

## Einleitung

Ein Meteoroid ist ein kleinerer Körper (mit einer typischen Größe von unter 1 m) der zum Beispiel von einem Kometen oder Asteroiden stammt. Ein auf der Erde eingeschlagener Meteoroid wird Meteorit genannt.

In der Nacht des 17. Januar 2009 sahen viele Anwohner der Ostsee den hellen Feuerschweif eines Meteoroiden in der Erdatmosphäre. Eine Überwachungskamera in Schweden hat dieses Ereignis auf Video aufgenommen (vgl. Abb. 1.1(a)). Mit Hilfe dieser Bilder und Augenzeugenberichten konnte der Einschlagort des Meteoriten gut bestimmt werden. Sechs Wochen später wurde tatsächlich ein Meteorit mit einer Masse von 0,025 kg in der Nähe der Stadt Maribo in Süddänemark gefunden. Untersuchungen des Meteoriten, der nun Maribo genannt wird, und seiner Flugbahn lieferten erstaunliche Ergebnisse. Die Geschwindigkeit, mit der der Meteorit in die Erdatmosphäre eingetreten ist, war ungewöhnlich hoch. Sein Alter beträgt  $4,567 \cdot 10^9$  Jahre. Damit ist der Meteorit kurz nach der Geburt des Sonnensystems entstanden. Möglicherweise ist er ein Teil des Kometen Encke.

## Die Geschwindigkeit von Maribo

Der beobachtete Feuerball bewegte sich in westliche Richtung in einem Winkel von  $285^\circ$  zur Nordrichtung. Die Bahn und der Fundort des Meteoriten sind in Abb. 1.1 dargestellt. Der Abstand des Fundortes von der Überwachungskamera beträgt 195 km in einem Winkel von  $230^\circ$  relativ zur Nordrichtung.

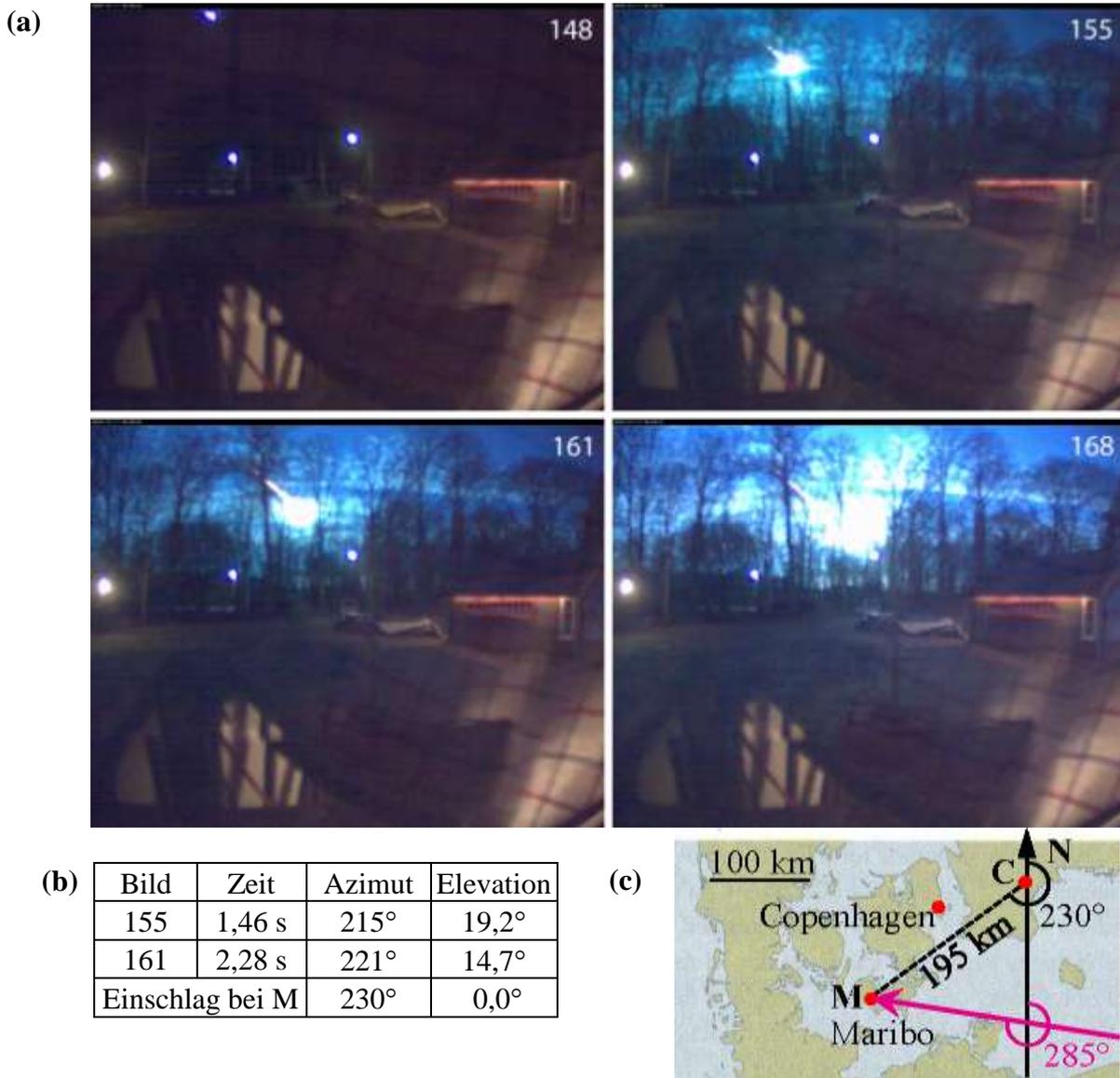
1.1	Benutze diese Informationen und Abb. 1.1, um die durchschnittliche Geschwindigkeit von Maribo zwischen den Bildern 155 und 161 zu bestimmen. Die Erdkrümmung und die Gravitationskraft können dabei vernachlässigt werden.	1,3
-----	--	-----

