikel enthalten.



8. Schritt: **Siebung**

Um die Hauptmenge der kosmischen Sphärulen im Größenbereich zwischen 0,2 und 0,4 mm einzugrenzen, muss jetzt gesiebt werden. Dies geschieht **in 3 Stufen**.

1,5 mm: Zuerst wird ein Sieb mit einer Maschenweite von 1,5 mm genutzt. Dabei werden die großen Partikel ausgesiebt, bei denen nur sehr sehr selten auch ein kosmisches Teilchen dabei sein kann, was man aus Sammlungen in der Antarktis weiß.

0,4 mm: Die Partikel, die durch die 1,5-Millimeter-Maschen fallen, werden dann mit einem Sieb mit 0,4 Millimetern Maschenweite gesiebt. Auf dem Sieb bleiben die Teilchen mit den Größen 0,4 mm – 1,5 mm übrig.

0,2 mm: Die Teilchen mit Durchmessern $\leq 0,4$ mm werden nun mit dem dritten Sieb mit der Maschenweite von 0,2 mm gesiebt und man erhält die Gruppe mit den **Teilchengrößen von 0,2 mm – 0,4 mm**. In dieser Gruppe sind **die allermeisten kosmischen Mikrosphärulen** zu vermuten (siehe auch Abb. 7).



Ausgesiebt übrig bleibt die Teilchengruppe mit Durchmessern $\leq 0,2$ mm.



Photo: Jan Braly Kihle/Jon Larsen

9. Schritt: Mikroskopieren

Die ausgesiebten Teilchengruppen werden mikroskopiert. Benötigt werden ein Auflicht-Mikroskop, zwei spitze Holzstäbchen und eine kleine Plastikbox (mit luftdichtem Deckel), um eventuelle Mikrometeorit-Kandidaten zu verwahren.

Zunächst werden die Teilchen mit Durchmessern von 0,4 mm - 1,5 mm bei 25-facher Vergrößerung angeschaut. Das dauert nicht sehr lange, weil sich die Mikrometeorite von den irdischen Teilchen (Rostpartikel, Mineralteilchen) durch ihre aerodynamische Formung unterscheiden.

Die meisten Funde sind bei der Teilchengruppe 0,2 mm - 0,4 mm zu erwarten. Hier wird mit einer 63-fachen Vergrößerung gearbeitet. Wer viel Zeit mitbringt, könnte auch noch die Teilchengruppe mit Durchmessern < 0,2 mm mit evt. noch höherer Vergrößerung durchsehen.



Photo: Jan Braly Kihle/Jon Larsen



Photo: Jan Braly Kihle/Jon Larsen

Laut Jon Larsen war die im Beispiel gezeigte Suche nicht so ergiebig. Er fand acht Mikrosphärulen (7 werden im Bild oben gezeigt). Drei sind vom Typ „Gestreifte Olivine“, der statistisch gesehen am häufigsten vorkommt. Sie waren komplett aufgeschmolzen (ca. 1800° C) und bildeten beim Abkühlen Magnetit- und Olivinkristalle. Die parallele Ausrichtung der Olivinkristalle über größere Bereiche des Mikrometeoriten ist ein Merkmal. Ein anderes sind Strukturen auf der Oberfläche, die an einen Weihnachtsbaum erinnern. Sie entstanden beim Durchflug durch die Atmosphäre bei der Reaktion des chemisch gebundenen Eisens mit dem Luftsauerstoff.

Ein Objekt ist eine glasartige Sphärule, die noch stärker erhitzt wurde und so schnell abkühlte, dass die Schmelze bei der Erstarrung nicht kristallisieren konnte. Das darin enthaltene Eisen hat sich in der Schmelzphase vom Silikat getrennt, und bildet eine Perle an der Außenseite. 3 Objekte gehören schließlich zu den „porphyritischen Olivinen“, die nur etwa 1600°C heiß wurden.

