

## Besuch aus dem Weltall – ein kleiner Asteroid tritt ein in die Erdatmosphäre

Reiner Hennig

Im Oktober 2008 stürzte der Mini-Asteroid 2008 TC<sub>3</sub> auf die Erde. Mitten in der Wüste im Nordsudan wurde eins seiner Bruchstücke gefunden, der Meteorit Almahata Sitta. Wir wollen uns anhand einer Reihe von Aufgaben damit beschäftigen, was geschieht, wenn ein himmlischer Kleinkörper in die Atmosphäre der Erde eintritt.

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Astronomie	Planeten, Kleinkörper	Meteoriten, Asteroiden, Planetenatmosphären
Physik	Mechanik, Thermodynamik	Bewegungsenergie, Impuls, Energieerhaltung, Wärmeleitung, Wärmestrahlung, Verdampfungswärme



Fund eines Meteoriten in der lybischen Wüste im April 2004. (Autor: Dr. Sven Buhl, [www.niger-meteorite-recon.de](http://www.niger-meteorite-recon.de), Veröffentlichung gemäß GNU-Richtlinien erlaubt.)

Der Meteorit Almahata Sitta ist das Bruchstück eines Körpers mit einer Masse von etwa 80 t. Um in den folgenden Aufgaben abschätzen zu können, was beim Eintritt eines solchen Körpers in die Atmosphäre geschieht, machen wir einige vereinfachte Annahmen:

- Der Asteroid tritt unter einem Winkel von  $30^\circ$  zur Erdoberfläche mit einer Geschwindigkeit von 10 km/s in die Erdatmosphäre ein.
- Er hat die Form eines Zylinders mit der Grundfläche  $A = 10 \text{ m}^2$  und der Höhe  $h = 3 \text{ m}$ .
- Er fliegt mit der Grundfläche voran durch die Atmosphäre, seine Rotationsachse ist also parallel zur Flugrichtung.

## Aufgaben

- 1.) Welche Strecke legt er in einer 20 km dicken Schicht der Erdatmosphäre zurück? Wie lange würde sein Flug durch die Atmosphäre von 160 km Höhe bis zum Boden dauern, wenn es keinen Luftwiderstand gäbe?
- 2.) **Vom Asteroiden aus gesehen** treffen die Luftmoleküle mit einer Geschwindigkeit von 10 km/s auf die Grundfläche des Asteroiden auf und geben dabei ihre Bewegungsenergie ab. Berechne, wie viel Masse der Kleinkörper bis herunter zu einer Höhe von 160 km auffängt. Wie viel Energie wird ihm durch das Auftreffen der Luftmoleküle in den darüber liegenden Schichten zugeführt? Ein Teil dieser Energie wird sicher auch an die Luftschicht direkt unter der Grundfläche abgegeben.
- 3.) Wie ändert sich der Impuls des Körpers durch das Auftreffen der Moleküle der Luft? Dadurch wird der Körper abgebremst. Wie stark ist die Abbremsung bis zur Höhe von 160 km?
- 4.) Betrachten wir die Erwärmung des Asteroiden in einer Höhe von 160 km. Wir nehmen an, dass er zu Beginn eine Temperatur von 250 K hat. Wir betrachten die Erwärmung seiner Grundfläche durch alle Moleküle, die oberhalb von 160 km auftreffen. Der Asteroid besteht aus Stein. Wir betrachten dabei eine 1 cm dicke Schicht. Um wie viel steigt die Temperatur der Grundfläche durch die Energieabgabe der auftreffenden Luftmoleküle?
- 5.) Welche Wärmemenge wird durch Wärmeleitung in die nächste Schicht des Asteroiden weitergeleitet? Nimm dazu an, dass die Schicht, durch die der Transport hindurch geschieht, 1 cm dick ist.
- 6.) Wie viel Energie wird von der Grundfläche nach außen abgestrahlt? Mit welcher Farbe glüht dann der Körper? Wie viel Energie wird dazu aufgewandt, dass das Material des Asteroiden nach außen abdampft? Wie viel Masse verliert er dadurch? Berechne, wie sich diese Energieabgaben auf die Temperatur der Grundfläche auswirken. Der neue Wert für die Temperatur wird dann als Ausgangspunkt für die folgende Rechnung verwendet.
- 7.) Wie viel Masse fängt der Asteroid zwischen 160 km und 140 km auf, und wie würde dies die Temperatur seiner Grundfläche erhöhen? Wie stark würden Abstrahlung, Wärmeleitung und Verdampfung diese neue Temperatur wieder erniedrigen? Wie stark würde der Körper in dieser Schicht durch die auftreffenden Moleküle abgebremst?