## Schmelzen in der Atmosphäre?

Die Reibung, die ein Meteoroid in der oberen Atmosphäre erfährt, hängt in komplizierter Weise von der Form und Geschwindigkeit des Meteoroiden, sowie von der Temperatur und Dichte der Atmosphäre ab. Als sinnvolle Näherung kann für die Reibungskraft  $F$  in der oberen Atmosphäre der Ausdruck  $F = k \rho_{\text{atm}} A v^2$  verwendet werden, wobei  $k$  eine Konstante ist,  $\rho_{\text{atm}}$  die Dichte der Atmosphäre bezeichnet und  $A$  bzw.  $v$  die senkrechte Querschnittsfläche bzw. die Geschwindigkeit des Meteoroiden angeben.

Verwende die folgenden Annahmen für die Untersuchung des Meteoroiden: Das in die Atmosphäre eintretende Objekt war eine Kugel mit einer Masse  $m_M = 30$  kg, einem Radius  $R_M = 0,13$  m, einer Temperatur  $T_0 = 200$  K sowie einer Geschwindigkeit  $v_M = 2,91 \cdot 10^4$  m/s. Die Dichte der Atmosphäre kann als konstant angenommen werden. Sie beträgt in einer Höhe von 40 km über dem Erdboden etwa  $\rho_{\text{atm}} = 4,1 \cdot 10^{-3}$  kg/m<sup>3</sup>. Der Reibungskoeffizient beträgt  $k = 0,60$ .

1.2a	Schätze ab, wie lange es nach dem Eintritt in die Atmosphäre dauert, bis die Geschwindigkeit des Meteoroiden um 10% von einem Wert $v_M$ auf $0,90 v_M$ reduziert worden ist. Vernachlässige dabei die Gravitationskraft. Nimm an, dass die Masse des Meteoroiden konstant bleibt und er seine sphärische Form behält.	0,7
1.2b	Bestimme das Verhältnis der kinetischen Energie $E_{\text{kin}}$ des in die Atmosphäre eintretenden Meteoroiden zu der Energie $E_{\text{melt}}$ , die für das vollständige Schmelzen des Meteoroiden notwendig ist. Notwendige Zahlenwerte sind in dem Datenblatt aufgeführt.	0,3



**Abb 1.1** (a) Eine Serie von Bildern der Überwachungskamera in Schweden, die die Bewegung von Maribo als Feuerball in der Atmosphäre zeigt. (b) Die Daten von zwei der Bilder: Angegeben sind die Aufnahmezeit, die Richtung (Azimut) in Grad sowie die Höhe über dem Horizont (Elevation) in Grad von Position C aus gesehen. Der Azimutwinkel gibt die Position in der horizontalen Ebene im Uhrzeigersinn von Norden gemessen an. (c) Skizze der Flugbahn von Meribo (lila Pfeil) relativ zur Nordrichtung (N) und der Einschlagstelle (M) in Dänemark von der Kamera (C) aus gesehen.