7 Die Suche nach kosmischen Mikrosphärulen als Projekt

Citizen-Science-Projekt

Unter **Citizen-Science** (Bürgerwissenschaft) versteht man eine Form der Wissenschaftsausübung mit Hilfe oder allein durch interessierte Laien. Der Grundgedanke besteht darin, Naturbeobachtungen, Suchkampagnen oder Datenauswertungen auf Basis sehr vieler aktiver Bürgerwissenschaftler durchzuführen. (Man hat dann viele Augen, Ohren, Hände und Gehirne zur Verfügung.)



Viele Projekte der Bürgerwissenschaft (siehe z. B. unter <https://www.wissenschaft-im-dialog.de/projekte/buerger-schaffen-wissen/>) sind auch schon durch Schüler machbar. So können diese z. B. beteiligt werden an Zählungen von Insekten wie dem „Tagfalter-Monitoring“, um Daten zum Artenschwund zu gewinnen. Die Erfassung von Vogelbeständen geht nur unter Beteiligung der breiten Masse der Hobby-Ornithologen, wozu auch schon Schüler gehören. Baumbestand und Baumgesundheit waren und sind das Ziel des Projektes „TreeChecker“ des Schulbiologiezentrums Hannover.

Gerade auch in die Astronomie hat die Bürgerwissenschaft Einzug gehalten. So z. B. ermöglicht das Projekt „Verlust der Nacht“ das Ausfindigmachen aber auch Absichern von Lichtschutzgebieten (Gebiete mit nur geringer „Lichtverschmutzung“). Oder das Projekt "Radio Galaxy Zoo: LOFAR" bietet die Möglichkeit, sich an der Suche nach den schwarzen Löchern in den Zentren von Galaxien zu beteiligen.

Und auch die Suche nach kosmischen Mikrosphärulen war und ist auf die Mithilfe der Bürger angewiesen. Am Berliner Naturkundemuseum lief in der zweiten Jahreshälfte 2019 ein Citizen-Science-Projekt, bei dem Laien selbst nach Mikrometeoriten suchen durften. Konkretes dazu findet man unter: <https://www.museumfuernaturkunde.berlin/de/wissenschaft/berlin-sammelt-kosmischen-staub.>

Schüler-Projekt

Die Suche nach kosmischen Mikrosphärulen kann in einem Langfristprojekt auch von Schülern durchgeführt werden. Die Projektbearbeitung erfordert:

1. Einarbeitung (mit Kurzpräsentation),
2. Bereitstellung der Hilfsmittel,
3. Beschaffung von Rohmaterial, welches potentiell Mikrosphärulen enthält (laut Anleitung),
4. Aufbereitung des Rohmaterials: Selektion der Körnergruppe mit den meisten Mikrosphärulen (laut Anleitung),
5. Mikroskopierphase mit Selektion der „Kandidaten-Körner“ (laut Anleitung und mit Hilfe der Quelle [11]),
6. Fotografie der Mikroskopbilder der „Kandidaten-Körner“ (siehe z. B. unter: <https://www.photoinfos.com/Mikroskope/Mikroskop-Fotografie-3-Smartphone.htm>)
7. Kontaktaufnahme zu Meteoritenforscher und Austausch mit diesem,
8. Fakultativ: Poster zur Veröffentlichung in Schule oder darüber hinaus,
9. Abschlusspräsentation.

