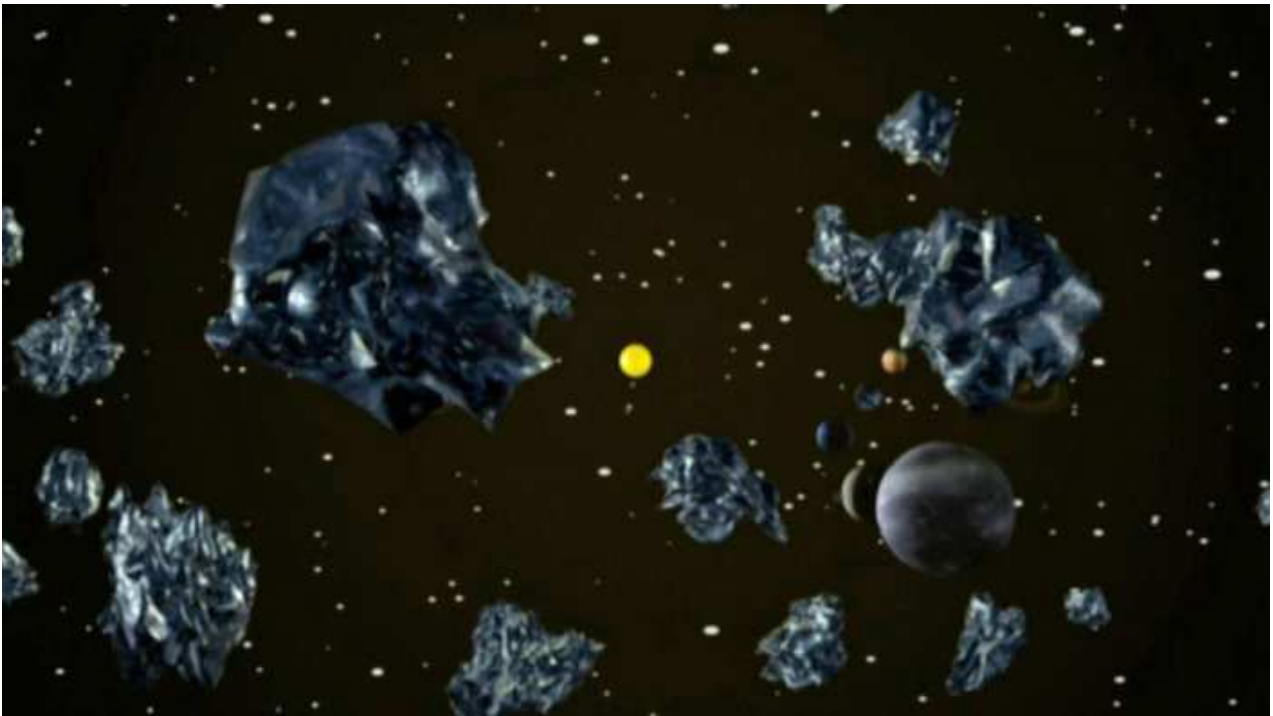


**Astronomie und Astrophysik**

# **Zwergplaneten und Kleinkörper im Sonnensystem**

**von**

**Andreas Schwarz**



**Stand: 28.01.2017**

## **0 Inhaltsverzeichnis**

<b>1 Einleitung.....</b>	<b>3</b>
<b>2 Zwergplaneten.....</b>	<b>4</b>
<b>3 Kleinplaneten (Asteroiden bzw. Planetoiden).....</b>	<b>9</b>
<b>4 Kometen.....</b>	<b>12</b>
<b>5 Meteoroiden.....</b>	<b>19</b>
<b>6 Interplanetare Materie.....</b>	<b>22</b>
<b>7 Impakte.....</b>	<b>22</b>
<b>8 Schlusswort.....</b>	<b>28</b>
<b>9 Literatur- und Bilderverzeichnis.....</b>	<b>29</b>

## 1 Einleitung

Nach einer Definition der Internationalen Astronomischen Union (IAU) vom 24. August 2006 werden unter dem Begriff „Kleinkörper“ des Sonnensystems Kleinplaneten (Asteroiden bzw. Planetoiden), Kometen und Meteoroiden zusammengefasst, welche sich auf einer Umlaufbahn um die Sonne bewegen. Ebenfalls eingeführt wurde eine neue Klasse von astronomischen Objekten, die sogenannten Zwergplaneten, welche sich wie die großen Planeten ebenfalls um die Sonne bewegen. Zwergplaneten haben eine ausreichend große Masse, um aufgrund ihrer Eigengravitation weitgehend im hydrostatischen Gleichgewicht zu sein und damit eine Kugelgestalt zu haben. Das unterscheidet sie von den unförmig gestalteten Kleinplaneten, welche auch als Asteroiden oder Planetoiden bezeichnet werden. Im Gegensatz zu den großen Planeten haben Zwergplaneten ihre Umlaufbahn jedoch nicht von Kleinkörpern bereinigt. Das ist das Unterscheidungsmerkmal zwischen einem Planeten und einem Zwergplaneten. Die Definition ist umstritten, da auch die großen Planeten ihre Umlaufbahnen nicht vollständig von Kleinkörpern bereinigt haben. Allerdings können die Massen der Kleinkörper gegenüber einer Planetenmasse vernachlässigt werden, nicht jedoch gegenüber der Masse eines Zwergplaneten. Die Umlaufbahnen von Kleinkörpern und Zwergplaneten um die Sonne unterscheidet diese von den Monden bzw. Trabanten, welche ein anderes astronomisches Objekt, etwa einen Planeten umlaufen.

Die Kometen bestehen aus einem Kern, der von einer Koma (Atmosphäre des Kometen) umgeben ist, sowie einem Ionen- und Staubschweif. Für den Kern des Kometen wurde bereits im Jahre 1950 von Fred Whipple der Begriff „Schmutziger Schneeball“ geprägt. Er besteht hauptsächlich aus Wassereis, Trockeneis (gefrorenes Kohlenstoffdioxid), Ammoniak, Methan sowie Beimengungen von Mineral- und Staubteilchen. Bei der Annäherung an die Sonne verflüchtigen sich Wasserdampf und andere leicht flüchtige Stoffe, wie Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ), aus dem Kern, bilden sowohl die Koma als auch den Kometenschweif. Aufgrund der Wechselwirkung zwischen den Teilchen des Kometenschweifes und des sogenannten Sonnenwindes (Teilchenstrahlung von der Sonne) ist der Schweif von der Sonne weggerichtet. Die Kerne von Kometen haben Durchmesser von etwa 1 bis 50 km, die Koma schon eine Ausdehnung im Bereich von 100.000 km. Der Kometenschweif kann Längen von mehreren Millionen bis mehreren Hundertmillionen km erreichen. Die Staubteilchen im Schweif bewegen sich in Kernnähe mit höherer Geschwindigkeit als in Kernferne. Dies führt zu einer wahrnehmbaren Krümmung des Schweifs. Es wird zwischen kurzperiodischen Kometen mit Umlaufzeiten von bis zu 200 Jahren und langperiodischen Kometen mit größeren Umlaufzeiten unterschieden. Kurzperiodische Kometen sind in der Ebene des Sonnensystems lokalisiert und haben ihren Ursprung im sogenannten Kuipergürtel hinter der Neptunbahn in etwa 30 bis 50 AE Entfernung von der Sonne (1 AE = 1 Astronomische Einheit = Mittlere Entfernung Erde – Sonne = 149.597.870,7 km). Die langperiodischen Kometen haben keine Lokalisierung in bestimmten Ebenen und stammen aus der Oort'schen Wolke, welche die Sonne kugelsymmetrisch in einem Entfernungsbereich von 30.000 bis 100.000 AE umgibt. Damit reicht diese Wolke bis in eine Entfernung von etwa 1,3 Lichtjahren Entfernung von der Sonne. In einem Entfernungsbereich von 50.000 AE von der Sonne erreicht die Wolke ihre größte Dichte an Objekten. Sowohl die Objekte des Kuipergürtels als auch der Oort'schen Wolken sind Überbleibsel aus der Entstehungszeit des Sonnensystems.

Die Meteoriten bestehen hauptsächlich aus Gestein (etwa 94 Prozent) oder Eisen (etwa 5 Prozent). Doch kommen auch Eisen-Stein-Meteorite oder sogenannte Glas-Meteorite aus Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ), sogenannte Tektite vor. Des Weiteren wird zwischen planetaren Meteoriten, Meteoriten mit Parabelbahnen und kometarischen Meteoriten unterschieden. Erstere sind Fragmente aus dem Planetoidengürtel, die mit den Parabelbahnen sind noch unbekannter Herkunft und letztere sind Staubteilchen von Kometen bzw. sich auflösenden Kometen, welche sich auf der Bahn des Kometen bzw. des sich auflösenden Kometen verteilen und dort lokalisiert sind. Wenn die Erde dann eine solche Bahn kreuzt, kommt es zu sogenannten Meteoren, Leuchterscheinungen, welche auch als Sternschnuppen bezeichnet werden. Noch kleinere Teilchen ( $d < 10 \mu\text{m}$ ,  $m < 10^{-8} \text{ kg}$ ) werden als interplanetarer Staub bezeichnet.

## 2 Zwergplaneten

Nach einer Definition der Internationalen Astronomischen Union (IAU) wird zwischen Planeten, Zwergplaneten und Kleinkörpern (Kleinplaneten bzw. Asteroiden bzw. Planetoiden, Kometen und Meteoroiden) unterschieden. Demnach gilt sowohl für Planeten als auch für Zwergplaneten:

- Sie bewegen sich auf einer Umlaufbahn um die Sonne und
- sie verfügen über eine ausreichend große Masse, um annähernd im hydrostatischen Gleichgewicht zu sein und daher annähernd eine Kugelgestalt zu haben.

Als Unterscheidungsmerkmal zwischen Planeten und Zwergplaneten gelten nachfolgende Definitionen. Für Planeten gilt:

- Sie haben die Umgebung ihrer Umlaufbahnen von anderen Körpern bereinigt und
- sie sind keine Sterne (Sonnens).

Für Zwergplaneten gilt:

- Sie haben die Umgebung ihrer Umlaufbahnen nicht von anderen Körpern bereinigt und
- sie sind keine Monde von anderen Planeten.

Diese Definition ist jedoch nicht völlig unumstritten. Auch die Planeten haben die Umgebung ihrer Umlaufbahnen nicht völlig von anderen Körpern frei geräumt. So gibt es im Falle der Erde noch einige Zehntausend Objekte in ihrer Umlaufbahn. Im Fall des Jupiters seien die sogenannten Trojaner erwähnt, Kleinplaneten, welche sich ebenfalls in der Jupiterbahn bewegen. Allerdings gibt es dennoch einen Unterschied zu den Zwergplaneten: Das Masseverhältnis. Im Falle der großen Planeten sind die Massen der Kleinkörper auf ihren Umlaufbahnen gegenüber den Planetenmassen vernachlässigbar, im Falle der Zwergplaneten gilt dies jedoch nicht. Ein weiterer Kritikpunkt ist, dass die Definition nur speziell für das Sonnensystem und nicht allgemein für andere Planetensysteme gilt. Es ist daher möglich, dass die oben aufgeführten Definitionen noch revidiert werden.

Zwergplaneten kommen sowohl im Kleinplanetengürtel zwischen Mars und Jupiter als auch im Kuiperbelt jenseits der Neptunbahn vor. Im Kleinplanetengürtel wird bisher nur Ceres als Zwergplanet klassifiziert. Entdeckt wurde er am 01. Januar 1801 vom italienischen Astronomen Giuseppe Piazzi (1746 – 1826) an der Sternwarte Palermo auf Sizilien / Italien. Die am 27. September 2007 von der NASA (USA) gestartete Mission „Dawn“ befindet sich seit dem 06. März 2015 in einer Umlaufbahn um Ceres.

Der Zwergplanet Ceres hat einen Äquatordurchmesser von 963 km und einen Poldurchmesser von 891 km. Aufgrund seiner Masse hat er eine kugelförmige Gestalt, wobei diese dennoch nur 1/6390 Erdmassen beträgt. Seine Dichte beträgt 2,077 g/cm<sup>3</sup>. Ceres rotiert in rund 9 Stunden um seine Achse. Die Durchschnittstemperatur am Äquator beträgt -110°C.

Die mittlere Entfernung des Zwergplaneten Ceres von der Sonne beträgt 414,09 Millionen km, was 2,768 AE entspricht. Damit liegt er in etwa in der sogenannten Wassereisgrenze. Jenseits dieser Grenze, in Richtung äußeres Sonnensystem, sind die Temperaturen niedrig genug, damit Eis nicht mehr sublimiert.

Ceres besitzt eine dunkle kohlenstoffreiche Oberfläche, welche eine Albedo (Rückstrahlungsvermögen) von 0,09 aufweist. Die gesamte Oberfläche ist gleichmäßig mit Regolith

(zertrümmertes, pulverisiertes Oberflächenmaterial) bedeckt. Des Weiteren ist die Oberfläche mit Kratern übersät, wobei der größte Krater einen mittleren Durchmesser von 280 km hat. Es gibt auch Krater, dessen Seitenwände etwa 2 km hinaus ragen. Allerdings ist die Anzahl an großen Kratern geringer als erwartet. Einer These nach verfügt Ceres über eine elastisch-zähe Oberfläche, welche die großen Kraterstrukturen kompensiert. In der Nähe des Äquators wurde durch die Raumsonde Dawn ein kuppelförmiger Kryovulkan entdeckt, welcher etwa 4 km hoch hinaus ragt und aus Chloriden, Mineralien und Wassereis besteht. Es gibt auch große Becken (größere Impaktstrukturen) mit Durchmessern von bis zu 750 km sowie dunkle und helle Flecken auf Ceres. Bei den hellen Flecken könnte es sich um Salzablagerungen von Natriumcarbonat mit kleinen Anteilen von Silikatmineralien sowie Ammoniumcarbonat oder -chlorid handeln.