### Aufheizung von Maribo bei dem Durchgang durch die Atmosphäre

In der Atmosphäre war der überschallschnelle Meteoroid Maribo als leuchtender Feuerball zu sehen, da die umgebende Luft aufgrund der Hitze leuchtete. Dabei wurden nur die äußersten Schichten von Maribo aufgeheizt. Nimm an, dass Maribo eine homogene Kugel mit einer Dichte  $\rho_{sm}$ , spezifischen Wärmekapazität  $c_{sm}$ , und thermischer Leitfähigkeit  $k_{sm}$  darstellt (Werte sind in dem Datenblatt zu finden). Nimm weiter an, dass der Meteoroid mit einer Temperatur von  $T_0 = 200 \text{ K}$  in die Atmosphäre eintrat und seine Oberflächentemperatur in der Atmosphäre aufgrund der Reibung konstant bei  $T_s = 1000 \text{ K}$  lag, sodass das Innere von Maribo langsam aufgeheizt wurde.

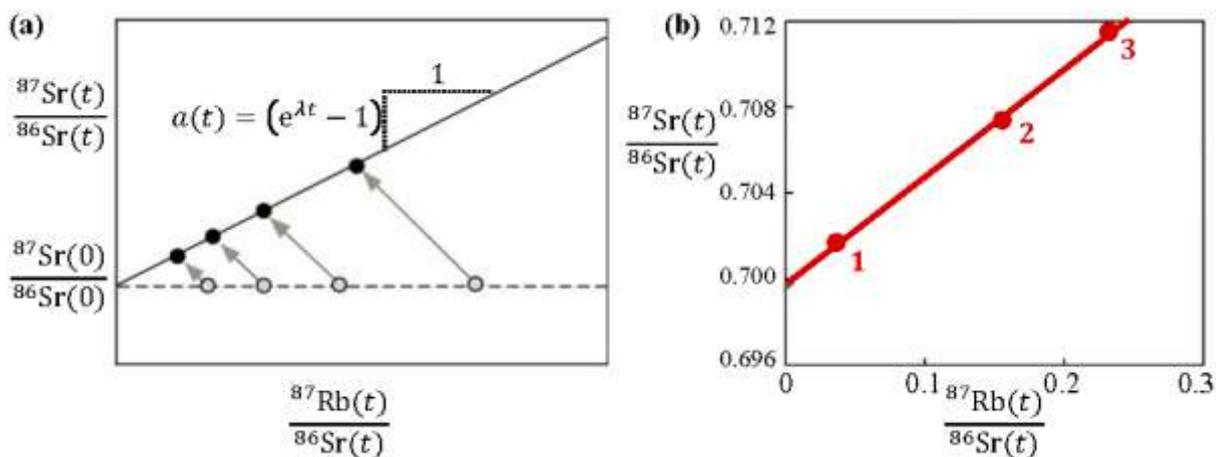
Nachdem Maribo eine Zeit  $t$  durch die Atmosphäre gefallen ist, hat sich eine äußere Schicht der Dicke  $x$  auf eine Temperatur aufgeheizt, die deutlich über  $T_0$  liegt. Die Dicke dieser Schicht kann durch eine Dimensions- bzw. Einheitenanalyse abgeschätzt werden, in die die folgenden thermodynamischen Parameter eingehen:  $x \approx t^\alpha \rho_{sm}^\beta c_{sm}^\gamma k_{sm}^\delta$ .

1.3a	Bestimme durch Dimensionsanalyse die Werte der Exponenten $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ und $\delta$ .	0,6
1.3b	Berechne die Dicke $x$ nach einer Fallzeit $t = 5$ s und bestimme das Verhältnis $x/R_M$ .	0,4

## Das Alter eines Meteoriten

Die chemischen Eigenschaften von radioaktiven Isotopen und ihren Zerfallsprodukten können unterschiedlich sein. Daher besitzen einige Mineralien in einem Meteoriten einen hohen Anteil eines bestimmten radioaktiven Elements und andere einen geringen. Dieser Unterschied kann zur radiometrischen Bestimmung des Alters von Meteoriten anhand der enthaltenen Mineralien genutzt werden.

Betrachte als ein Beispiel das Isotop  $^{87}\text{Rb}$  (Element Nr. 37), das mit einer Halbwertszeit von  $T_{1/2} = 4,9 \cdot 10^{10}$  Jahren in das stabile Isotop  $^{87}\text{Sr}$  (Element Nr. 38) zerfällt. Das Isotop  $^{86}\text{Sr}$  ist ebenfalls stabil. Zum Zeitpunkt der Kristallisation war das Verhältnis  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  für alle Mineralien identisch, während das Verhältnis  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  unterschiedlich gewesen sein kann. Im Laufe der Zeit wird die Menge von  $^{87}\text{Rb}$  durch den Zerfall geringer, während die Menge an  $^{87}\text{Sr}$  ansteigt. Daher verändert sich auch das Verhältnis  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ . In Abb. 1.2(a) repräsentieren die Punkte auf der horizontalen Linie die Verhältnisse  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  in unterschiedlichen Mineralien zum Zeitpunkt der Kristallisation.