Schülerprojekt „Mikrometeoritensuche und –identifikation“ (Langfristprojekt)

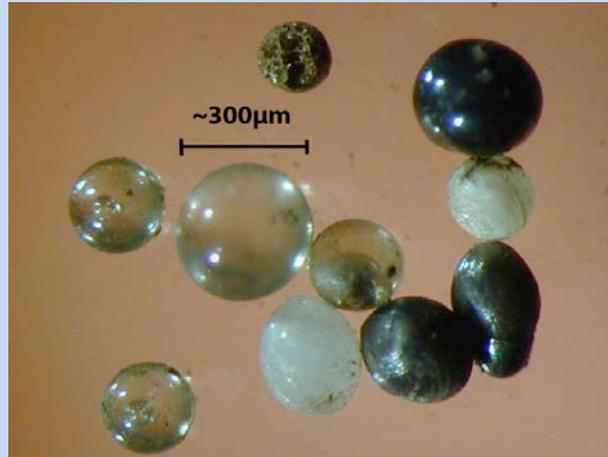
verschaffe dir zunächst grundlegendes Wissen zu Meteoriten und Mikrometeoriten und bereite dazu eine 15-minütige Präsentation zur Projektvorstellung vor!

Seit nicht allzu langer Zeit weiß man, dass man Mikrometeoriten auch in Städten finden kann. Dieser Aufgabe sollst du dich widmen:

Suche und identifiziere Mikrometeoriten (meist Mikrosphärulen) in deinem häuslichen Umfeld!

Eine Anleitung, die von Jon Larsen, dem Pionier auf diesem Gebiet stammt, kannst du bekommen.

Verschaffe dir die folgenden Hilfsmittel (siehe auch Anleitung). Zum Teil wirst du dazu die Hilfe deines Lehrers oder deiner Eltern brauchen.



Kehrbesen und kleine Schaufel. ©: Von M.Minderhoud - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=27407>.



Starker Suchmagnet (Neodym) mit Halteöse, ca. 5 cm Durchmesser



Mind. drei Plastikbeutel (Öffnung ca. 20 cm Durchmesser)



Spültab. © Daniel78 - Nikon D300 + Sigma 150 mm at F6.3., CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7439742>.



Laborsiebe 1,5 mm, 0,4 mm und 0,2 mm. ©: Von BMK Wikimedia, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=650352>.



Plastiklöffel

Zwei Plastikdosen (Frischhalte Dosen). ©: EvaK - Privatsammlung, CC BY-SA 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=835871>.



Teller (Durchmesser 20 cm), Schaschlikstäbchen



Binokulares Mikroskop mit bis zu etwa 70-facher Vergrößerung. ©: Sarah Greenwood - Eigenes Werk, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=71630776>

Die weiteren Projektschritte werden dir gesondert mitgeteilt.

8 Wann kamen die Mikrometeorite auf die Erde?

Die Mikrosphärulen (nahezu kugelförmige Mikrometeorite), die wir in unserem Umfeld auf Dächern, in Regenrinnen oder im Rinnstein finden, sind erst „vor Kurzem“, d. h. maximal innerhalb des Zeitraums der Existenz des Daches oder der Straße gefallen.

Bei den in der SuW-Nachricht „Die archaische Erdatmosphäre war sehr reich an CO₂“ (Brennpunkt 1952 in der Zeitschrift „Sterne und Weltraum“ 7/2020) beschriebenen fossilen Mikrosphärulen, gehen die Planetologen aber davon aus, dass sie ein „Fallalter“ von 2,7 Mrd. Jahren haben. Woher bekamen die Planetologen aber die Information zum **Fallalter**?

Hier stellt sich die Frage, wie man das Alter von Gesteinen – wann sich das Gestein bildete – ermittelt. Bei einem Erstarrungsgestein kann man dieses mit Hilfe radiometrischer Methoden ermitteln, die auf dem radioaktiven Zerfall bestimmter seltener im Gestein vorhandener Isotope basieren. So zum Beispiel nutzt man bei der Rubidium-Strontium-Datierung den Zerfall des Isotops ⁸⁷Rb des Elements Rubidium (des „Mutterisotops“) zum Isotop ⁸⁷Sr des Elements Strontium (das entstehende „Tochterisotop“). Dazu nur soviel, dass man im Prinzip aus der Menge des „Tochterisotop“ ⁸⁷Sr unter Ausnutzung des Wissens um die Halbwertszeit des „Mutterisotops“ ⁸⁷Rb auf das Alter des Gesteins schließen kann, wenn man die Menge des „Tochterisotops“ ⁸⁷Sr kennt, die bei der Erstarrung des Gesteins schon vorhanden war. Um die Notwendigkeit dieser vermutlich sehr ungenauen Angabe auszuschließen, nutzen die Geologen die Methode der Isochronen (... Ein weiteres Isotop kommt dabei ins Spiel). **Doch dazu mehr in einem späteren WIS-Beitrag** oder unter <https://de.wikipedia.org/wiki/Isochronenmethode>.