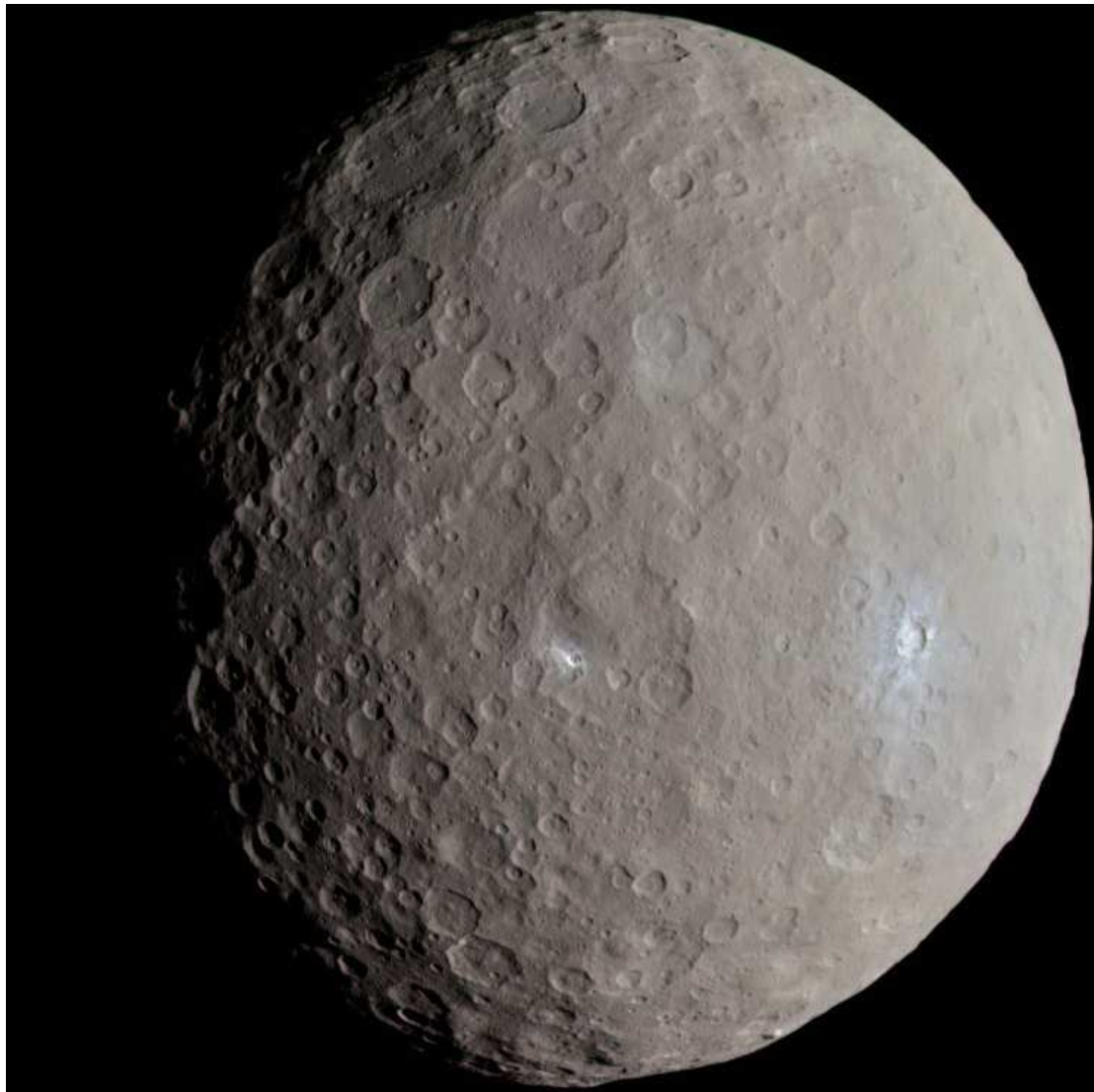


Bild 1: Der Zwergplanet Ceres / NASA

Der Zwergplanet Ceres dürfte aus einem Kern, einem Mantel und einer Kruste bestehen. Die Kruste dürfte aus leichten Materialien und Wassereis bestehen, der Kern aus Silikaten und Metallen. Die Differenzierung im Aufbau dürfte durch die Freisetzung von thermischer Energie aufgrund des radioaktiven Zerfalls eines Aluminium-Isotops zustande kommen. Dadurch könnte sich unter anderem ein äußerer Mantel aus flüssigem Wasser gebildet haben, dessen äußere zehn Kilometer allerdings gefroren sind. Insgesamt zu 17 bis 27 Gewichtsprozent dürfte Ceres aus Wasser bestehen. Das wäre etwa das Fünffache der Süßwasservorkommen auf der Erde. Des Weiteren wird auch Wasserdampf freigesetzt, besonders in Sonnennähe des Zwergplaneten auf seiner elliptischen Bahn.

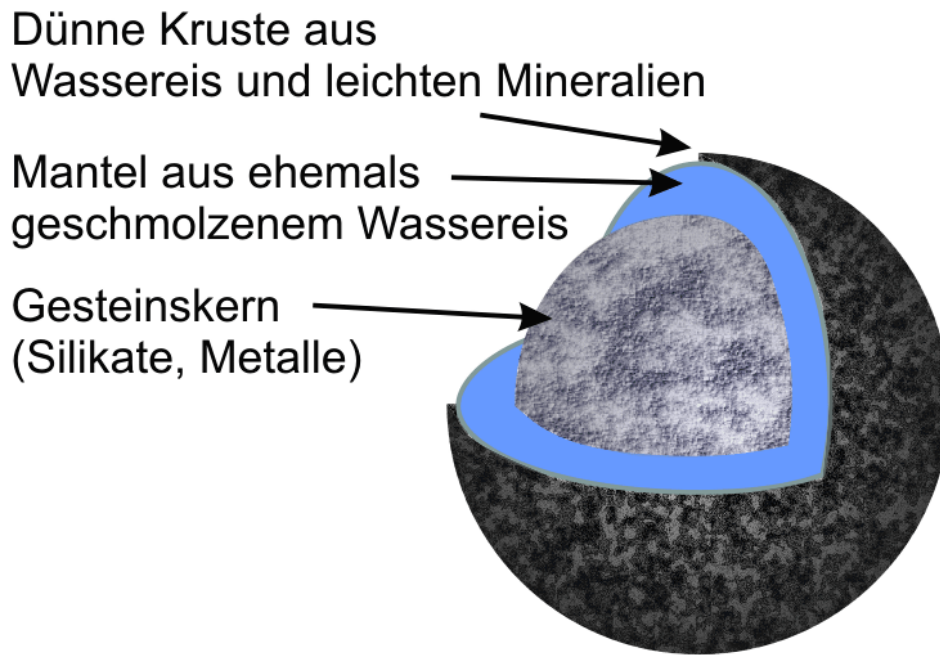


Bild 2: Der Aufbau von Ceres / Wikipedia.org

Das aus dem Zwergplanet Ceres kein Planet wurde, dürfte auf den gravitativen Einfluss des Jupiters zurückzuführen sein. Nach der regelmäßigen Reihenfolge der Planeten im Sonnensystem hätten wir dort einen Planeten erwartet. Allerdings verhinderte der Jupiter die weitere Koagulation (Ankleben) und Agglomeration (Anwachsen) von Masse.

Die überwiegende Anzahl der Zwergplaneten befindet sich im Kuipergürtel, welcher sich jenseits der Neptunbahn in einem Abstandsbereich von 30 bis 50 AE von der Sonne entfernt befindet. Eine Untergruppe der Objekte des Kuipergürtels bilden die sogenannten Plutinos. Die Umlaufzeiten von Neptun und der Plutinos stehen in einer 3:2-Resonanz zueinander. D.h. drei Umlaufzeiten des Neptuns um die Sonne entsprechen zwei Umlaufzeiten der Plutinos. Namensgeber für die Plutinos ist der Zwergplanet Pluto. Dieser wurde am 18. Februar 1930 von Clyde William Tombaugh (1906 – 1997) am Lowell-Observatorium in Flagstaff / Arizona (USA) entdeckt und galt bis zur Einführung der Klasse der Zwergplaneten durch die IAU im August 2006 als neunter Planet im Sonnensystem. Die am 19. Juni 2006 von der NASA (USA) gestartete Sonde „New Horizon“ flog am 14. Juli 2015 am Pluto vorbei. Ab dem Jahr 2019 wird die Sonde an Objekten des Kuipergürtels vorbeifliegen und diese untersuchen.

Der Zwergplanet Pluto ist in Aufbau und Größe dem Neptunmond Triton sehr ähnlich. Sehr wahrscheinlich dürfte der Triton einst ein Zwergplanet im Kuipergürtel gewesen sein und wurde von Neptun eingefangen. Die Entfernung des Pluto von der Sonne schwankt zwischen 4.400 Millionen und 7.300 Millionen Kilometern (29,658 – 49,305 AE). D.h. seine Bahnexzentrizität ist sehr groß und hat einen Wert von  $e = 0,2488$ . Seine mittlere Entfernung von der Sonne beträgt 5.906,4 Millionen km bzw. 39,482 AE. Die Umlaufbahn des Plutos ist um  $17,16^\circ$  gegenüber der Ekliptik geneigt und liegt zeitweise innerhalb der Neptunbahn, welcher eine mittlere Entfernung von rund 30 AE zur Sonne hat. Allerdings ist aufgrund der großen Neigung der Pluto-Bahn eine Kollision mit dem Neptun ausgeschlossen. Für einen Umlauf um die Sonne benötigt der Pluto rund 248 Jahre. Der Pluto hat einen Durchmesser von etwa 2.374 km und gehört damit zu den größeren Zwergplaneten. Im Jahr 1978 wurde der Plutomond Charon entdeckt, welcher einen Durchmesser von 1.200 km hat und in einem Abstand von etwa 20.000 km den Pluto umläuft. In diesem Fall wird

daher auch von einem Doppel-Zwergplaneten gesprochen, ähnlich wie im Falle von Erde und Mond auch von einem Doppelplaneten gesprochen wird. Im Jahr 2005 wurden die Plutomonde Nix und Hydra entdeckt, deren Durchmesser in einem Bereich von 40 bis 160 km angenommen werden. In den Jahren 2011 und 2012 wurde jeweils ein weiterer Minimond entdeckt.

Der Pluto hat eine Masse von etwa 0,0021 Erdmassen und eine Dichte von  $2,1 \text{ g/cm}^3$ . Er rotiert in 6,387 Tagen um seine eigene Achse, wobei diese um  $122,53^\circ$  gegenüber seiner Bahnebene geneigt ist. Pluto besteht aus Gestein bzw. Silikaten (Anteil: etwa 70 Prozent) und Eis (etwa 30 Prozent).

Im Innern des Plutos dürfen sich nach dem derzeitigen Modell aufgrund der durch radioaktive Zerfallsprozesse freigesetzten thermischen Energie eine Kern-Mantel-Struktur ausdifferenziert haben. Der Kern macht etwa 70 Prozent des Pluto-Durchmessers aus und dürfte überwiegend aus Gestein bestehen. Der Mantel, welcher den Kern umhüllt, dürfte überwiegend aus Wassereis bestehen. Im Übergangsbereich zwischen Kern und Mantel könnte sich aufgrund der thermischen Aufschmelzungsprozesse ein noch heute existierender globaler Ozean gebildet haben.

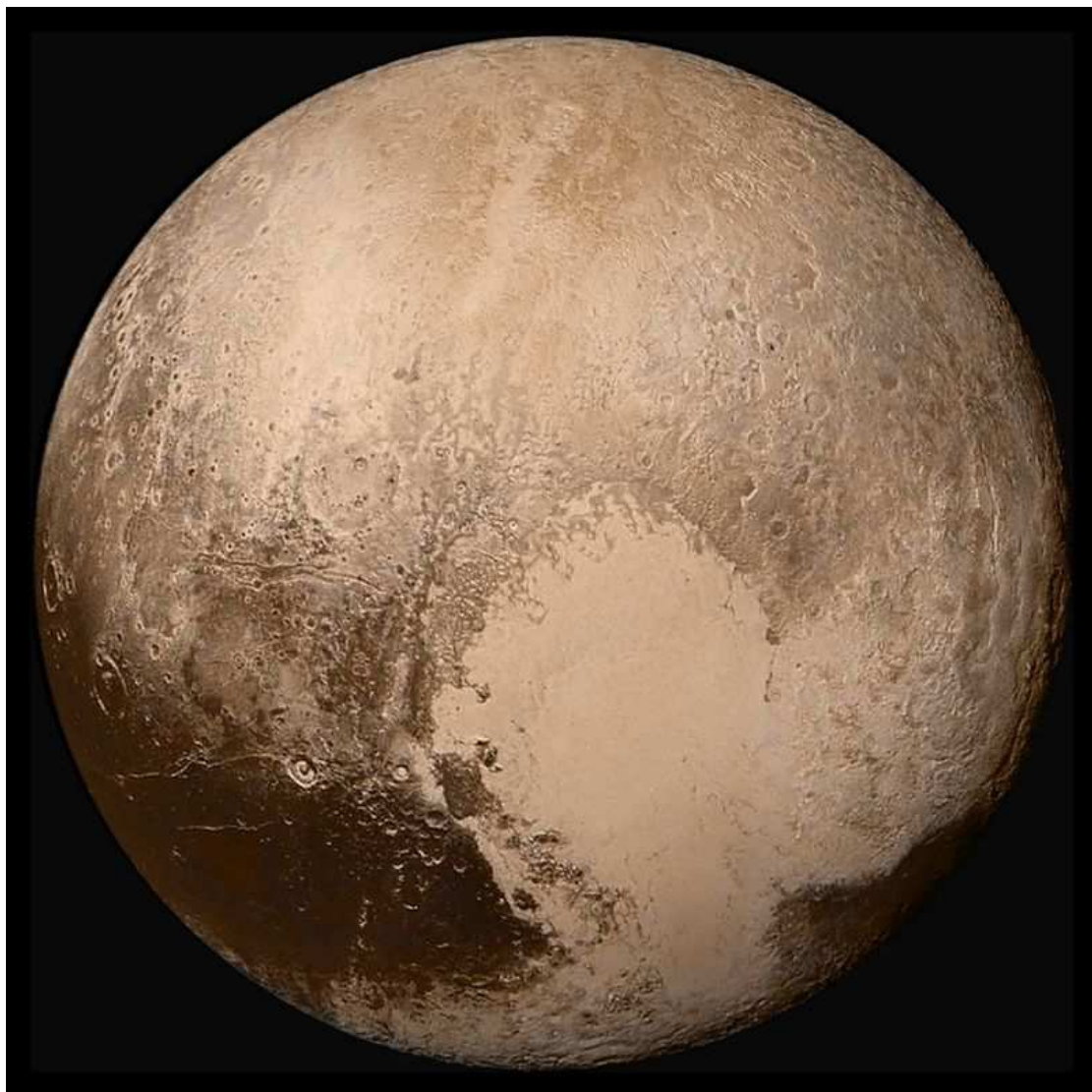


Bild 3: Der Zwergplanet Pluto / NASA

An seiner Oberfläche ist gefrorener Stickstoff vorherrschend, jedoch befinden sich dort auch gefrorenes Ammoniak und Methan. Die Oberflächentemperatur liegt in einem Bereich von  $-213^\circ\text{C}$  im Perihel (sonnennahster Punkt) und  $-223^\circ\text{C}$  im Aphel (sonnenfernster Punkt) seiner Bahn.

Die dünne Atmosphäre des Pluto besteht zum größten Teil aus Stickstoff ( $\text{N}_2$ ) sowie aus geringen Anteilen von Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) und Methan ( $\text{CH}_4$ ). Die Daten über den Atmosphärendruck

und die Höhe der Atmosphäre variieren je nach Messmethoden. Die Raumsonde New Horizon maß einen Atmosphärendruck von 0,5 Pascal (Pa) auf der Plutooberfläche, während erdgebundene Beobachtungen Drücke von bis zu 2,2 Pa ergeben. Absorptionsmessungen durch die Raumsonde New Horizon ergaben eine Atmosphärenhöhe von etwa 1.600 km, erdgebundene Messungen ergeben Höhen von bis zu 3.000 km. Die Unterschiede in den Messwerten dürften daher kommen, dass in verschiedenen Atmosphärenschichten gemessen wurde und verschiedene Gase detektiert wurden. Bis in etwa einer Höhe von 130 km fand die Raumsonde Aerosole der Plutoatmosphäre, welche sich hauptsächlich in zwei Nebelschichten in etwa 50 und 80 km Höhe über der Plutooberfläche konzentrieren. Mittlerweile sind über ein Dutzend Nebenschichten bekannt, wobei sich die erste in unmittelbarer Nähe zur Oberfläche befindet. Zwischen dem Stickstoff in der Plutoatmosphäre und dem Sonnenwind (Teilchenstrahlung von der Sonne, solare Komponente der Kosmischen Strahlung) kommt es zu Wechselwirkungen. Aufgrund dieser wird ionisierter Stickstoff vom Sonnenwind fortgetragen, so dass die Plutoatmosphäre fortlaufend Stickstoff verliert. Ein Ausfrieren der Plutoatmosphäre in Sonnenferne konnte bisher nicht beobachtet werden.