**Abb 1.2** (a) Das Verhältnis  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  in verschiedenen Mineralien zum Zeitpunkt  $t = 0$  der Kristallisation (graue Punkte) und heute (schwarze Punkte). (b) Die Isochronenlinie für drei unterschiedliche Mineralienproben desselben Meteoriten zum jetzigen Zeitpunkt.

1.4a	Schreibe die Zerfallsreaktion für die Umwandlung von $^{87}_{37}\text{Rb}$ zu $^{87}_{38}\text{Sr}$ auf.	0,3
1.4b	Zeige, dass die jetzigen Werte des Verhältnisses $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , aufgetragen über dem jetzigen Verhältnis $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ , in unterschiedlichen Mineralienproben desselben Meteoriten auf einer Geraden, der so genannten Isochronenlinie, mit der Steigung $a(t) = (e^{\lambda t} - 1)$ liegen. Hierbei ist $t$ die Zeit seit der Entstehung des Minerals und $\lambda$ ist die Zerfallskonstante, die invers proportional zur Halbwertszeit $T_{1/2}$ ist.	0,7

1.4c	Bestimme das Alter $\tau_M$ des zu der Isochronenlinie in Abb. 1.2(b) gehörigen Meteoriten.	0,4
------	---	-----

### Der Komet Encke als möglicher Ursprungsort für Maribo

Der Komet Encke bewegt sich auf einer Umlaufbahn um die Sonne bei der der minimale und maximale Sonnenabstand gegeben sind durch  $a_{\min} = 4,95 \cdot 10^{10}$  m und  $a_{\max} = 6,16 \cdot 10^{11}$  m.

1.5	Berechne die Umlaufdauer $t_{\text{Encke}}$ des Kometen Encke.	0,6
-----	--	-----

### Auswirkungen eines Asteroideneinschlags auf die Erde

Vor 65 Millionen Jahren wurde die Erde von einem großen Asteroiden getroffen, der eine Dichte von  $\rho_{\text{ast}} = 3,0 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$ , einen Radius  $R_{\text{ast}} = 5,0 \text{ km}$  und eine Endgeschwindigkeit von  $v_{\text{ast}} = 2,5 \cdot 10^4 \text{ m/s}$  besaß. Dieser Einschlag führte zur Auslöschung nahezu allen Lebens auf der Erde und der Bildung des Chicxulub-Kraters. Untersuche, was passieren würde, wenn ein identischer Asteroid heute in einer vollständig inelastischen Kollision auf die Erde treffen würde. Nimm an, dass das Trägheitsmoment der Erde dem 0,83-fachen des Trägheitsmomentes einer homogenen Kugel gleicher Größe und Masse entspricht. Das Trägheitsmoment einer Kugel der Masse  $M$ , die einen Radius  $R$  besitzt, beträgt bei Drehung um die Schwerpunktsachse  $\frac{2}{5}MR^2$ . Vernachlässige bei der Betrachtung mögliche Änderungen des Erdorbits.

1.6a	Der Asteroid schlage auf dem Nordpol ein. Bestimme die maximal durch den Einschlag verursachte Winkeländerung der Ausrichtung der Erdachse.	0,7
1.6b	Der Asteroid schlage radial auf dem Äquator ein. Bestimme die durch den Einschlag verursachte Änderung $\Delta\tau_{\text{vrt}}$ der Rotationsperiode der Erde um ihre Achse.	0,7
1.6c	Der Asteroid schlage tangential am Äquator auf. Bestimme die durch den Einschlag verursachte Änderung $\Delta\tau_{\text{tan}}$ der Rotationsperiode der Erde um ihre Achse.	0,7

### Minimale und maximale Einschlaggeschwindigkeit

Betrachte einen Himmelskörper, der gravitativ im Sonnensystem gebunden ist, sich aber anfänglich außerhalb des Einflussbereiches des Erdgravitationsfeldes befindet. Der Himmelskörper schlage auf der Erde mit einer Geschwindigkeit  $v_{\text{imp}}$  auf. Vernachlässige Reibung in der Erdatmosphäre und den Einfluss weiterer Himmelskörper.

1.7	Berechne den maximal möglichen Wert $v_{\text{imp}}^{\max}$ für die Geschwindigkeit $v_{\text{imp}}$ .	1,6
-----	--	-----