Für das Sedimentgestein Kalkstein (die Mikrosphärulen wurden in Kalkstein gefunden) kann diese Methode nicht direkt verwendet werden. Indirekt geben aber die Vulkangesteine in angrenzenden Gesteinschichten in der Fundregion Pilbara in Westaustralien Hinweise. Die darin enthaltenen Kristalle von Zirkon, dem ältesten auf der Erde entstandenen Mineral, enthalten Spuren von Uran, das zu Blei zerfällt. Zur Anwendung kamen elf Altersbestimmungen nach der Uran-Blei-Datierung (²³⁸U → ²⁰⁶Pb und ²³⁵U → ²⁰⁷Pb), die die Entstehung des Kalksteins (und damit die Einbettung der Mikrosphärulen) auf einen Zeitraum zwischen 2772 und 2715 Ma (Megajahre) eingrenzen. [14]



Die Pilbara-Region im Westen Australiens, Fundort der fossilen Mikrosphärulen. © Hesperian - It was created by the uploader., CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1643111>.

Abschließende Frage / Antwort:

Warum suchten die Planetologen gerade im Kalkstein nach den Mikrosphärulen?

Die Mikrosphärulen sind zwar auch in die Lava gefallen, doch sind sie im erstarrten Vulkangestein kaum noch zu identifizieren. Auch im Sandstein, dem Sediment, das aus den Körnern des zerriebenen Vulkangesteins besteht, bestehen kaum Chancen zum Auffinden von Mikrosphärulen. Allein diejenigen Mikrosphärulen, die in das Urmeer fielen, wo sich das Kohlendioxid der Uratmosphäre auflöste und in Verbindung mit gelösten Ionen u. a. von Kalzium als Kalkschlamm ausfiel, konnten im so entstehenden Kalkstein konserviert werden.



Brennpunkt-Nachricht 1952 in der Zeitschrift „Sterne und Weltraum“ 7/2020

„Die archaische Erdatmosphäre war sehr reich an CO₂“

Die Erdatmosphäre vor 2,7 Milliarden Jahren bestand zu rund 70 Prozent aus Kohlendioxid. Dies ist das Ergebnis einer Forschergruppe um Owen R. Lehmer von der University of Washington in Seattle. Dafür untersuchten die Wissenschaftler Überreste von **Mikrometeoriten**, die sich in 2,7 Milliarden Jahre alten Sedimentgesteinen aus der Pilbara-Region in Australien befanden. Dort sammelten die Forscher Bruchstücke von Kalkstein ein. Sie lösten ihn in Säure auf, um winzige Kügelchen aus Eisenoxid herauszulösen, die **Mikrospherulen**.

Aus der chemischen Analyse dieses Materials schließen die Wissenschaftler, dass sie als metallische **Mikrometeoriten** mit hoher Geschwindigkeit in die Erdatmosphäre eintraten und dort durch Reibung stark erhitzt wurden. Dadurch schmolzen sie in Sekundenbruchteilen auf und reagierten mit den Gasen der Erdatmosphäre. Die Temperaturen waren so hoch, dass Kohlendioxid mit dem metallischen Eisen reagierte und es in unterschiedliche Eisenoxide umwandelte.