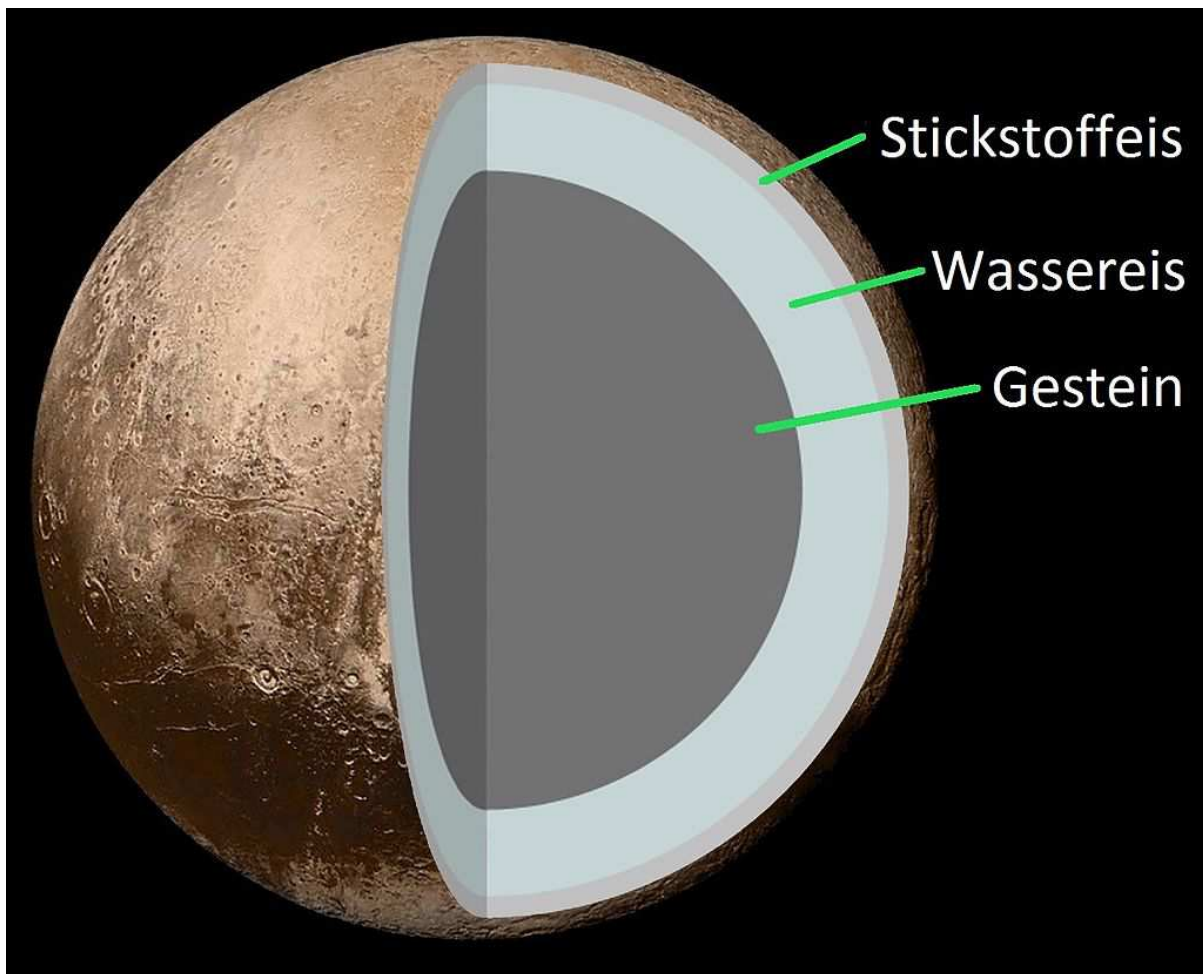


Bild 4: Der Aufbau des Zwergplaneten Pluto / Wikipedia.org

Weitere Zwergplaneten sind u.a. Eris (auch Xena genannt), Orcus, Quaoar, Sedna und Varuna. Der Zwergplanet Eris hat einen Durchmesser von 2.400 km und ist damit etwas größer als Pluto. Er bewegt sich in einem Abstandsbereich zwischen 37,8 und 97,5 AE um die Sonne. Auf dem Zwergplaneten Quaoar konnte im Jahr 2004 kristallines Wassereis auf seiner Oberfläche nachgewiesen werden. Er bewegt sich in einer mittleren Entfernung von 43,5 AE um die Sonne. Sein Durchmesser beträgt etwa 1.250 km. Der Zwergplanet Sedna hat einen Durchmesser von etwa 1.400 km und eine extrem hohe Bahnexzentrizität. Er bewegt sich in einem Abstandsbereich von 76 bis 900 AE um die Sonne.



### 3 Kleinplaneten (Asteroiden bzw. Planetoiden)

Die Planeten des Sonnensystems haben einen regelmäßigen Abstand voneinander. Dies lässt sich mathematisch durch die Titius-Bode-Beziehung ausdrücken:

$$a = 0,4 + 0,3 + 2^n$$

$a$  gibt die große Halbachse der Bahnellipse in AE an, der Exponent  $n$  steht, beginnend bei Merkur, für einen Wert der Folge  $-\infty, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$ .

Nach dieser Beziehung befindet sich zwischen Mars und Jupiter eine große Lücke, wo ein Planet fehlt. Die Suche nach einem mutmaßlichen Planeten führte am 01. Januar 1801 zur Entdeckung von Ceres durch den italienischen Astronomen Giuseppe Piazzi an der Sternwarte Palermo auf Sizilien / Italien. Der entdeckte Himmelskörper war deutlich kleiner als die anderen Planeten und wird seit August 2006 als Zwergplanet klassifiziert. Aufgrund einer Erkrankung konnte Piazzi seine Beobachtungen nicht fortsetzen. Erst am 31. Dezember 1801 wurde der mittlerweile weiter gewanderte Himmelskörper durch Heinrich Wilhelm Olbers (1758 - 1840) wieder entdeckt. Im Jahr 1802 entdeckte er einen weiteren kleinen Himmelskörper, welcher Pallas genannt wurde. Im Jahre 1803 wurden Juno und 1807 Vesta entdeckt. Der fünfte kleine Himmelskörper, Astraea, wurde im Jahr 1845 entdeckt. Bis 1890 wurden bereits 300 entsprechende Objekte entdeckt, mit Stand von Dezember 2016 sind über 725.000 dieser Objekte bekannt.

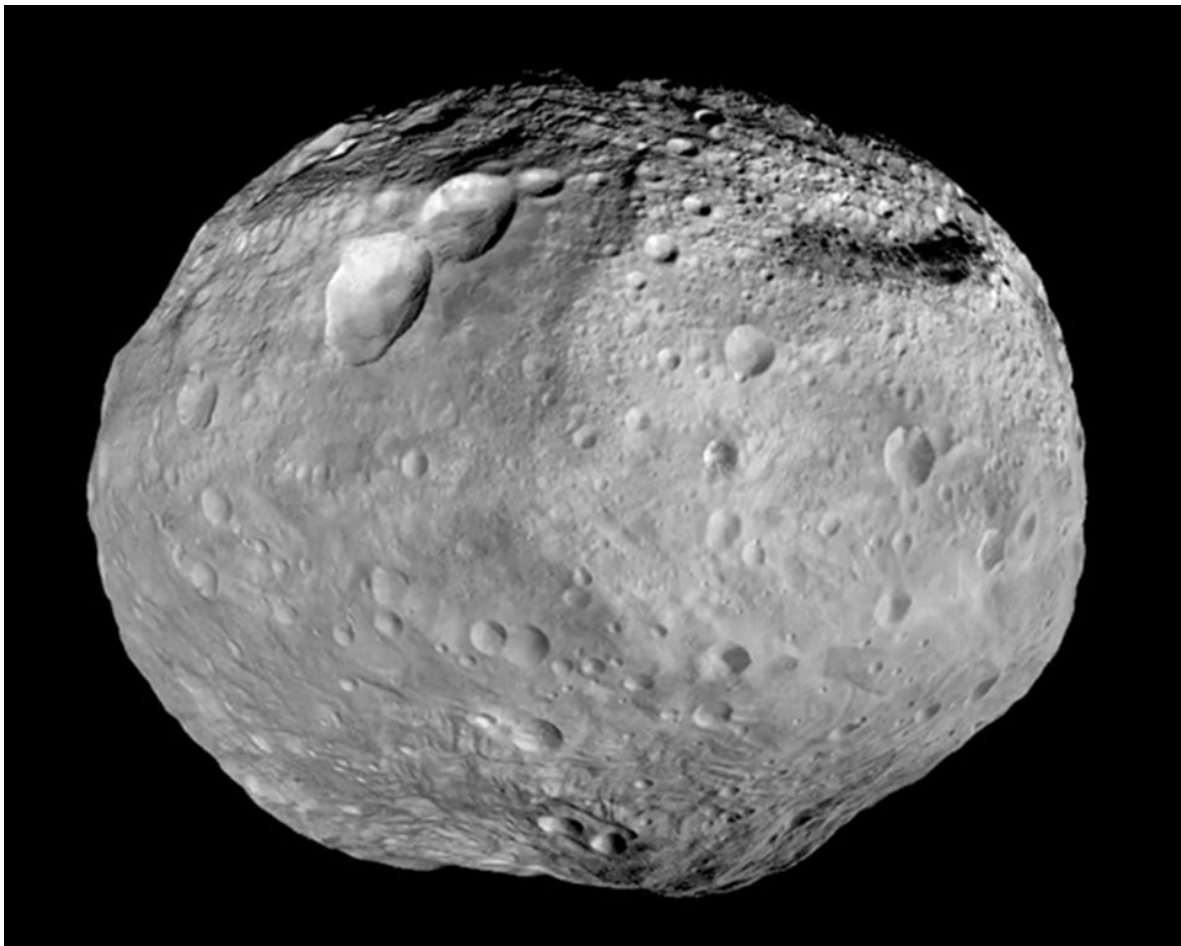


Bild 5: Kleinplanet Vesta / NASA

Diese kleinen Himmelskörper werden als Kleinplaneten, Asteroiden oder Planetoiden bezeichnet. Sie sind definitionsgemäß größer als Meteoroiden jedoch kleiner als Zwergplaneten. Sie befinden sich aufgrund ihrer geringeren Masse nicht in einem hydrostatischen Gleichgewicht und haben daher, im Gegensatz zu den Zwergplaneten, keine kugelförmige Gestalt. Stattdessen sind sie unförmig gestaltet. Ceres ist hier eine Ausnahme. Er gilt nach der Definition der IAU von August

2006 nicht mehr als Kleinplanet, sondern als Zwergplanet. Die Kleinplaneten haben alle Durchmesser von unter 1.000 km, wobei 14 von ihnen Durchmesser von über 250 km haben. Die Gesamtmasse aller Kleinplaneten ist wesentlich geringer als die des Mondes, so dass es sich wohl nicht um die Überreste eines zerstörten Planeten handeln dürfte. Auch die Modelle zu ihrer Entstehung deuten darauf hin, dass sich zwischen dem Mars und dem Jupiter aufgrund des gravitativen Einflusses des massereichen Jupiters kein Planet hätte herausbilden können. Vielmehr dürften die Kleinplaneten Überbleibsel aus der Entstehungszeit des Sonnensystems und aus nicht verbrauchter Materie der damaligen protoplanetaren Scheibe entstanden sein.

Etwa 75 Prozent aller Kleinplaneten befinden sich in einem Gürtel, welcher zwischen Mars und Jupiter lokalisiert ist. Der innere Rand dieses Gürtels ist etwa 2,2 AE, sein äußerer Rand etwa 3,3 AE von der Sonne entfernt. Zum Vergleich: Die mittleren Entfernungen von Mars und Jupiter betragen 1,52 und 5,20 AE. Die Umlaufzeiten der Kleinplaneten im Gürtel um die Sonne liegen zwischen 3,3 und 6 Jahre. Innerhalb des Gürtels gibt es aufgrund von Resonanzeffekten Anhäufungen und Lücken. So gibt es Häufungen bei Umlaufzeiten (welche natürlich bestimmten Abständen von der Sonne entsprechen), die ganzzahligen Vielfachen der Umlaufzeit des Jupiters entsprechen. Diese Häufungen treten bei folgenden Verhältnissen auf: 1:1 (Trojaner), 3:2 (Hilda) und 4:3 (Thule). Die Trojaner sind etwas Besonderes. Sie befinden sich in der Jupiterbahn, in den sogenannten Lagrange-Punkten (L4 und L5). Diese Punkte befinden sich auf der Jupiterbahn und bilden mit dem Jupiter sowie der Sonne immer ein gleichseitiges Dreieck. In diesen Punkten kompensieren sich die gravitativen Anziehungskräfte zwischen dem Jupiter und der Sonne, so dass sich dort die Kleinplaneten stabil auf der Jupiterbahn halten können. Lücken treten wiederum bei folgenden Verhältnisse auf: 2:1 (Hecuba-Lücke), 3:1 (Hestia-Lücke), 5:2 und 7:3.

Neben den Objekten des Gürtels gibt es auch Kleinplaneten mit besonderen Bahnen, welche außerhalb des Kleinplanetengürtels lokalisiert sind. Der Planetoid Hidalgo besitzt eine große Bahnhalbachse von  $a = 5,9$  AE und eine Bahnexzentrizität von  $e = 0,66$ . Das Aphel (sonnenfernster Punkt) seiner Bahn liegt außerhalb der Saturnbahn. Der Kleinplanet Chiron hat eine große Bahnhalbachse von  $a = 13,7$  AE. Das Perihel seiner Bahn liegt außerhalb der Saturnbahn, das Aphel außerhalb der Uranusbahn. Es gibt auch Asteroiden, welche ihr Perihel im Bereich der inneren Planeten des Sonnensystems haben. So befindet sich das Perihel der Bahn des Kleinplaneten Ikarus in einer Entfernung von 0,19 AE zur Sonne und damit im Bereich der Merkurbahn. Es gibt auch Asteroiden, welche die Erdbahn kreuzen. So passiert der Kleinplanet Hermes die Erde in einer minimalen Distanz von 0,004 AE, was in etwa der zweifachen Mondentfernung entspricht. Adonis kommt der Erde bis zu 0,03 AE nahe und Apollo bis zu 0,07 AE. Der Kleinplanet Eros passiert die Erde in einem minimalen Abstand von 0,15 AE. Etwa 200 Objekte, welche der Erde entsprechend nahe kommen, sind bekannt. Die Gesamtzahl von erdbahnnahen Kleinplaneten mit Durchmessern größer als ein Kilometer wird auf 2.000 geschätzt. Zu einer Kollision mit der Erde kommt es statistisch betrachtet etwa alle 100 Millionen Jahre.

Bezüglich der Zusammensetzung der Kleinplaneten werden diese in drei Gruppen unterteilt:

- **C-Kleinplaneten:** Diese sind reich an Kohlenstoff (C). Als Beispiel für einen entsprechenden Planetoiden sei Pallas aufgeführt. Auch der Zwergplanet Ceres, welcher sich im Kleinplanetengürtel befindet, ist reich an Kohlenstoff.
- **S-Kleinplaneten:** Diese bestehen aus Silikaten und verfügen über keine dunklen kohlenstoffhaltigen Verbindungen. Sie haben entsprechende Albedos (Rückstrahlungsvermögen), vergleichbar mit dem irdischen Mond, und reflektieren 16 Prozent des Sonnenlichts.
- **M-Kleinplaneten:** Diese bestehen aus Metallen. Der größte M-Planetoid ist Psyche. Die Menge an Metallen eines ein Kilometer großen M-Asteroiden könnte den irdischen Bedarf an Industriemetallen für Jahrzehnte decken.