- 8.) Berechne dann, wie viel Masse der Asteroid zwischen 140 km und 120 km auffängt, wie groß dann die Energieverluste dort sind und welche neue Temperatur sich damit bei 120 km ergibt.
- 9.) Führe dann nacheinander für jede der angegebenen Höhen bis herunter zum Boden diese Rechnungen durch.
- 10.) Mit welcher Geschwindigkeit trifft der Körper am Boden auf, welche Energie wird dabei freigesetzt?
- 11.) Wie breitet sich die Wärme im Inneren des Asteroiden aus, während er durch die Atmosphäre fällt? Zerlege ihn dazu in 10 Schichten parallel zur Grundfläche, zunächst alle mit einer Temperatur von 250 K. Bei 160 km führt die Aufheizung der Grundfläche (Schicht 1) zu einem Wärmeübergang nach Schicht 2. Dadurch erhöht sich die Temperatur der Schicht 2. Bei 140 km berechnet man daraus den Wärmeübergang zwischen der Grundfläche und Schicht 2 und den Wärmeübergang zwischen Schicht 2 und Schicht 3. Daraus lassen sich dann die Temperaturen der Schichten 1 - 3 in der Höhe 120 km abschätzen. Entsprechend kann man so nacheinander die Temperaturen der einzelnen Schichten bei 100km, bei 80 km, bei 60 km, bei 40 km, bei 20 km und bei 0 km berechnen.
- 12.) Was würde geschehen, wenn der Asteroid ein schmutziger Schneeball wäre, der 90 % der auftreffenden Strahlung absorbiert?

## Anhang

### **Luftdruck $p$ bei verschiedenen Höhen $z$**

$z / \text{km}$	160	140	120	100	80	60	40	20	0
$p / \text{Pa}$	3,3E-6	7,4E-4	2,7E-3	3,0E-2	8,6E-1	19	300	5400	101000

nach: J. T. Houghton: The physics of atmospheres. Cambridge 1977.

### **Säulendichte $s(z)$ der Luft**

Die Säulendichte  $s(z)$  der Luft ist hier die Masse der Luft in einer Säule mit der Querschnittsfläche 1  $\text{m}^2$ , die von der Höhe  $z$  senkrecht nach oben bis in den Weltraum reicht. Man kann sie aus dem Luftdruck berechnen, wenn man den Luftdruck durch die Schwerebeschleunigung  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  dividiert. Für die Höhe  $z = 0 \text{ km}$  beträgt die Säulendichte etwa  $s(0) = 101000/9,81 \text{ Pa}/(\text{m/s}^2) = 10300 \text{ kg/m}^2$ , entsprechend ist für  $z = 20 \text{ km}$  die Säulendichte  $s(20 \text{ km}) = 5400/9,81 \text{ Pa}/(\text{m/s}^2) = 550 \text{ kg/m}^2$ .

### **Glühfarben**

- 525 °C: beginnende Rotglut
- 700 °C: Dunkelrotglut
- 850 °C: Kirschrotglut
- 950 °C: Hellrotglut
- 1100 °C: Gelbrotglut
- 1300 °C: beginnende Weißglut
- 1300 °C: volle Weißglut

aus: Walter Greulich (Hrsg.): Lexikon der Physik Bd. 2. Heidelberg, Berlin 1999.

## Daten zum Material des Meteoriten

Ureiliten wurden im Labor geschmolzen bei etwa 1215 °C.

D. Walker und T.L. Grove: "UREILITE PARENT BODY SIZE(S): SMELTING EXPERIMENTS" Lunar and Planetary Institute Provided by the NASA Astrophysics Data System LPS XXII 1457.

Bei einem Steinmeteoriten beträgt die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck  $c_p = 900$  J/(kg K) (fest) bzw. 1100 J/(kg K) (flüssig), die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda = 1,5 \dots 2,4$  W/(m K) und die Dichte  $\rho = 2380 \dots 3840$  kg/m<sup>3</sup>.

Bei einem Kometen aus Wassereis ist  $c_p = 600$  J/(kg K),  $\lambda = 0,001 \dots 1$  W/(m K),  $\rho = 300 \dots 700$  kg/m<sup>3</sup>.

Die Energie  $q_s$ , die durch Abdampfen pro Sekunde und m<sup>2</sup> verloren geht, lässt sich berechnen aus:

$$q_s = \frac{H \cdot p_{\text{Gas}}}{\sqrt{2\pi \cdot R_s \cdot T}}$$

Hier sind  $H$  die spezifische Sublimationswärme,  $R_s$  die spezifische Gaskonstante und  $p_{\text{Gas}}$  der Gasdruck der vom Asteroiden abgedampften Materie.

Olivin ist ein Mischkristall aus Fosterit und Fayalit.

Für Fosterit sind:  $H = 3859 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ ,  $R_s = 59,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ ,  $p_{\text{Gas}} = 7,62 \cdot 10^{13} \text{ Pa} \cdot e^{-65301 \text{ K}/T}$ .

Für Fayalit sind:  $H = 2983 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ ,  $R_s = 40,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ ,  $p_{\text{Gas}} = 5,14 \cdot 10^{17} \text{ Pa} \cdot e^{-73120 \text{ K}/T}$ .

Für Wassereis sind:  $H = 2660 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ ,  $R_s = 461,91 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ ,  $p_{\text{Gas}} = 3,56 \cdot 10^{12} \text{ Pa} \cdot e^{-6141 \text{ K}/T}$ .

Kahle, Ralph: Modelle und Methoden zur Abwendung von Kollisionen von Asteroiden und Kometen mit der Erde. Dissertation TU Berlin. Berlin 2005.