Sollten sich diese Untersuchungen durch weitere Analysen von **Mikrospherulen** bestätigen lassen, so würde dies die Annahmen über die archaische Erdatmosphäre präzisieren. Definitiv bekannt ist bislang nur, dass die irdische Lufthülle zu dieser Zeit so gut wie keinen Sauerstoff enthält. Dies lässt sich anhand von alten Sedimentgesteinen ableiten, die zeigen, dass sich ihre Minerale unter chemisch reduzierenden Bedingungen – also ohne die Einwirkung von Sauerstoff – gebildet haben. Damit aber die **Mikrometeoriten** oxidiert werden konnten, mussten sie demnach mit Kohlendioxid reagiert haben. Dies geschieht am effizientesten, wenn die damalige Erdatmosphäre zu 70 Prozent aus Kohlendioxid bestand, wie Modellierungen am Computer ergaben.

Vor 2,7 Milliarden Jahren waren in den Ozeanen – die Kontinente waren noch ohne Leben – schon Mikro-Organismen aktiv, die durch Photosynthese Sauerstoff freisetzten. Dieser wurde aber von den im Meerwasser gelösten Eisenionen abgefangen. Sie oxidierten weiter und wurden zu schwerlöslichen Eisenoxiden und Eisenhydroxiden, die als rötlicher Schlamm ausfielen und auf den Meeresboden sanken. Erst als der größte Teil des gelösten Eisens aus dem Meerwasser durch fortwährende Sedimentation verschwunden war, konnte sich Sauerstoff in der Erdatmosphäre in großer Menge ansammeln.

Quellen

- [1] Thilo Hasse: Urbane Mikrometeorite. Kosmische Staubpartikel in der Stadt, <https://www.micrometeorites.org/einfuehrung>, thilo.hasse@micrometeorites.org
- [2] <http://articles.adsabs.harvard.edu/full/1938PA.....46..548W/0000556.000.html>
- [3] <https://en.wikipedia.org/wiki/Meteorite>
- [4] Ulf von Rauchhaupt: FAZ-Beitrag „Jazz und Sternenstaub“, <https://www.faz.net/aktuell/wissen/mi-kro-me-teo-ri-ten-jazz-und-sternenstaub-15450214.html#jazz-und-sternenstaub>
- [5] Suttle, M. D., & Folco, L. (2020). The extraterrestrial dust flux: Size distribution and mass contribution estimates inferred from the Transantarctic Mountain (TAM) micrometeorite collection. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 125, e2019JE006241. Abbildung 6 <https://doi.org/10.1029/2019JE006241>
- [6] Max-Wissen: Meteorit, <https://www.max-wissen.de/65644/meteorit>
- [7] <https://en.wikipedia.org/wiki/Micrometeorite>
- [8] Mesenzew, W.: Im Reich der Steine, Verlag MIR Moskau, 1989, S. 109 ff.
- [9] <https://www.forschung-und-wissen.de/nachrichten/astronomie/erstmals-stirb-ein-mensch-durch-einen-meteoriteneinschlag-13372258>
- [10] Heide, F: Kleine Meteoritenkunde, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1988, S. 16 ff.
- [11] Larsen, Jon: „Die Jagd nach Sternenstaub. Die erstaunlichen Mikro-Meteoriten und ihre irdischen Imitatoren“, GeraMond Verlag, 2018, ISBN: 978-3-95613-055-7
- [12] Stork, R.: „Sternstaub auf dem Dach“, *Sterne und Weltraum* 6/2020, S. 42
- [13] Zolensky, M. et al.: „Flux of Extraterrestrial Materials“ in D. S. Laretta, H. Y. McSween Jr.: „Meteorites and the early Solar System II“, THE UNIVERSITY OF ARIZONA PRESS Tucson in collaboration with LUNAR AND PLANETARY INSTITUTE Houston, 2010, S. 869 – 888
- [14] Blake, T. S., Buick, R., Brown, S. J. A. & Barley, M. E. Geochronology of a Late Archaean flood basalt province in the Pilbara Craton, Australia: constraints on basin evolution, volcanic and sedimentary accumulation, and continental drift rates. *Precamb. Res.* 133, 143–173 (2004). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301926804000828?via%3Dihub>.