Der hellste Asteroid ist die Vesta. Sie hat eine große Halbachse von  $a = 2,36$  AE und einen Durchmesser von 910 km. Sie reflektiert etwa 30 Prozent des ankommenden Sonnenlichts. Die Oberfläche der Vesta besteht aus Basalten, was auf eine vulkanische Aktivität hindeutet. Zumindest dürfte es einen Differenzierungsprozess gegeben haben, da die Vesta wohl aufgeschmolzen war und die schwereren Elemente infolge der Gravitation in das Zentrum des Planetoiden sanken.

Die erste Nahaufnahme eines Asteroiden erfolgte im Jahr 1991 durch die Raumsonde Galileo (NASA / USA), welche auf dem Weg zum Jupiter den Asteroidengürtel durchquerte. Sie fotografierte den S-Kleinplaneten Gaspra. Seine Oberfläche ist etwa 200 Millionen Jahre alt, demnach dürfte dieser Planetoid vor diesem Zeitraum durch eine Kollision entstanden sein. Einige Kleinplaneten dürften das Ergebnis von Kollisionen von größeren Asteroiden gewesen sein. Nach einer These von Hirayama aus dem Jahr 1917 gibt es Familien von Kleinplaneten, welche durch Kollision aus einem größeren Asteroiden entstanden sind.

Einige Kleinplaneten haben auch kleine Begleiter, also Monde bzw. Trabanten. So hat der Planetoid 243 Ida den Begleiter Dactyl. Der Kleinplanet 4.179 Toutatis besteht aus zwei Stücken mit Durchmessern von 2,5 und 1,5 km. Am 12. Februar 2001 kam es zur ersten Ladung einer Raumsonde auf einen Asteroiden. Die Raumsonde NEAR/Shoemaker (NASA / USA) landete weich auf dem Planetoiden Eros.

Aufgrund von zunehmend besseren Beobachtungstechniken werden immer mehr Kleinplaneten entdeckt. Eines Tages dürfte die Zahl der neu entdeckten Objekte die Millionen-Grenze überschreiten. Katalogisiert werden Kleinplaneten zunächst provisorisch durch die Jahreszahl ihrer Entdeckung sowie durch eine Buchstabenkombination für den Halbmonat und die Reihenfolge ihrer Entdeckung. Wenn die Buchstaben für die Reihenfolge der Entdeckung nicht mehr ausreichen, werden Zahlen verwendet. Der erste Buchstabe kennzeichnet die Monatshälfte der Entdeckung. Die erste Hälfte Januar wird also mit A, die zweite Hälfte Januar mit B, die erste Hälfte Februar mit C, usw. bezeichnet. Verwendet werden die Buchstaben A bis Y ohne I (24 Buchstaben, für 24 Monatshälften). Mit dem zweiten Buchstaben A bis Z, ohne I, wird die Reihenfolge der Entdeckung für einen bestimmten halbmonatlichen Zeitraum bezeichnet. A ist also das erste Objekt eines bestimmten Halbmonats. Reichen die Buchstaben nicht aus, so werden einfach Zahlen verwendet. Z.B. bedeutet die Bezeichnung AB eines Planetoiden, dass diese in der ersten Hälfte Januar entdeckt wurde und er das zweite entdeckte Objekt in diesem Zeitraum ist. Endgültig werden Kleinplaneten mit einer Nummer und einem Namen bezeichnet. Z.B. (5535) Annefrank oder (2309) Mr. Spock. Die vorangestellte Nummer gab früher die Reihenfolge der Entdeckung des Kleinplaneten an. Heute ist sie eine rein numerische Zählform, da sie erst vergeben wird, wenn die Bahn des Kleinplaneten gesichert ist.

Als erste Raumsonde flog die von der NASA (USA) am 18. Oktober 1989 gestartete Jupitersonde „Galileo“ an zwei Kleinplaneten vorbei. Am 29. Oktober 1991 flog sie in 1.601 km Entfernung am Kleinplaneten Gaspra und am 28. August 1993 in 2.400 km Entfernung am Kleinplaneten Ida vorbei.

Mit der am 17. Februar 1996 von der NASA (USA) gestarteten Mission „NEAR Shoemaker“ erfolgte die erste Umrundung im Orbit eines Kleinplaneten und Landung auf diesem. Die Raumsonde flog zunächst am 27. Oktober 1997 am Kleinplaneten (253) Mathilde vorbei. Am 14. Februar 2000 schwenkte sie in eine Umlaufbahn um den Kleinplaneten Eros ein, auf dem sie am 12. Februar 2001 landete.

Die am 24. Oktober 1998 gestartete Raumsonde Deep Space I flog am 29. Juli 1999 in nur 26 km Abstand am Kleinplaneten (9969) Braille vorbei. Es wurden zahlreiche Daten gewonnen, jedoch aufgrund einer fehlerhaften Ausrichtung der Kamera keine Nahaufnahmen. Die am 07. Februar 1999 von der NASA (USA) gestartete Kometenmission Stardust flog am 02. November 2002 in 3.300 km Entfernung am Kleinplaneten Annefrank vorbei.

Japan startete am 09. Mai 2003 die Mission „Hayabusa 1“, in deren Rahmen erstmals Bodenproben

von einem Kleinplaneten zur Erde gebracht wurde. Am 12. September 2005 erreichte die Raumsonde den Kleinplaneten (25143) Itokawa und nahm dort Bodenproben. Eine geplante Landung mit dem Lander „Minerva“ scheiterte jedoch. Der Rückflug mit den Bodenproben verzögerte sich aufgrund technischer Probleme um drei Jahre. Am 13. Juni 2010 erfolgte die erfolgreiche Landung der Rückkehrkapsel mit den Bodenproben auf der Erde, die Landung erfolgte in Australien.

Die am 27. September 2007 von der NASA (USA) gestartete Mission „Dawn“ lieferte Erkenntnisse über den Aufbau des Kleinplaneten Vesta. Die Sonde umkreiste und erforschte diesen Kleinplaneten von Juni 2011 bis September 2012. Dabei wurde festgestellt, dass der Kleinplanet Vesta einen ähnlichen Schichtaufbau wie die terrestrischen Planeten hat. Am 05. September 2012 verließ die Raumsonde Dawn den Kleinplaneten Vesta und befindet sich seit dem 06. März 2015 in einer Umlaufbahn um den Zwergplaneten Ceres.

Mit der am 01. Oktober 2010 gestarteten chinesischen Mission „Chang`e-2“ erfolgte am 13. Dezember 2012 ein Vorbeiflug in 3,2 km Entfernung am erdnahen Kleinplaneten (4179) Toutatis. Zuvor umkreiste die Raumsonde rund acht Monate den Mond und hielt sich etwa 10 Monate in einem Lagrangepunkt (L2) im System Erde – Sonne auf.

Die am 03. Dezember 2014 von Japan gestartete Mission „Hayabusa 2“ ist die Nachfolge Mission von „Hayabusa 1“. Sie soll den Kleinplaneten (162173) Ryugu umkreisen, den von der DLR gebauten Lander „MASCOT“ absetzen sowie eine Bodenprobe entnehmen und zur Erde zurückbringen.

Am 08. September 2016 startete die NASA (USA) die Mission „OSIRIS-REx“. Die Raumsonde soll zum erdnahen Kleinplaneten (101955) Bennu fliegen, eine Bodenprobe entnehmen und zur Erde zurückbringen.

Die NASA (USA) plant für den Zeitraum von 2018 bis 2023 mindestens vier weitere Missionen. Auch andere Nationen planen weitere Missionen zu den Kleinplaneten. Da Kleinplaneten aus der Anfangszeit des Sonnensystems stammen, könnten so Erkenntnisse über die Entstehung und Anfangsentwicklung des Sonnensystems gewonnen werden.

## 4 Kometen

Kometen sind bereits seit dem Altertum bekannt und galten als Unglücksboten. Sie tauchen plötzlich auf und verschwinden wieder, womit sie sich gegensätzlich zu den bekannten Fixsternen und den sich regelmäßig bewegenden Wandelsternen (Planeten) verhalten. Sie können überall am Himmel auftauchen, sind also grundsätzlich nicht in bestimmten Bahnebenen lokalisiert. Dennoch gibt es auch sogenannte kurzperiodische Kometen mit Umlaufzeiten von bis zu 200 Jahren, welche regelmäßig wiederkehren und deren Bahnen sich in etwa in der Ebene der Planetenbahnen befinden. So kam Edmund Halley (1656 - 1742) durch Berechnungen im Jahre 1705 zu der Schlussfolgerung, dass es sich bei den Kometen-Sichtungen von 1531, 1607 und 1682 um denselben Kometen handelt, welcher alle 76 Jahre seinen sonnennächsten Punkt (Perihel) erreicht. Der Komet wurde nach Halley benannt, so dass dieser die Bezeichnung Halleyscher Komet trägt. Die erste bekannte Sichtung dieses Kometen geht auf das Jahr 239 v. Chr. zurück, die letzten Durchgänge des Halleyschen Kometen durch das Perihel seiner Bahn waren in den Jahren 1910 und 1986. Sein nächster wird im Jahr 2061 sein.

Heute wissen wir, dass Kometen Objekte des Sonnensystems sind, stark elliptische Bahnen haben und aus Materie der pro-planetaren Scheibe in der Anfangszeit des Sonnensystems entstanden sein dürften.

Die Kometen bestehen aus einem Kern, der von einer Koma (Atmosphäre des Kometen) umgeben ist sowie einem Ionen- und Staubschweif. Für den Kern des Kometen wurde bereits im Jahre 1950 von Fred Whipple (1906 – 2004) der Begriff „Schmutziger Schneeball“ geprägt. Er besteht

hauptsächlich aus Wassereis ( $\text{H}_2\text{O}$ ), Trockeneis (gefrorenes Kohlenstoffdioxid  $\text{CO}_2$ ), Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), Methan ( $\text{CH}_4$ ) sowie Beimengungen von Mineral- und Staubteilchen. Bei der Annäherung an die Sonne verflüchtigen sich Wasserdampf und andere leicht flüchtige Stoffe, wie Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ), aus dem Kern, bilden sowohl die Koma als auch den Kometenschweif. Die Koma besteht dabei hauptsächlich aus Wasserstoff (H) und Kohlenstoffdioxid. Durch die spaltende Wirkung der ultravioletten Strahlung von der Sonne werden die Wassermoleküle aufgespalten und es bilden sich riesige Wolken aus Wasserstoff um den Kometen herum. Aufgrund der Wechselwirkung zwischen den Teilchen des Kometenschweifes und des sogenannten Sonnenwindes (Teilchenstrahlung von der Sonne) ist der Schweif von der Sonne weggerichtet. Die Kerne von Kometen haben Durchmesser von etwa 1 bis 50 km, die Koma schon eine Ausdehnung im Bereich von 100.000 km. Der Kometenschweif kann Längen von mehreren Millionen bis mehreren Hundertmillionen km erreichen. Die Staubteilchen im Schweif bewegen sich in Kernnähe mit höherer Geschwindigkeit als in Kernferne. Dies führt zu einer wahrnehmbaren Krümmung des Schweifs. Während der Staubschweif breit und diffus ist, ist der Ionenschweif dünn und lang.



Bild 6: Der Halleysche Komet / NASA

Die Kometen verlieren bei ihren Durchläufen in Sonnennähe jedes Mal Materie und lösen sich irgendwann einmal ganz auf. Dieser Auflösungsprozess schreitet allerdings sehr langsam voran und dauert daher sehr lange. Dabei verteilt sich auch Kometenstaub auf der Bahn des Kometen. Irgendwann löst sich der Komet daher auf oder zerbricht vorher in mehrere Teile. Der Komet West zerbrach im Jahr 1976 in vier Teile. Der Komet Schoemaker-Levi zerbrach im Jahre 1993 in 20 Teile, welche im Jahr 1994 auf den Jupiter stürzten. Dabei wurde eine Energie von 100 Millionen Megatonnen TNT frei.

Unterschieden wird zwischen kurzperiodischen Kometen mit einer Umlaufzeit von bis zu 200 Jahren und langperiodischen Kometen mit einer Umlaufzeit von mehr als 200 Jahren. Streng genommen ist das Kriterium von 200 Jahren willkürlich gewählt worden. Sinnvoller dürfte eine Unterscheidung der Kometen nach ihrer Herkunft sein, ob sie aus dem Kuipergürtel stammen oder aus der Oort'schen Wolke. Die Unterscheidung wäre anhand der Bahn des Kometen möglich. Nachfolgend wird zunächst auf den Kuipergürtel eingegangen, anschließend auf die Oort'sche Wolke.

Der Kuipergürtel liegt jenseits der Neptunbahn, in einem Entfernungsbereich von 30 bis 50 AE von der Sonne. Bereits im Jahr 1943 hat Kenneth Edgeworth (1880 – 1972) als erster die These aufgestellt, dass sich jenseits der Bahn des Pluto ein Gürtel befinden könnte, welcher aus zahlreichen Kometen besteht. Mit dieser These hat sich der Astronom Gerald Kuiper (1905 – 1973) im Jahre 1951 genauer beschäftigt. Im Jahr 1980 wurden konkrete Modelle berechnet und im Jahr 1992 wurde das erste Objekt des Gürtels gefunden, welcher nach Gerald Kuiper benannt wurde. Derzeit sind etwa 100 Objekte des Gürtels bekannt. Schätzungen gehen davon aus, dass die Gesamtzahl aller Objekte mit Durchmesser von mehr 100 km im Kuipergürtel bei etwa 100.000 liegt. Die Objekte des Kuipergürtels bestehen aus Eis und Silikaten. Dabei handelt es sich um Zwergplaneten und Kleinkörper. Die Objekte des Kuipergürtels können in drei Gruppen unterteilt werden:

- **Gewöhnliche Objekte:** Zweidrittel aller Objekte bewegen sich in einem Abstandsbereich von 42 bis 47 AE um die Sonne und bilden keine Bahnresonanzen mit anderen Objekten.
- **Resonanz-Objekte:** Die überwiegende Anzahl dieser Objekte befinden sich in einer Bahnresonanz zum Neptun. Wenn z.B. der Neptun die Sonne dreimal umkreist hat, dann haben die entsprechenden Objekte des Kuipergürtels die Sonne zweimal umkreist. Daher wird auch von einer 3:2-Resonanz gesprochen. Zu diesen Objekten gehört unter anderem der Zwergplanet Pluto, so dass im Falle einer 3:2-Resonanz mit dem Neptun auch von sogenannten Plutinos gesprochen wird.
- **Scattered-Kupier-Belt-Objekte (KBO):** Diese Objekte verfügen über extreme Bahnen, weichen also deutlich von den Bahnen der übrigen Objekte im Kuipergürtel ab. Bisher sind allerdings nur wenige dieser Objekte entdeckt worden. So hat das Objekt TL66 eine Periheldistanz von 30 AE zur Sonne und eine Apheldistanz von 84 AE. Für einen Umlauf um die Sonne benötigt das Objekt rund 800 km.

Nach einer Theorie der Astronomen Konstantin Batygin und Michael E. Brown vom California Institute of Technology (Caltech), welche am 19. Januar 2016 veröffentlicht wurde, könnten die Scattered-Kupier-Belt-Objekte auf einen neunten Planeten im Sonnensystem hinweisen. Nach dieser These würde es sich um einen Eisplaneten mit etwa 10 Sonnenmassen handeln, welcher im Aufbau vergleichbar mit Uranus und Neptun sein könnte. Dieser Planet würde die Sonne in einem Entfernungsbereich von 30 Milliarden Kilometern (Perihel) bis 180 Milliarden Kilometern (Aphel) umkreisen. Für einen Umlauf um die Sonne benötigt der hypothetische Planet 10.000 bis 20.000 Jahre. Aufgrund der gerichteten Ausrichtung der Bahnen der Scattered-Kupier-Belt-Objekte geht die These von dem gravitativen Einfluss eines Planeten mit entsprechender Masse aus, doch noch wurde dieser hypothetische Planet nicht gefunden.

Der Kuipergürtel ist in der Ebene der Planetenbahnen lokalisiert und dürfte die Quelle für die kurzperiodischen Kometen sein. Die kurzperiodischen Kometen sind in der Regel auch in der Ebene der Planetenbahnen lokalisiert.

Die Oort'sche Wolke wurde im Jahr 1950 vom niederländischen Astronomen Jan Hendrik Oort (1900 – 1992) postuliert, jedoch aufgrund ihrer großen Entfernung von der Sonne bis heute nicht direkt nachgewiesen. Sie befindet sich in einem Entfernungsbereich von 30.000 bis 100.000 AE von der Sonne, mit einer Häufung von Kometen in etwa 50.000 AE Entfernung. Die Oort'sche Wolke dürfte nach statistischen Überlegungen aus etwa  $10^{12}$  Kometen bestehen und ist sphärisch (kugelförmig) angeordnet. Die Existenz der Oort'schen Wolke gilt trotz des fehlenden direkten Nachweises als gesichert. Folgende Beobachtungstatsachen sprechen dafür:

- Bisher wurde kein Komet entdeckt, welcher von außerhalb des Sonnensystems, also aus dem interstellaren Raum kam. D.h. es wurde kein Komet mit einer hyperbolischen Bahn bzw. Geschwindigkeit entdeckt. Bei allen Kometenbahnen handelt es sich um Ellipsen.
- Die sonnenfernsten Punkte (Aphelien) vieler langperiodischer Kometen dürfte in einem Bereich von 50.000 AE liegen.
- Es gibt keine Hauptrichtung der Kometen.

Aufgrund der sphärischen Gestalt der Oort'schen Wolken können langperiodische Kometen überall an der Himmelskugel erscheinen und sind nicht in der Ebene der Planetenbahnen lokalisiert. Die Oort'sche Wolke ist ein Überbleibsel aus der Entstehungszeit des Sonnensystem und besteht aus Materie der proto-planetaren Scheibe, aus der vor zirka 5 Milliarden Jahren das Sonnensystem entstand. Des Weiteren bildet die Oort'sche Wolke den äußersten Rand des Sonnensystems.

Kometen mit ähnlichen Entfernungen im sonnenfernsten Punkt (Aphel) werden zu Kometenfamilien zusammengefasst. Wenn diese Aphelien in der Nähe einer bestimmten Kometenbahn liegen, dann wird diese Familie dem entsprechenden Planeten zugerechnet. Planetare Kometenfamilien dürften aufgrund der gravitativen Wechselwirkungen mit diesen Planeten entstanden sein, welche zu entsprechenden Störungen und Veränderungen der Bahnen der Kometen führen. Zur Jupiterfamilie gehören über 70 Kometen, zur Saturnfamilie 5 bis 6, zur Uranusfamilie 3 und zur Neptunfamilie 9 Kometen. Zur letzteren gehört der Halleysche Komet. Des Weiteren werden Kometen mit nahezu übereinstimmenden Bahnelementen zu Kometengruppen zusammengefasst. Die Mitglieder solcher Kometengruppen dürften durch den Zerfall eines größeren Kometen entstanden sein.

Kometenbahnen werden nicht nur durch gravitative Einflüsse gestört. Die von einem Kometenkern abströmenden Gasmassen und die Staubfontänen, welche in Sonnennähe auftreten, können zu einem Rückstoß führen, welche die Kometenbahn stören und verändern.

Ursprünglich wurden Kometen durch das Entdeckungsjahr, die Reihenfolge der Entdeckung (gekennzeichnet durch einen Buchstaben des Alphabets) und den Namen des Entdeckers gekennzeichnet. So bedeutet zum Beispiel die Bezeichnung 1975 n West, dass es sich um den 14. (n ist der 14. Buchstabe) im Jahr 1975 entdeckten Kometen handelt. Der Entdecker hieß mit dem Nachnamen West. Dabei handelte es sich um den dänischen Astronomen Richard Martin West (geb. 1941). Heute werden Kometen durch ihre Bahnform (Großbuchstaben), das Entdeckungsjahr, den Entdeckungszeitraum nach Halbmonaten gegliedert (A – Y, ohne I), die Reihenfolge ihrer Entdeckung (Zahlen) und die Anzahl ihrer Periheldurchgänge katalogisiert. Der Name des Entdeckers wird in Klammern hinter dieser Bezeichnung eingefügt. Im Falle der Bahnformen wird wie folgt unterschieden: C = langperiodischer Komet, P = kurzperiodischer Komet, X = Bahnform ist nicht bestimmbar oder unbekannt, D = kurzperiodischer Komet, welcher verloren ging und nicht mehr existiert und A = nachträgliche Feststellung, dass es sich nicht um einen Kometen, sondern um einen Asteroiden handelt. Für die Halbmonate und Entdeckungsreihenfolge gelten die entsprechenden Regeln wie im Falle für Kleinplaneten: Vorangestellt werden ein Buchstabe für die Bahnform des Kometen und die Jahreszahl der Entdeckung. Dann folgt ein Buchstabe für den Halbmonat der Entdeckung. Die erste Hälfte Januar wird also mit A, die zwei Hälfte Januar mit B, die erste Hälfte Februar mit C, usw. bezeichnet. Verwendet werden die Buchstaben A bis Y ohne I (24 Buchstaben, für 24 Monatshälften). Mit einer Zahl wird Reihenfolge der Entdeckung bezeichnet. Nr. 1 ist also das erste Objekt eines bestimmten Halbmonats. Nach den aktuellen Regeln der Kometen-Katalogisierung lautet die Bezeichnung für den Kometen West: C/1975 V1 (West). Es handelt sich also um einen langperiodischen Kometen, welcher in der ersten Hälfte des Novembers des Jahres 1975 entdeckt wurde und das erste Objekt in diesem Halbmonat war.

Die erste Raumsonde, welche an Kometen vorbei flog, wurde am 12. August 1978 von der NASA (USA) gestartet. Zunächst erforschte die Sonde unter dem Namen „International Sun Earth Explorer-3“ („ISEE-3“) die Wechselwirkung des Erdmagnetfeldes mit der Sonne. Danach wurde die Sonde unter dem Namen „International Cometary Explorer“ („ICE“) auf einen neuen Kurs gebracht, welcher an zwei Kometen vorbeiführte. Am 11. September 1985 flog sie in 7.800 km Abstand am Kometen Giacobini-Zinner vorbei und näherte sich im März 1986 dem Halleyschen Kometen auf 31 Millionen km an.

Ebenfalls am Halleyschen Kometen vorbei flogen die sowjetischen Raumsonden „VEGA 1“ und „VEGA 2“. Die Raumsonde VEGA 1 wurde am 15. Dezember 1984 gestartet, flog am 11. Juni 1985 zunächst an der Venus und am 06. März 1986 in 8.890 km Entfernung am Halleyschen Kometen vorbei. VEGA 2 wurde am 21. Dezember 1984 gestartet, flog zunächst am 14. Juni 1985 an der Venus und am 09. März 1986 in 8.030 km am Halleyschen Kometen vorbei.

Japan schickte im Jahr 1985 zwei Raumsonden auf den Weg zu Kometen, sie erreichten allerdings beide nur einen Vorbeiflug am Halleyschen Kometen. Die am 08. Januar 1985 gestartete Sonde „Sakigake“ flog am 11. März 1986 in sieben Millionen km Entfernung am Halleyschen Kometen vorbei. Am 18. August 1985 wurde die Raumsonde „Suisei“ auf den Weg gebracht. Sie flog am 08. März 1986 in 151.000 km Entfernung am Kometen Halley vorbei. Beide Sonden sollten jeweils zu zwei weiteren Kometen fliegen. Sakigake zu Hondo-Mrkos-Pajdusakova und Giacobini-Zinner, Suisei zu Temple-Tuttle und ebenfalls zu Giacobini-Zinner. Diese Missionen konnten jedoch aufgrund von Treibstoffmangel der Raumsonden nicht mehr realisiert werden.

Die erfolgreichste Mission zum Halleyschen Kometen war die Raumsonde „Giotto“ von der ESA (Europa), welche am 02. Juli 1985 gestartet wurde. Am 14. März 1986 flog sie in einem Abstand von nur 596 km am Halleyschen Kometen vorbei. Erstmals konnte ein Kometenkern aus der Nähe beobachtet werden. Der Kern des Halleyschen Kometen hat die Form einer Erdnuss und einen Durchmesser von etwa 15 km. Seine Oberfläche ist pechschwarz, da sie von einer Rußschicht bedeckt ist. An einzelnen Stellen konnte beobachtet werden, wie Gas- und Staubfontänen in den Weltraum schossen.



Bild 7: Der Halleysche Komet mit Kern von der Raumsonde Giotto fotografiert /ESA

Die Raumsonde „Deep Space 1“ wurde am 24. Oktober 1998 von der NASA (USA) gestartet. Sie flog am 29. Juli 1999 in nur 26 km Abstand am Kleinplaneten „9969 Braille“ vorbei und am 22. September 2001 in knapp über 2.000 km Entfernung am Kometen „19P / Borrelly“. Auch von



dieser Mission erreichten zahlreiche Aufnahmen die Erde. Der Kometenkern hat ebenfalls die Form einer Erdnuss. Auf seiner Oberfläche gibt es flache Ebenen und gebirgsartige Erhebungen. An einzelnen Stellen schossen Gasfontänen heraus.

Mit der am 07. Februar von der NASA (USA) gestarteten Mission „Stardust“ wurde erstmals erfolgreich Kometenstaub eingefangen und konnte zur Erde gebracht werden. Zunächst flog Stardust am 02. November 2002 in nur 3.300 km Entfernung am Kleinplaneten Annefrank vorbei. Ziel der Mission war der Komet Wild 2, welcher am 02. Januar 2004 in nur 240 km Entfernung von Stardust passiert wurde. Dabei schoss Stardust mehrere Aufnahmen und sammelte Kometenmaterie ein. Dieses Material wurde mit Hilfe einer Landeskapsel zur Erde gebracht. Sie wurde am 15. Januar 2006 abgesetzt und landete mit Hilfe eines Fallschirms in der Wüste von Utah / USA. In einer erweiterten Mission wurde am 14. Februar 2011 der Komet Tempel 1 passiert und der durch die nachfolgend beschriebene Mission „Deep Impact“ erzeugte künstliche Impaktkrater fotografiert.

Die am 12. Januar 2005 von der NASA (USA) gestartete Mission „Deep Impact“ setzte am 04. Juli 2005 ein 372 kg schweres Projektil aus Kupfer aus, welches im freien Fall mit einer Geschwindigkeit von 37.000 km/h auf den Kometen 9P / Tempel 1 aufschlug, eine Explosion mit einer Sprengkraft von etwa fünf Tonnen TNT auslöste und einen Krater auf der Oberfläche des Kometen erzeugte. Das bei der Explosion herausgeschleuderte Material wurde mit den Instrumenten von Deep Impact sowie von erdgebundenen und im Weltraum befindlichen Teleskopen untersucht. In der erweiterten Mission EPOXI flog die Raumsonde im Jahr 2010 in einem Abstand von 700 km am Kometen 103P/Hartlev vorbei.

Mit der am 02. März 2004 von der ESA (Europa) gestarteten Mission „Rosetta“ wurde erstmals ein Kometen-Orbiter mit einem Landegerät auf den Weg gebracht. Missionsziel war der Komet 67P / Tschurjumow-Gerasimenko, welcher zur sogenannten Jupiterfamilie gehört. Das Aphel seiner Bahn liegt in 5,7 AE und sein Perihel liegt in 1,2 AE Entfernung zur Sonne, also damit in der Nähe der Erdbahn. Am 06. August 2014 erreichte Rosetta den Kometen und schwenkte in eine Umlaufbahn um diesen ein. Dabei hielt die Raumsonde einen Abstand von 100 km ein. Bereits bei der Annäherung der Sonde wurde festgestellt, dass der Kern aus zwei Teilen besteht. Die zwei Kernteile, der größere hat einen Durchmesser von 4 km und der kleinere einen von 2,5 km, sind durch eine schmale Zone miteinander verbunden. Kometenkerne haben Dichten, welcher kleiner als  $1 \text{ g/cm}^3$  sind. Sie müssen daher aus lockerem, porösem Material bestehen und im Inneren Hohlräume besitzen. Aufgrund ihrer Dichte würden Kometenkerne in einem Ozean schwimmen können. Die Raumsonde Rosetta verfügte über eine Weitwinkelkamera (ORBIS) sowie über zehn Apparaturen bzw. Detektoren zur Erfassung von Daten, wie die chemische Zusammensetzung der Gase in der Koma und ihrer physikalischen Parameter, die Zusammensetzung und Größe der Staubteilchen, die Auswirkungen des Sonnenwindes auf die Oberfläche des Kerns und die vollständige Kartierung dieser Oberfläche.

Im November 2014 näherte sich Rosetta dem Kern des Kometen auf fünf Kilometer an und trennte sich am 12. November 2014 von dem Lander „Philae“. Sieben Stunden nach der Trennung setzte Philae erstmals auf der Oberfläche von 67P / Tschurjumow-Gerasimenko auf. Aufgrund der geringen Gravitationskraft waren verschiedene Festhaltesysteme notwendig. Durch Kaltgastriebwerke sollte der Lander an die Oberfläche des Kometenkerns gedrückt werden. Des Weiteren gab es Harpunen, welche Haken in die Oberfläche schießen konnten und Schrauben, welche sich in den Boden bohren konnten. Alle drei Systeme versagten und Philae wurde trotz der langsamen Landung durch den Aufprall zweimal zurückgestoßen, bevor er beim dritten Mal in Schräglage auf der Oberfläche stehen blieb. Der nicht vorgesehene Landeplatz war ungünstig, da er nur zwei Stunden Sonne bei einer Rotation des Kometenkerns von 12,5 Stunden erhielt. Dies reichte nicht aus, um die Akkus (Sekundärbatterien) des Landers aufzuladen. Die Primärbatterien waren nach etwa 64 Stunden erschöpft. Trotz dieser Panne konnten wertvolle Daten gewonnen

werden. Die Oberfläche des Kometenkerns ist von einer etwa 20 Zentimeter dicken Staubschicht bedeckt. Die Temperatur betrug zur Zeit der Landung etwa  $-170^{\circ}\text{C}$ . Bei dieser Temperatur ist Eis so hart wie Stein. Nachdem der Lander aufgrund erschöpfter Akkus die Tätigkeit eingestellt hatte, umflog Rosetta weiter den Kometen in einer Umlaufbahn. Rosetta diente auch als Relaisstation für den Lander. D.h. der Lander sendete seine Daten zunächst zu Rosetta, von dort aus wurden sie dann zur Erde gesendet. Die Abstände von Rosetta wurden im Laufe der Missionszeit zwischen einigen 10 Kilometern und dann wieder auf bis zu 100 Kilometer variiert. Mit zunehmender Annäherung an der Sonne bildete sich eine rund 100.000 km große Koma um den Kometenkern aus. In ihr wurden neben Wasserdampf ( $\text{H}_2\text{O}$ ) auch Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), Methan ( $\text{CH}_4$ ), Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ), und Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) als Bestandteile detektiert. Doch auch Natriumdampf ( $\text{Na}$ ), Magnesiumdampf ( $\text{Mg}$ ), Methanoldampf ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) und komplexere Kohlenwasserstoffe wurden detektiert. Aminosäuren wurden nicht entdeckt. Des Weiteren wurde festgestellt, dass das Verhältnis von Wasserstoff ( ${}^1\text{H}^1$ ) zu schwerem Wasserstoff „Deuterium“ ( ${}^1\text{H}^2$  bzw.  ${}^1\text{D}^2$ ) in der Kometenmaterie größer als im irdischen Wasser ist. Die Verschiedenheit wäre ein Indiz dafür, dass das Wasser der irdischen Ozeane nicht überwiegend von Kometeneinschlägen herrührt.