Ergebnisse

Kleines Experiment zur Kugelformung

Quellen dazu sind z. B.:

- Grimsehl, E.: „Lehrbuch der Physik: Band 1 Mechanik · Akustik · Wärmelehre“, Vieweg + Teubner Verlag, 1977, S. 160
- [https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Institute/IEP/Thermophysics_Group/Files/Teachers/Physikalische Experimente mit Wasser Reddy Claudio.pdf](https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Institute/IEP/Thermophysics_Group/Files/Teachers/Physikalische_Experimente_mit_Wasser_Reddy_Claudio.pdf), S.16 ff.

Aufgabe zur Wärmeleitung

Beantworte die zuvor genannte Zwischenfrage unter Nutzung des im Folgenden dargestellten Sachverhalts! Vergleiche dazu einen kugelförmigen Meteoroid von 2 cm Durchmesser mit einem von 2 mm Durchmesser. Es soll sich dabei um Eisenmeteoroiden handeln. Eisen besitzt eine Wärmeleitfähigkeit λ von $80 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$.

Lösung

$$\Delta t = \frac{\Delta Q}{\lambda \cdot \pi \cdot r \cdot \Delta T}$$

1. Schritt: Berechnung der Wärmemenge zum Aufschmelzen:

Für $r = 10 \text{ mm}$

$$Q = Q_{\text{Erwärmen}} + Q_{\text{Schmelzen}} = c_{\text{Fe}} \cdot m \cdot \Delta\vartheta + q_{\text{Fe}} \cdot m$$

$$Q = 0,439 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 0,0335 \text{ kg} \cdot (1535 - (-50))\text{K} + 268 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 0,0335 \text{ kg}$$

$$Q \approx 23,31 \text{ kJ} + 8,98 \text{ kJ} = 32,29 \text{ kJ.}$$

Für $r = 1 \text{ mm}$

$$Q = 0,439 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 0,0335 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot (1535 - (-50))\text{K} + 268 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 0,0335 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

$$Q \approx 23,31 \text{ J} + 8,98 \text{ J} = 32,29 \text{ J.}$$

2. Schritt: Berechnung der Wärmeleitungszeit:

$$\text{für } r = 1 \text{ cm: } t = \frac{32290 \text{ Ws}}{21 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}} \cdot \pi \cdot r^2} \cdot \frac{r}{1538 \text{ K}} = \frac{32290 \text{ Ws}}{21 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}} \cdot \pi \cdot 0,01 \text{ m} \cdot 1538 \text{ K}} \approx \mathbf{32 \text{ s.}}$$

$$\text{für } r = 1 \text{ mm: } t = \frac{32,29 \text{ Ws}}{21 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}} \cdot \pi \cdot 0,001 \text{ m} \cdot 1538 \text{ K}} \approx \mathbf{0,32 \text{ s.}}$$

Es zeigt sich, dass bei größeren Meteoroiden die Zeit nicht ausreicht, weswegen diese auch nur oberflächlich angeschmolzen sind. Kleinere Meteoroiden hingegen werden häufig durchgeschmolzen und können daher eine nahezu sphärische Form annehmen.

Werte für anderes Meteoroidenmaterial:

Olivin, $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$: Schmelztemperatur: $1200 \text{ }^\circ\text{C}$, Wärmeleitfähigkeit: ca. $5 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$.

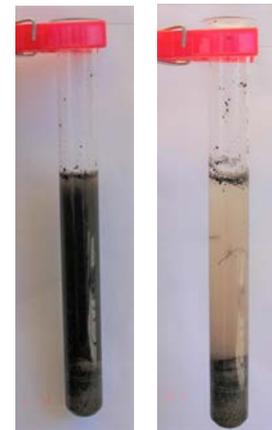
Recherche-Aufgabe

Wo im Sonnensystem befindet sich der Asteroidengürtel? Wie groß sind die drei dargestellten Himmelskörper? Welcher Meteorstrom wird mit dem Kometen Halley in Verbindung gebracht?