Das Perihel seiner Bahn durchflog Komet 67P / Tschurjumow-Gerasimenko am 13. August 2015. Durch die Sonnennähe wurde auch ein erfolgreiches Aufladen der Sekundärbatterien von Philae erhofft. Tatsächlich sendete der Lander Philae nach rund sieben Monaten Pause am 13. Juni 2015 erstmals wieder Signale. Zu dieser Zeit war die Temperatur auf der Oberfläche des Kometen bereits auf  $-30^{\circ}\text{C}$  angestiegen. Bei der Landung von Philae hatte sie noch  $-170^{\circ}\text{C}$  betragen. Allerdings gelang es nicht mehr, eine zuverlässige Kommunikation mit dem Lander aufzubauen. Nachdem der Komet das Perihel seiner Bahn durchflogen hatte, entfernte er sich wieder von der Sonne. Am 30. September 2016 wurde die Mission von Rosetta beendet, indem die Sonde kontrolliert zum Absturz auf den Kometen gebracht wurde. Kurz vor dem Aufprall wurden Nahaufnahmen vom Kometenkern erstellt.

Weitere Missionen zu den Kometen sind geplant. Die Kometen sind Überreste aus der Anfangszeit des Sonnensystems, sozusagen Überreste der nicht zur Planetenbildung verbrauchten Materie. Daher können wir durch die Erforschung der Kometen einiges über die Anfangszeit des Sonnensystems lernen.

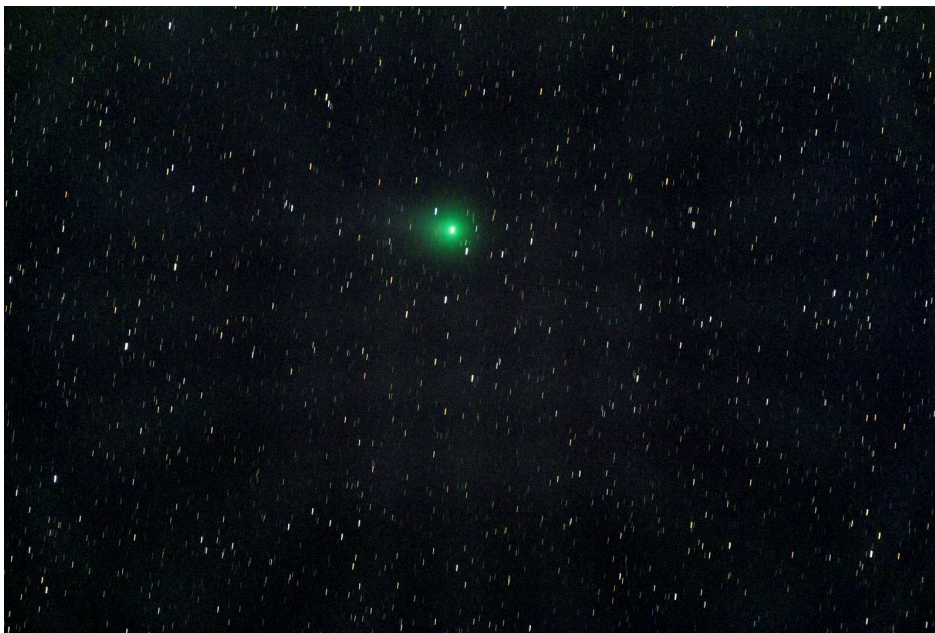


Bild 8: Komet C/2014 Q2 (Lovejoy) / Foto: Ralf Schmidt

## 5 Meteoroiden

Meteoroiden sind kleiner als Kleinplaneten jedoch größer als interplanetarer Staub und bewegen sich auch auf Bahnen um die Sonne. Eine scharfe Grenze bzw. klare Definition zur Abgrenzung gibt es jedoch nicht. Sie gehören zu den Kleinkörpern des Sonnensystems. Des Weiteren kommt es unter anderem zu Wechselwirkungen zwischen dem Planeten Erde und Meteoroiden. Begrifflich wird im deutschsprachigen Raum wie folgt unterschieden:

- **Meteore:** Lichterscheinungen bzw. Leuchterscheinungen am Himmel. Kleine Meteore werden hierbei als Sternschnuppen bezeichnet und größere erscheinen uns als Feuerkugeln, sie werden als Boliden bezeichnet.
- **Meteoroid:** Materie, welche die Sonne umkreist und in der Größenordnung etwa zwischen den Kleinplaneten und dem interplanetaren Staub liegt. Im Übergangsbereich zur interplanetaren Materie wird von Mikrometeoroiden gesprochen.
- **Meteorit:** Ein Meteoroid, welcher die Erdoberfläche erreicht hat.

Die Geschwindigkeit von Meteoroiden an der Position der Erde um Sonne beträgt aufgrund ihrer parabolischen Bahnform 42 km/s. Die Erde hat eine mittlere Bahngeschwindigkeit von 30 km/s. Bei einem Zusammenstoß von Erde und Meteoroiden ergeben sich daher Relativgeschwindigkeiten zwischen 12 und 72 km/s. Hierbei ist zu betonen, dass Erde und Meteoroiden kollidieren und die Meteoroiden nicht von der Erde angezogen werden. Aufgrund der hohen Geschwindigkeiten kommt es beim Eintauchen in die Erdatmosphäre zu einem Aufschmelzen und Verglühen der Meteoroiden bei mehreren Tausend Kelvin. Dabei wird die kinetische Energie zu rund 99 Prozent in thermische Energie umgewandelt. Etwa ein Prozent der kinetischen Energie wird durch Ionisation der umgebenen Luftmoleküle verbraucht. Wenn Elektronen und positive Atomrümpfe wieder rekombinieren, wird elektromagnetische Strahlung ausgestrahlt, darunter auch Licht. Dies ist wahrnehmbar als Nachleuchten der Bahn des Meteoroids in der Erdatmosphäre. Sichtbar wird der Meteoroid als Meteor (Sternschnuppe oder Bolide), wenn er sich in etwa einer Umgebung von 200 km von Beobachter entfernt befindet. Das starke Abbremsen und Aufleuchten der Meteoroiden erfolgt in einer Höhe von 140 bis 100 km. Das Verlöschen des Meteors erfolgt in einer Höhe von 90 bis 20 km. Pro Tag gibt es etwa 25 Millionen Meteore. Die typische Masse eines Meteors liegt bei etwa einem Gramm, Boliden haben in etwa die Größe eines Golfballes. Rund 100 Tonnen an Material von Meteoroiden fallen pro Tag auf die Erde. Die Helligkeit eines Meteors hängt von der Masse  $M$  des Meteoroiden und seiner geozentrischen (auf die Erde bezogenen) Geschwindigkeit  $v$  ab. In Größenklassen (Magnituden) betrachtet, kann sie mit Hilfe folgender Beziehung abgeschätzt werden:

$$\log(M) = 3,6 - 0,4m - 2,5\log(v)$$

Meteoroiden werden nach Bahnform und Herkunft unterteilt:

- **Planetarische Meteoroiden:** Hierbei handelt es sich um Fragmente aus dem Kleinplanetengürtel. Sie haben Ellipsenbahnen mit kurzen Umlaufzeiten und machen 50 Prozent aller Meteoroiden aus.
- **Meteoroiden mit parabelnahen Bahnen:** Diese stammen aus dem Sonnensystem, doch ist ihre genaue Herkunft unbekannt. Sie machen 30 Prozent aller Meteoroiden aus.
- **Kometarische Meteoroiden:** Material vom Kometen, welches sich abgelöst hat oder von sich auflösenden Kometen stammt. Dieses Material verteilt sich entlang der Kometenbahnen. Dabei kann die Verteilung relativ gleichmäßig sein oder Häufungen aufweisen. Kreuzt die Erde bei ihrem Umlauf um die Sonne eine derartige Bahn, kommt es

zu sogenannten Meteorströmen, von denen etwa 50 bekannt sind. Die Meteorströme werden nach dem Sternbild benannt, aus dem sie scheinbar zu kommen scheinen. Der Punkt, aus dem sie scheinbar am Himmel kommen, wird Radiant genannt.

Bekannte Meteorströme sind die Mai-Aquariden (Höhepunkt um den 05. Mai / Radiant im Sternbild Wassermann), Perseiden (12. August / Perseus) und die Leoniden (16. November / Löwe). Bei den Mai-Aquariden handelt es sich um Material vom Kometen Halley. Bei den Perseiden um Material des Kometen Temple-Tuttle und bei den Leoniden um welches des Kometen 1866 I. Wenn das Material nicht gleichmäßig auf der Kometenbahn verteilt ist, kommt es zeitweise zu besonders intensiven Meteorströmen mit zahlreichen Meteoren pro Zeiteinheit. Dies konnte zum Beispiel im Falle der Leoniden in den Jahren 1933 und 1966 beobachtet werden. Im Jahr 1999 blieb eine Intensivierung dieses Meteorstromes jedoch aus.

Meteoroiden mit Durchmessern von weniger als 1 mm kommen in etwa 100 km zum Stillstand, bevor sie schmelzen oder verdampfen. Ein Meteoroid von etwa einem Millimeter Durchmesser hat eine Masse von 0,000001 kg bzw. 0,001 g. Er erzeugt eine Leuchtspur mit einer Helligkeit von etwa  $5^m$ . Eine Helligkeit von  $0^m$  wird bei einer Masse von 0,0001 kg bzw. 0,1 g und einem Durchmesser von 4 mm erreicht. Bei einer Masse von einem Kilogramm und einem Durchmesser von 80 mm wird bereits eine Helligkeit von  $-10^m$  erreicht. Ein Meteoroid mit einer Masse von 10 kg und einem Durchmesser von 160 mm erreicht mit einer Helligkeit von  $-12,5^m$  bereits die des Vollmondes.



Bild 9: Meteorstrom Perseiden / Foto: Erich Meyer auf [www.spektrum.de](http://www.spektrum.de)

Von allen auf die Erde treffenden Meteoriden erreichten nur etwa 0,01 Prozent als Meteorite die Erdoberfläche. Voraussetzung hierfür ist eine niedrige geozentrische Geschwindigkeit von maximal etwa 22 km/s, ein günstiger Eintrittswinkel und eine hohe mechanische Festigkeit des Meteoroiden. Neben der Masse bzw. dem Durchmesser hängt es also auch von der Zusammensetzung des Meteoroiden ab, ob diese als Meteorite den Erdboden erreichen. In etwa dürften Meteoroiden mit Durchmessern im Bereich von Dezimetern den Erdboden erreichen. Hinsichtlich ihrer Zusammensetzung werden Meteorite unterschieden:

- **Steinmeteorite:** Diese bestehen aus Verbindungen wie Siliziumdioxid (Silikate,  $SO_2$ ) und Magnesiumoxid (MgO). Sie machen etwa 94 Prozent der Meteorite aus. Im Falle der Steinmeteorite wird noch zwischen **Chondriten** (85 Prozent aller Meteorite) und **Achondriten** (9 Prozent) unterschieden. Chondrite enthalten zirka einen Millimeter großer Silikatkugeln, welche Chondrulen genannt werden. Des Weiteren gibt es noch sogenannte kohlige Chondrite, welche etwa einen Anteil von 5 Prozent an Kohlenstoffverbindungen enthalten. Darunter Kohlenwasserstoffe, Aminosäuren sowie Salze (Carbonate und Sulfate). Achondrite haben relativ grobkörnige Mineralbestandteile. Sie bilden eine sehr heterogene

Gruppe, ähneln in ihrer Zusammensetzung den irdischen Basalten und anderen magnetischen Gesteinen. Es kommen Metalle vor, wobei metallisches Eisen jedoch weitgehend fehlt. Eine weitere Gruppe bilden die **Tektite**, die Glasmeteorite. Sie bestehen vorwiegend aus  $\text{SiO}_2$  und haben in der Regel rundliche bzw. kreisförmige Formen. Des Weiteren werden sie nur in bestimmten Gegenden gefunden, etwa in Böhmen. In der Literatur werden Tektite neben den Steinmeteoriten auch als eigenständige Gruppe aufgeführt.

- **Eisenmeteorite:** Diese bestehen hauptsächlich aus Metallen und machen etwa 5 Prozent aller Meteoriten aus. Unterschieden wird hierbei noch zwischen Metallmeteoriten und Sulfidmeteoriten. Die Metallmeteoriten bestehen aus Eisen und Nickel. Der Anteil an Eisen liegt bei etwa 91 Prozent und der von Nickel bei etwa 8 Prozent. Derartige Eisen-Nickel-Legierungen kommen auf der Erde nicht vor. Die Sulfidmeteoriten bestehen aus Metall-Schwefel-Verbindungen, etwa  $\text{FeS}$ .
- **Stein-Eisen-Meteorite:** Diese bestehen sowohl aus Silikaten als auch aus Eisenlegierungen. Sie machen etwa einen Prozent aller Meteorite aus und sind wahrscheinlich das Produkt einer unvollständigen Stofftrennung. Teilweise handelt es sich bei der Zusammensetzung der Meteorite um Brekzien (chaotische Gesteine), teilweise um Einlagerungen von Olivin in eine Matrix aus Nickeleisen.



Bild 10 Meteorit / Wikipedia.org

Bisher wurde etwa 7.000 Meteoriten auf der Erde gefunden. Darunter auch welche, die sehr wahrscheinlich vom Mond und vom Planeten Mars stammen. Diese wurden relativ gut erhalten in der Antarktis gefunden. Aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung und gefundenen Einschlüssen (etwa Atmosphärendampf) kann auf ihre mögliche Herkunft geschlossen werden. Die Entweichgeschwindigkeiten auf dem Mond und dem Mars sind relativ niedrig. Durch Impakte könnte Material von den Oberflächen dieser Himmelskörper ausgeworfen worden sein und so die Erde erreicht haben.

## 6 Interplanetare Materie

Materie, bestehend aus Teilchen mit Massen von kleiner als  $10^{-8}$  kg und Durchmessern von kleiner als  $10\ \mu\text{m}$ , wird als interplanetarer Staub bezeichnet. Dabei dürfte der Übergang von Mikrometeoroiden zu interplanetarem Staub fließend sein. Von innen nach außen nimmt die Dichte der interplanetaren Materie im Sonnensystem ab. Des Weiteren gibt es eine stärkere Konzentrierung in der Ebene der Planetenbahnen, also im Bereich der Ekliptik. Am Ort der Erde beträgt die Dichte der interplanetaren Materie etwa  $3 \cdot 10^{-20}\ \text{g/cm}^3$ . Der interplanetare Staub hat verschiedene Quellen. Bei einem Teil handelt es sich um interstellare Materie, welche den Raum zwischen den Sternen ausfüllt. Die anderen Anteile stammen von Objekten des Sonnensystems. So liefern Diffusionen aus Planetenatmosphären und Kometen sowie der Sonnenwind (Teilchenstrahlung von der Sonne) Anteile an interplanetarischer Materie.