- Sublimation: Übergang vom festen Aggregatzustand direkt in die Gasphase
- Bahngebiet des Asteroidengürtels: 2,0 – 3,4 AE
- Eros: $34,4 \times 11,2 \times 11,2$ km, Mond: 3476 km, Halley: $15,3 \times 7,2 \times 7,2$ km
- Orioniden: 2. 10 - 7. 11. (Maximum am 21. 10.)

Analogie zur Differenzierung - Freihandexperiment Stofftrennung

So wie die Erde aus dem Gemisch Erde-Wasser nach unten sinkt, passierte es analog mit dem geschmolzenen Eisen im einem aufgeschmolzenen Himmelskörper des frühen Sonnensystems (der später bei einem Zusammenstoß zerbarst.)



Aufgabe zur Computergrafik – Diagrammerstellung mittels WORD

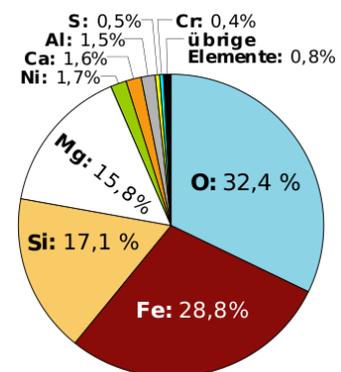
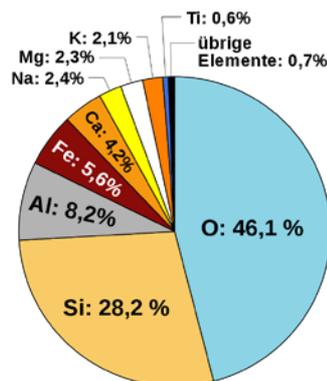
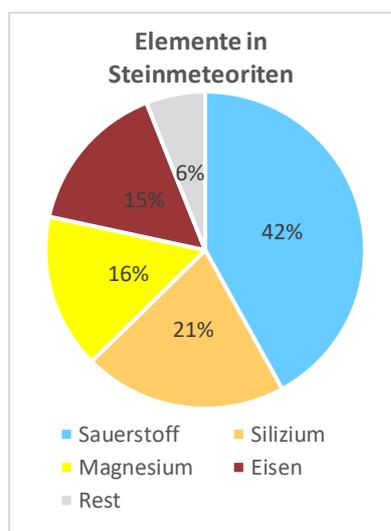
Arbeitsschritte zur Erzeugung einer Tortengrafik mittels WORD:

1. Einfügen > Diagramm > Kreis,
2. Doppelklick auf das gewünschte Kreisdiagramm (hier nur Kreis),
(daraufhin wird ein Muster-Kreisdiagramm und die dazugehörige Datentabelle angezeigt),
3. Ersetzen der Daten durch die eigenen Daten,
4. Tabelle schließen, Diagrammgrafik evt. noch formatieren.

Hinsichtlich der Hauptbestandteile Sauerstoff, Silizium und Eisen sind die Meteorite in der Eelementverteilung der Erdkruste näher der Gesamterde.

Die große Menge an (gebundenem) Sauerstoff erstaunt.