Im Zentrum der flachen ellipsoidischen Wolke aus interplanetarer Materie, mit Konzentration zur Ekliptik, liegt die Sonne. Durch Reflexion und Streuung von Sonnenlicht an Teilchen mit Durchmessern von  $10$  bis  $80\ \mu\text{m}$  entsteht sogenanntes Zodiaklicht. Gegenüber der Sonne kann am Himmel ein Gegenschein wahrgenommen werden, welcher durch verstärkte Rückwärtsstreuung entsteht. Die Korona der Sonne, ihre äußerste Atmosphärenschicht, geht fließend in den interplanetaren Staub über. Konkretes Bindeglied zwischen Korona und interplanetarem Staub ist die sogenannte F-Korona (Fraunhofer-Korona). In ihr zeigen sich sogenannte Fraunhoferlinien, Absorptionslinien im Sonnenspektrum. Diese entstehen durch sogenannte Resonanzabsorption, elektromagnetische Strahlung bestimmter Frequenzen wird durch Gasatome oder Gasmoleküle im Bereich ihrer Anregungsenergie absorbiert. Durch den Strahlungsdruck von der Sonne werden die Teilchen der interplanetaren Materie jedoch abgebremst, verlieren dadurch Bahndrehimpuls und stürzen so in die Sonne. Allerdings wird auch aus den oben genannten Quellen ständig neue interplanetare Materie nachgeliefert und so ihr Verlust wieder ausgeglichen.

Im Rahmen der sogenannten Stardust-Mission, gestartet im Jahre 1999, wurde mit Hilfe von 130 zwei mal vier Zentimetern großen Aerogel-Detektoren interplanetarer Staub aus der Umgebung des Kleinplaneten Anne Frank gebremst und eingefangen. Die Proben wurden in einer Kapsel im Jahr 2006 zur Erde gebracht.

## 7 Impakte

Ein Impakt (Einschlag) bezeichnet die Kollision zweier Himmelsobjekte mit großer Geschwindigkeit. Der Plural lautet Impakte (Einschläge). Auf den großen Planeten des Sonnensystems kam und kommt es immer wieder zu Impakten von Kleinkörpern, auch auf der Erde. In der Anfangszeit des Sonnensystems war die Häufigkeit von Impakten sehr groß. Die inneren Planeten waren stärker betroffen als die äußeren Planeten. Vor 3,8 Milliarden Jahren nahm die Häufigkeit der Impakte dann signifikant ab. Auf dem Mond oder dem Planeten Merkur sind aufgrund des Fehlens einer dichten Atmosphäre die Impaktkrater aus der Anfangszeit des Sonnensystems noch vorhanden. Auf der Erde mit ihrer dichten Atmosphäre sind Krater aufgrund von Erosion durch Eis, Wasser und Wind weitgehend verschwunden. Nur besonders große Krater, welche nicht älter als 500 Millionen Jahre sind, lassen sich auf der Erde noch nachweisen. Aus der Kraterstatistik lässt sich die Häufigkeit von Impakten in Abhängigkeit von der Größe des Impaktkörpers abschätzen. So sind Impakte von einem  $1\ \text{km}$  großen Körper 100-mal häufiger als welche von einem  $10\ \text{km}$  großen Impaktkörper. Statistisch betrachtet wird die Erde etwa alle 100 Millionen Jahre von einem Körper mit einer Größe von  $10\ \text{km}$  und mehr getroffen. Ein  $1\ \text{km}$  großer Impaktkörper schlägt statistisch betrachtet etwa einmal in einer Million Jahre auf der Erde ein. Ganz allgemein gilt: Je kleiner der Impaktkörper ist, desto häufiger sind statistisch betrachtet die Impakte.

Kleinkörper treten mit Geschwindigkeit zwischen 12 und 72 km/s in die Erdatmosphäre ein. Das sind zwischen rund 36.000 und 252.000 km/h. Dabei wird rund 99 Prozent der kinetischen Energie in thermische Energie umgewandelt. Bereits mehrere Zentimeter große Kleinkörper, welche als Feuerkugel (Bolide) am Himmel erscheinen, erhitzen sich dabei nicht gleichmäßig. Die Oberfläche erhitzt sich stark, während das Innere des Kleinkörpers relativ kühl bleibt. Das führt zu Spannungen im Kleinkörper, der während seines Falles durch die Atmosphäre starken mechanischen Kräften ausgesetzt ist. Infolge kann die Oberfläche des Kleinkörpers abgesprengt werden oder der Kleinkörper zerplatzen. Die Bruchstücke können in unterschiedlichen Richtungen davon fliegen und eine zur Luft relativ kleine Geschwindigkeit bekommen. Das bedeutet weniger kinetische bzw. thermische Energie, sie verglühen nicht und erreichen die Erdoberfläche. Ab welchem Durchmesser Kleinkörper die Erdoberfläche erreichen dürften neben ihrer Größe vor allem von ihrer Zusammensetzung, ihrem Einfallwinkel und ihrer Geschwindigkeit relativ zur Erde abhängen. Doch dürften Kleinkörper mit Größen im Dezimeterbereich bereits mit hoher Wahrscheinlichkeit die Erdoberfläche erreichen. Kleinkörper mit Massen von mehr als 10 Tonnen erzeugen bei einem Impakt Krater auf der Erdoberfläche, wenn sie nicht ins Meer stürzen.

Die Größe des Impaktkrater ist von der Größe des einschlagendes Körpers (Impaktors) abhängig. Nach einer Faustformel ist der Impaktkrater etwa 20- bis 40-mal größer als der Durchmesser des einschlagenden Körpers. Allerdings kann auch die kinetische Energie ( $E_{kin}$ ) des Impaktors herangezogen werden, welche beim Einschlag frei wird. Diese hängt alleine von der Masse  $m$  und der geozentrischen Geschwindigkeit  $v$  des Impaktors ab:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} mv^2 \quad (1)$$

Daraus ergibt sich für den Durchmesser  $D$  eines möglichen Kraters folgende von E.M. Shoemaker und anderen im Jahre 1979 aufgestellte empirische Formel:

$$D = D_0 \cdot (E/E_0)^{0,294} \quad (2)$$

Dabei sind  $D_0 = 15$  km und  $E_0 = 10^{20}$  J Referenzwerte. Zum Beispiel ergibt sich aus Formel (1) für einen Meteoriten mit einem Radius ( $r$ ) von einem Kilometer und einer Dichte ( $\rho$ ) von  $3.000$  kg/m<sup>3</sup>, bei einer Fallgeschwindigkeit von  $20$  km/s, eine kinetische Energie von  $E = 25,10 \cdot 10^{20}$  J., wobei für die Berechnung der benötigten Masse angenähert gilt:  $m = \rho V = \frac{4}{3}r^3$ . Diesen Wert in Formel (2) eingesetzt, ergibt einen Kraterdurchmesser von  $39$  km.

Bereits in der jüngeren Vergangenheit kam es zu Impakten. Am 15. Februar 2013 explodierte nahe der am Ural gelegenen russischen Stadt Tscheljabinsk um 4<sup>h</sup> 20<sup>m</sup> MEZ (9<sup>h</sup> 20<sup>m</sup> Mittlerer Ortszeit) in etwa  $20$  km Höhe ein Meteoroid. Der Kleinkörper hat eine Masse von  $7.000$  Tonnen, einen Durchmesser von  $17$  m und eine geozentrische Geschwindigkeit von  $18$  km/s. Er dürfte aus dem Kleinplanetengürtel zwischen der Mars- und der Jupiterbahn stammen. Der Meteor, eine sehr helle feurige Spur, wurde von zahlreichen Kameras aufgenommen. Etwa  $1,5$  Minuten nach der Explosion des Kleinkörpers in der Erdatmosphäre erreichte eine Druckwelle das Gebiet um die Millionenstadt Tscheljabinsk. Dabei wurden etwa  $1.000$  Menschen verletzt, die meisten durch Glassplitter, und massive Zerstörungen verursacht. Unter anderem zerbarsten etwa  $100.000$  Quadratmeter Glasfläche und ein Fabrikdach wurde eingedrückt. Ein Fragment des Meteoroids durchschlug etwa  $80$  km entfernt von Tscheljabinsk die Eisdecke des Tscherbakulsee. Die Stärke der Explosion des Kleinkörpers entsprach einer Sprengkraft von  $500$  Kilotonnen des Sprengstoffs TNT (Trinitrotoluol). Ein Ereignis dieser Größenordnung findet statistisch etwa einmal pro Jahrhundert statt.

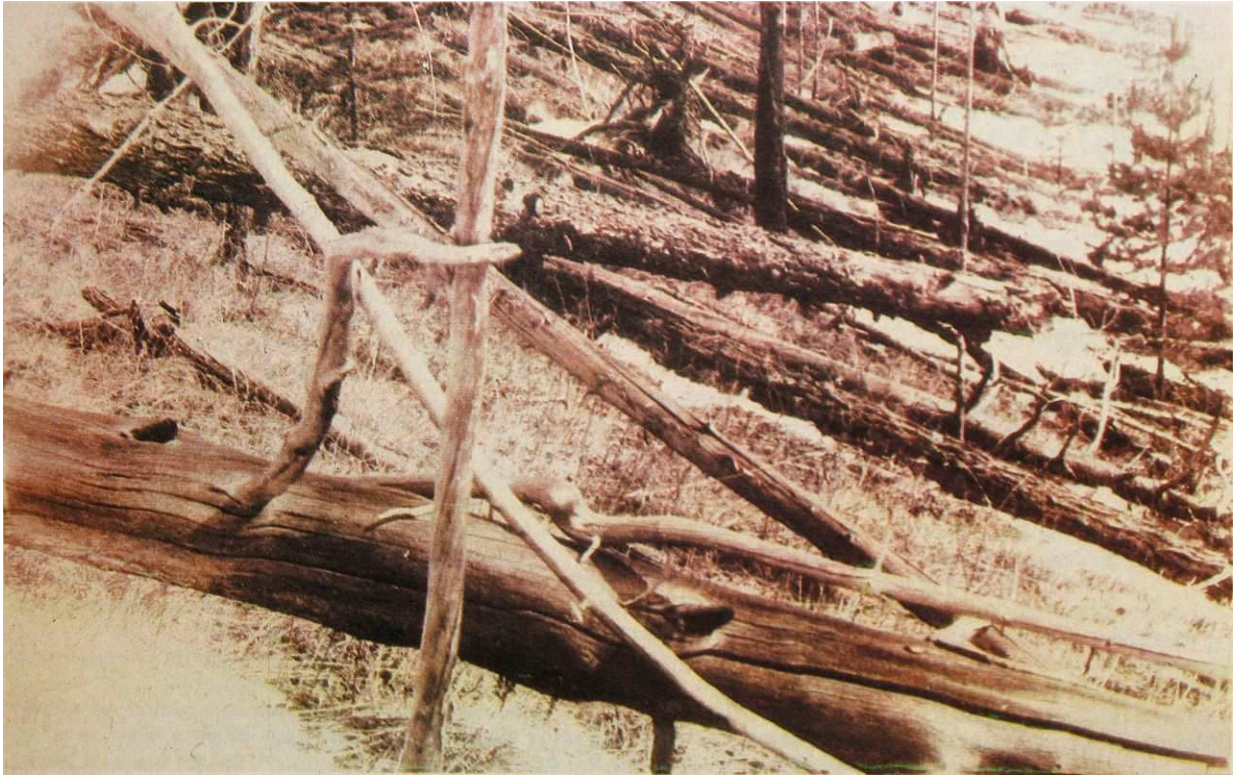


Bild 11: Tunguska 1927 nach dem Ereignis von 1908 / Wikipedia.org

Anfang des letzten Jahrhunderts, am 30. Juni 1908, etwa gegen 7:15 Uhr Ortszeit, kam es in der Nähe des sibirischen Flusses Steinige Tunguska (Russland) zu einer gewaltigen Explosion. Die Stärke der Explosion wird auf 12 Megatonnen TNT geschätzt. In einem Umkreis von zirka 30 km um den Explosionsherd wurden alle Bäume wie Streichhölzer umgeknickt. Insgesamt wurden auf einem Gebiet von 2.000 km<sup>2</sup> etwa 60 Millionen Bäume umgeknickt. In 65 km Entfernung vom Explosionsherd wurden in der Handlungssiedlung Wanawara Fenster und Türen eingedrückt. Die Druckwelle umkreiste mehrfach die Erde, was durch Luftdruckmessungen festgestellt werden konnte. Noch in 500 km Entfernung wurde ein heller Feuerschein wahrgenommen. So auch von den Passagieren und dem Personal der Transsibirischen Eisenbahn. Der Lokführer hielt den Zug sogar an, weil er dachte, der Kessel der Lok sei explodiert. Das Gebiet ist äußerst dünn besiedelt, so dass es keine große Anzahl von Opfern gegeben haben dürfte. Die Angaben reichten von keinen bis sehr wenigen Opfern. Der erste Versuch einer Expedition in das Gebiet wurde erst 1921/22 von Leonid Kulik unternommen. Diese Expedition gelangte allerdings nur bis Kansk, 600 km vom Explosionsort entfernt. Erst im Jahre 1927 gelang Kulik eine Expedition zum Ort der Explosion. Auch rund 20 Jahre nach dem Ereignis waren die Zerstörungen noch sichtbar. Ein Impaktkrater wurde nicht gefunden. Zunächst wurden kleine Seen am Explosionsort für Impaktkrater gehalten, was sich jedoch als falsch herausstellte. Es wurden auch keine Überreste von einem Meteoriten gefunden. Bis heute gibt es verschiedene Thesen zum Tunguska-Ereignis von 1908. Die Impakthypothese geht von einem 40 bis 80 m großen Kleinkörper aus, der in etwa 10 Kilometer Höhe explodierte und daher keinen Krater erzeugte. Entsprechend verhielt es sich ja auch im Falle von Tscheljabinsk am 15. Februar 2013. Bei dem Kleinkörper könnte es sich um einen Kleinplaneten bzw. Meteoroiden oder um den Kopf eines Kometen gehandelt haben. Dennoch bleiben Fragen zum Ereignis ungeklärt und auch andere Erklärungen, etwa eine Gasexplosion oder eine Vulkaneruption, könnten möglich sein.

Am 30. November 1954 stürzte ein 3,8 kg schwerer Körper in Sylacauga / Alabama / USA in ein Haus ein und verletzte eine Person. Auch weitere Einschläge von kleinen Meteoriten in Häusern sind bekannt, allerdings ohne jemanden zu verletzen. Sie führten in der Regel zu Zerstörungen am Haus, insbesondere am Dach. Treffer auf Menschen, Tiere und Häuser sind dennoch extrem unwahrscheinlich. Ausgeschlossen sind sie jedoch nicht.





Bild 12: Meteor über Tscheljabinsk am 15. Februar 2013/ [www.spiegel.de](http://www.spiegel.de)

Vor 50.000 Jahren schlug in der Wüste des heutigen Arizona / USA ein etwa 50 m großer Kleinkörper ein und erzeugte einen Krater mit 1.300 Metern Durchmesser und 184 Metern Tiefe. Der Kleinkörper bestand aus Eisen/Nickel und hatte eine Masse von etwa einer halben Millionen Tonnen. Der noch heute gut erhaltene „Giant Meteor Crater“ liegt am Highway Nr. 40 zwischen Winslow und Flagstaff und kann besichtigt werden. An seinem Nordrand befindet sich ein Meteoritenmuseum.



Bild 13: Barringer-Krater in Arizona (USA) /Wikipedia.org

Das Nördlinger Ries und das Steinheimer Becken im heutigen Deutschland entstanden vor etwa 15 Millionen Jahren durch den Impakt eines etwa 1,5 km großen Kleinplaneten. Dieser Kleinplanet schlug mit einer geozentrischen Geschwindigkeit von etwa 20 km/s ein und erzeugte das Nördlinger Ries. Dieser Kleinplanet hatte mindestens einen kleineren Begleiter, welcher das Steinheimer Becken erzeugte. Der Begleiter dürfte nicht als Bruchstück in der Erdatmosphäre entstanden sein, sondern musste schon vor dem Einschlag vorhanden gewesen sein. Anderenfalls wäre die Entfernung von zirka 40 km zwischen dem Nördlinger Ries und dem Steinheimer Becken nicht erklärbar. Beim Aufprall schmolz der Boden und mischte sich mit dem Material des Meteoriten. Das Ergebnis ist ein fleckiges Gestein, der sogenannte Suevit und Traß. Aus diesem Material wurde unter anderem der Kirchturm der St. Georgs-Kirche in Nördlingen gebaut. Damit hat dieser Kirchturm tatsächlich Wurzeln im Himmel.