Ebenso erstaunlich sind die großen Anteile an Silizium, Eisen, Magnesium und Aluminium



Aufgabe zur Abschätzung der Mikrosphärendichte

Gegeben sind:

- Auf der Erdoberfläche hinzukommende Mikrosphärenmasse pro Jahr: 2700 t / a
- Mittlerer Durchmesser der Mikrosphären: 250 μm
- Mittlere Dichte der Mikrosphären: $\rho \approx 5 \text{ g/cm}^3$
- Erdradius: 6371 km

1. Rechnungsschritt: Bestimmung der mittleren Masse der Mikrosphären

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 = 5 \cdot 10^6 \cdot \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot (0,125 \cdot 10^{-3} \text{ m})^3 \approx 4,1 \cdot 10^{-5} \text{ g} = 41 \mu\text{g}$$

2. Rechenschritt: Bestimmung der Anzahl an Mikrosphären

$$\frac{2700 \text{ t}}{41 \mu\text{g}} = \frac{2700}{41} \cdot \frac{10^{12} \mu\text{g}}{\mu\text{g}} \approx 66 \cdot 10^{12} \text{ Mikrosphären}$$

3. Rechenschritt: Bestimmung der Erdoberfläche

$$A_O = 4\pi \cdot r^2 = 4\pi \cdot (6371 \text{ km})^2 \approx 510 \cdot 10^6 \text{ km}^2$$

4. Rechenschritt: Bestimmung der mittleren Fallrate pro Jahr und m^2

$$\frac{66 \cdot 10^{12}}{510 \cdot 10^6 \text{ km}^2} \approx \frac{129400}{\text{km}^2} \approx 0,1294 / \text{m}^2$$

5. Schritt: Datenrecherche zur Größe eines Volleyballfelds

$$\text{Beide Spielfelder: } 18 \text{ m} \times 9 \text{ m} = 162 \text{ m}^2$$

6. Ergebnis

Auf ein Volleyballfeld fallen pro Jahr im Mittel 21 Mikrosphären.

$$0,1294 \text{ m}^{-2} \cdot 162 \approx 20,96 \approx 21$$

Aufgabe zur Auftreffgeschwindigkeit von Mikrosphären und kleinen Meteoriten

$$v \approx \sqrt{436000 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot r}$$

Für kugelförmige Eisen-Meteorite ($\rho_M \approx 8 \text{ g/cm}^3$, cw-Wert von 0,4) ergeben sich bei der Luftdichte von ca. $1,2 \text{ kg/m}^3$ (Wert für 20°C und bei 1013 mbar) folgende Geschwindigkeiten:

- Für $r = 1 \text{ cm}$ (33,5 g): ca. 66 m/s,
- Für $r = 1 \text{ mm}$ (0,335 g): ca. 21 m/s,
- Für $r = 0,1 \text{ mm}$ (0,0335 mg): ca. 6,6 m/s,
- Für $r = 0,01 \text{ mm}$ (0,0335 μg): ca. 2,1 m/s.

[zurück zum Anfang](#)

Für die kinetische Energie der Eisenkugeln (die Wirkung) gilt:

$$E_{kin} = \frac{m}{2} \cdot v^2 = \frac{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho_M}{2} \cdot v^2 = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho_M \cdot 436000 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 8000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot r^4$$
$$E_{kin} \approx 7,3 \cdot 10^9 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2 \cdot \text{m}^2} \cdot r^4$$

Damit ergeben sich für die kinetischen Energien:

- Für $r = 1 \text{ cm}$ (33,5 g): 73 Nm,
- Für $r = 1 \text{ mm}$ (0,0335 g): 0.0073 Nm,
- Für $r = 0,1 \text{ mm}$ (0,0335 mg): 0,00000073 Nm.

Freihand-Versuch und Rechnung zum Fallen mit Luftwiderstand

Für Styroporkugeln ($\rho_M \approx 15 \text{ kg/m}^3$, cw-Wert von 0,4) erhält man $v \approx \sqrt{817,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot r}$.

- Für $r = 7,5 \text{ cm}$ (26,7 g): ca. 7,8 m/s,
- Für $r = 2,5 \text{ cm}$ (1,05 g): ca. 4,5 m/s,
- Für $r = 1 \text{ mm}$ (0,00006 g): ca. 0,9 m/s,