Vor zirka 65 Millionen Jahren schlug ein Kleinplanet mit etwa 10 km Durchmesser in den Golf von Mexiko ein und erzeugte einen 180 Kilometer großen Impaktkrater, welcher inzwischen im Meer versunken ist. Er liegt an der Nordküste der mexikanischen Halbinsel Yucatan, nahe der heutigen Stadt Chicxulub. Die beim Impakt explosionsartig freigesetzte Energie entsprach etwa einer Milliarden Megatonnen TNT oder der Explosion von fünfzig Millionen 20-Megatonnen-Wasserstoffbomben. Durch den Impakt wurden globale Erdbebenwellen und Tsunamis ausgelöst und gewaltigen Mengen Staub in die Atmosphäre aufgewirbelt. Infolge des Staubes in der Atmosphäre wurde die Leistung der zur Erdoberfläche dringenden Sonnenstrahlung verringert, so dass die Durchschnittstemperaturen auf der Erde sanken und ein sogenannter Impaktwinter ausgelöst wurde. Viele Populationen auf der Erde, darunter die Dinosaurier, wurden durch dieses Ereignis ausgelöscht. Es war in der Vergangenheit der Erde nicht das einzige Ereignis dieser Art. So dürfte es etwa vier weitere entsprechende Ereignisse gegeben haben, bei denen rund 90 Prozent der irdischen Fauna und Flora vernichtet wurden. Selbst einige in der Bibel beschriebene globale Katastrophen könnten auf Impakte zurückgehen.

Noch heute sind Impakte auf der Erde möglich. Zum einen kommen einige Kleinplaneten der Erde recht nahe. In diesen Fällen wird von „Near Earth Objects“ („NEO“) gesprochen. Es sind mittlerweile aufgrund entsprechender Beobachtungsprogramme rund 10.000 NEOs bekannt. Einige kommen der Erde nur einige Zehntausend Kilometer nahe und bewegen sich damit sogar noch unterhalb der Umlaufbahnen der geostationären Satteliten, welche die Erde synchron zu ihrer Rotation in zirka 36.000 km Höhe umkreisen. Um die Folgen eines möglichen Impaktes darstellen zu können, wurde die sogenannte Torino-Skala geschaffen. Sie ist vergleichbar mit der Richterskala zur Erfassung von Erdbeben. Die Stufen der Torino-Skala reichen von 0 bis 10 und geben die Wahrscheinlichkeit des Impaktes für einen bestimmten Kleinkörper sowie die Auswirkungen des Impaktes (lokal, regional, global) an. Im Falle der Stufe 0 ist die Wahrscheinlichkeit eines Impaktes am niedrigsten, so dass es keine Auswirkungen geben dürfte. Im Falle der Stufe 10 ist der Impakt sicher und seine Auswirkungen sind global. In diesem Fall kommt es zu großräumigen Zerstörungen mit vielen Verletzten und Toten sowie einer daraus resultierenden Veränderung des globalen Klimas. Die notwendigen Maßnahmen werden durch Farben gekennzeichnet. Weiß bedeutet keine praktischen Auswirkungen, so dass keine Maßnahmen ergriffen werden müssen. Im Falle von gelb sollte die Bahn des Objektes überwacht werden, während im Falle von orange aufgrund einer konkreten Bedrohungslage die Bahn systematisch zu beobachten und zu berechnen ist. Im Falle von rot ist der Impakt sicher. Dann kann es nur noch um mögliche Abwehrmaßnahmen oder/und um Vorbereitungen für den Impakt gehen.

Globale Auswirkungen haben Kleinkörper von etwa 500 Metern Durchmesser und mehr. Doch können bereits Kleinkörper von einigen zehn Metern Durchmessern schwerste lokale oder regionale Zerstörungen anrichten, wie die Ereignisse von Tunguska und Tscheljabinsk zeigen. Eine entsprechende Überwachung von Kleinkörpern ist daher sehr wichtig. Die Vereinten Nationen (United Nations, UN) haben in ihrer Unterorganisation „United Nations Office for Outer Space Affairs“ („UNOOSA“) eine entsprechende Arbeitsgruppe („Action Team on Near-Earth Objects“)

eingrichtet. Diese Arbeitsgruppe soll sich unter anderem mit der Koordination und Auswertung von Daten von Suchprogrammen befassen. Es gibt nationale und multi-nationale Beobachtungsprogramme, welche auch vollautomatisch arbeiten. Das bekannteste Suchprogramm ist das Projekt „Spaceguard Survey“. Dieses hat bereits viel NEOs mit Durchmessern bis herab zu einem Kilometer aufgespürt. Weitere Suchprogramme mit vollautomatischen Teleskopen und Weitwinkelkameras haben auch Objekte mit Durchmessern bis herab zu 10 Metern entdeckt. Allerdings werden Objekte dieser Größenordnung noch nicht vollständig erfasst. Die europäische Raumfahrtagentur ESA hat mit dem „Space Situational Awareness“ („Weltraumerfassungsprogramm“) ebenfalls ein Suchprogramm gestartet.

Fast alle möglichen Abwehrmaßnahmen gegen einen möglichen Impakt sehen eine Bahnänderung des Kleinkörpers vor. Nur die Methoden, wie eine Bahnänderung erreicht werden soll, sind verschieden. Doch setzen alle Methoden eine relativ lange Vorlaufzeit voraus, etwa einige Jahre. Eine kleine Änderung der Bahn bewirkt auf einen längeren Streckenabschnitt im Ergebnis eine größere Abweichung von der ursprünglichen Bahn. Dadurch kann ein Impakt verhindert werden.

Nachfolgend sollen einige mögliche Methoden vorgestellt werden. Durch Zündung einer Kernwaffe in unmittelbarer Nähe des Kleinkörpers könnte eine Bahnänderung bewirkt werden. Durch die Explosion einer Kernwaffe wird Strahlung frei, welche zur Verdampfung von Oberflächenmaterial auf dem Kleinkörper und zu einem Feuerball führt. Dieser würde den Kleinkörper vom Explosionsherd weg beschleunigen. Die Methodik mit der Kernwaffe ist die unsicherste, da es auch auf die genaue Zusammensetzung des Kleinkörpers ankommt. Sie wäre die radikalste und die, welche die kürzeste Vorlaufzeit benötigen würde. Eine Sprengung des Kleinkörpers ist in der Regel nicht möglich, außer bei sehr kleinen. Allerdings würden dann die Bruchstücke einschlagen, welche ebenso gefährlich sind.

Mit Hilfe von Sonnenreflektoren könnte ein gebündelter Strahl auf eine bestimmte Stelle des Kleinkörpers gelenkt werden. Aufgrund der erzeugten Wärme würde Oberflächenmaterial verdampfen und ein Rückstoß erzeugt werden, welcher zu einer Bahnänderung führen könnte. Diese Methodik soll nach Angaben der NASA für Kleinkörper bis 500 m Durchmesser geeignet sein.

Eine Ablenkung durch Impulsübertragung sieht ein geplantes Projekt der ESA vor. Zwei Raumsonden würden auf den Weg zu einem mutmaßlichen Kleinkörper gebracht werden. Eine Raumsonde würde den Kleinkörper umlaufen und Beobachtungsdaten sammeln. Die andere hätte eine Masse von vier Tonnen und würde den Kleinkörper rammen. Dadurch würde Impuls auf den Kleinkörper übertragen, was zu einer Bahnänderung führen könnte. Nach Angabe der ESA wäre diese Methodik für Kleinkörper bis einen Kilometer Durchmesser geeignet.

Die genaueste Methode wäre die Ablenkung eines Kleinkörpers durch Gravitationskraft. Zu diesem Zweck würde eine Raumsonde auf dem Weg zum Kleinkörper gebracht werden, welche eine Masse von etwa 20 Tonnen haben würde. Ohne Antrieb würde die Raumsonde als Orbiter in 150 m Entfernung über den Mittelpunkt des Kleinkörpers schweben und ihn durch die von ihr ausgehende Gravitationskraft ablenken. Diese Methodik setzt allerdings eine Vorlaufzeit von etwa 20 Jahren voraus.

Allerdings gibt es bisher nur Beobachtungsprogramme, welche verbessert werden müssen. Mögliche Abwehrmaßnahmen sind bisher noch Theorie geblieben. Doch wird sich die Wissenschaft mit möglichen Impakten auf der Erde und möglichen Gegenmaßnahmen auseinandersetzen müssen.

## 8.0 Schlusswort

Neben der Sonne und den acht großen Planeten gibt es eine Vielzahl an kleinen Körpern im Sonnensystem. Die größten von ihnen haben eine ausreichende Masse, um im hydrostatischen Gleichgewicht zu sein und damit Kugelgestalt zu haben. Diese Objekte werden nach einer Definition der Internationalen Astronomischen Union (IAU) vom 25. August 2006 als Zwergplaneten bezeichnet. Im Gegensatz zu den großen Planeten haben sie ihre Umlaufbahn noch nicht von Kleinkörpern frei geräumt. Diese Definition ist umstritten, da es auch auf den Umlaufbahnen der großen Planeten Kleinkörper gibt. Allerdings sind die Massen der Kleinkörper auf der Umlaufbahn eines Planeten gegenüber der Planetenmasse vernachlässigbar, was im Falle der Masse eines Zwergplaneten nicht der Fall ist. Der Pluto, von 1930 bis 2006 als neunter Planet anerkannt, wird heute als Zwergplanet definiert.

Neben den Zwergplaneten gibt es sogenannte Kleinkörper, zu denen die Kleinplaneten (Asteroiden bzw. Planetoiden), Kometen, Meteoroiden und der Interplanetare Staub gehören. Von diesen bilden die Kleinplaneten die größten Objekte. Sie bewegen sich überwiegend in einem Gürtel um die Sonne, welcher zwischen Mars und Jupiter liegt. Es handelt sich allerdings nicht um die Bruchstücke eines Planeten. Vielmehr konnte sich aufgrund des gravitativen Einflusses des Jupiters an dieser Stelle kein Planet herausbilden.

Die Kometen wiederum lassen sich als schmutzige Schneebälle bezeichnen. Sie bestehen hauptsächlich aus Wassereis, Trockeneis (gefrorenes Kohlenstoffdioxid), Ammoniak, Methan sowie Beimengungen von Mineral- und Staubteilchen. Bei der Annäherung an die Sonne verflüchtigen sich Wasserdampf und andere leicht flüchtige Stoffe, wie Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ), aus dem Kern, bilden sowohl die Koma als auch den Kometenschweif. Aufgrund der Wechselwirkung zwischen den Teilchen des Kometenschweifes und des sogenannten Sonnenwindes (Teilchenstrahlung von der Sonne) ist der Schweif von der Sonne weggerichtet.

Es gibt zwei mögliche Quellen für Kometen. Der sogenannte Kuipergürtel jenseits der Neptunbahn in 30 bis 50 AE von der Sonne und die Oort'sche Wolken, welche sich in einem Entfernungsbereich von 30.000 bis 100.000 AE von der Sonne befindet. Die sogenannten kurzperiodischen Kometen, mit Umlaufzeiten von bis zu 200 Jahren, dürften in der Regel aus dem Kuipergürtel stammen. Sie sind in der Ebene der Ekliptik lokalisiert, da sich der Kuipergürtel auch in der Ebene der Planetenbahnen befindet. Die langperiodischen Kometen dürften aus der Oort'schen Wolken stammen. Sie können überall am Himmel auftauchen und sind aufgrund der sphärischen Gestalt der Wolke nicht in bestimmten Ebenen lokalisiert.

Die Meteoroiden sind wiederum kleiner als Kleinplaneten, jedoch größer als der Interplanetare Staub. Es gibt jedoch keine scharfe Definition zur Abgrenzung. Grob dürfte es sich im Falle von Meteoroiden um einen Massenbereich von Mikrogramm bis zu mehreren Tonnen und einem Durchmesserbereich von Millimetern bis zu einigen Metern handeln. Auf der Erde gefundene Meteoroiden werden als Meteorite bezeichnet. Es gibt Meteorite aus Stein, Eisen-Stein, Eisen und Glasverbindungen. Als Meteore werden die Leuchterscheinungen bezeichnet, wenn Meteoroiden in der Erdatmosphäre verglühen. Kleinere Meteore werden als Sternschnuppen und größere als Feuerkugeln (Bolide) bezeichnet. Noch kleinere Teilchen ( $d < 10 \mu\text{m}$ ,  $m < 10^{-8} \text{ kg}$ ) werden als interplanetarer Staub bezeichnet.

Die Kleinkörper sind Überbleibsel aus der Entstehungszeit des Sonnensystems und daher für die Forschung sehr interessante Objekte. Durch sie können wir z.B. etwas über die Zusammensetzung der proto-planetaren Scheibe und über die Entstehung des Sonnensystems lernen. Doch auch für unsere Zukunft spielen Kleinkörper eine Rolle. Die Menschheit wäre z.B. wohl nicht in ihrer jetzigen Art entstanden, wenn nicht der Impakt eines Kleinkörpers vor 65 Millionen Jahren zum Aussterben der Dinosaurier geführt hätte. Allerdings dürfte irgendwann in der Zukunft der nächste

Impakt drohen und darauf muss sich die Menschheit einstellen. Kleinkörper müssen erfasst und beobachtet werden. Mögliche Kollisionsbahnen zwischen einem Kleinkörper und der Erde müssen rechtzeitig abgeklärt werden, damit geeignete Gegenmaßnahmen getroffen werden können.

Diese Abhandlung über die kleinen Körper des Sonnensystems (Zwergplaneten und Kleinkörper) ist das Ergebnis einer Literaturrecherche. Die hierfür verwendete Literatur ist im Literaturverzeichnis aufgeführt und eignet sich auch zur Vertiefung der Thematik. Ich möchte allen sehr danken, welche mir beim Erstellen der Abhandlung geholfen haben. Dies gilt vor allem für das Korrekturlesen und die Zurverfügungstellung von Bildern.

## 9.0 Literatur- und Bilderverzeichnis

- 1) Arnold Hanslmeier, Einführung in die Astronomie und Astrophysik, 2013.
- 2) Hans Ulrich Keller, Das Himmelsjahr 2016 – Monatsthema: Rosetta – Inspektion eines Kometen, 2015.
- 3) Hans Ulrich Keller, Das Himmelsjahr 2014 – Monatsthema: Asteroiden – Gefahr aus dem All, 2013.
- 4) A. Weigert, H.J. Wendker, L. Wisotzki, Astronomie und Astrophysik, 2009.
- 5) Kenneth R. Lang / Charles A. Whitney, Planeten – Wanderer im All, 1993.
- 6) Klaus Lindner, Taschenbuch der Astronomie, 1993.
- 7) Rudolf Kippenhahn, Unheimliche Welten, 1987.
- 8) <http://www.planetenkunde.de/>, abgerufen im Januar 2017.

Bilderverzeichnis:

Titelbild: NASA

Bild 1: NASA

Bild 2: wikipedia.org

Bild 3: NASA

Bild 4: wikipedia.org

Bild 5: NASA

Bild 6: NASA

Bild 7: ESA

Bild 8: Ralf Schmidt

Bild 9: Erich Meyer / veröffentlicht [www.spektrum.de](http://www.spektrum.de)

Bild 10: wikipedia.org

Bild 11: wikipedia.org

Bild 12: <http://www.spiegel.de/wissenschaft/weltall/bild-971003-461465.html>

Bild 13: wikipedia.org