

# Der Kosmos – eine Datensammlung

1. Das Sonnensystem.....	2
1.1. Allgemeines.....	2
1.2. Erde.....	7
1.3. Mond.....	11
1.4. Weitere Begleiter der Erde (Near Earth Objects).....	15
1.5. Sonne.....	20
1.6. Merkur.....	21
1.7. Venus.....	23
1.8. Mars.....	28
1.9. Ceres und der Asteroiden-Hauptgürtel zwischen Mars und Jupiter.....	36
1.10. Jupiter.....	42
1.11. Saturn.....	47
1.12. Uranus.....	63
1.13. Neptun.....	68
1.14. Pluto und andere Trans-Neptun-Objekte.....	73
1.15. Kometen.....	79
1.16. Interstellare Asteroiden, Kometen und Meteoriten.....	92
2. Fixsterne.....	93
3. Galaxien und größere Einheiten.....	118
4. Das Universum als Ganzes.....	126

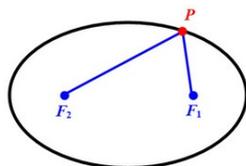
# 1. Das Sonnensystem

## 1.1. Allgemeines

Zu unserem Sonnensystem gehören:

- das Zentralgestirn: die Sonne.
- acht Planeten:
  - a) vier innere erdähnliche Gesteinsplaneten: Merkur, Venus, Erde, Mars
  - b) vier äußere Gasplaneten: Jupiter und Saturn (große Gasplaneten), Uranus und Neptun (kleinere Gasplaneten, Eisgiganten).
- Zwergplaneten (bislang fünf offiziell anerkannte): Ceres, Pluto, Haumea, Makemake, Eris.
- Monde, Asteroiden, Meteoroiden, Kometen, Staub, Sonnenwind.

Die Sonne ist das durch Kernfusion selbstleuchtende Zentralgestirn, das von der Erde und den übrigen Körpern des Sonnensystems umkreist wird, und zu diesem Sonnensystem gehören alle Körper, die durch die Anziehungskraft der Sonne (also das solare Gravitationsfeld) permanent in der Umgebung der Sonne festgehalten werden, indem sie sich permanent auf einer Umlaufbahn um die Sonne bewegen. Aus den Newtonschen Gesetzen der Physik ergibt sich das schon von Kepler durch Beobachtung postulierte Gesetz, dass die Umlaufbahn eines Körpers P um die Sonne stets eine Ellipse ist,<sup>1</sup> wobei aber die Sonne aber nicht im Mittelpunkt dieser Ellipse, sondern seitlich davon in einem der beiden Brennpunkte  $F_1$  oder  $F_2$  steht (ein Spezialfall hiervon wäre allerdings eine Kreisbahn, in deren Mittelpunkt die Sonne steht, denn der Kreis ist ja eine spezielle Ellipse, bei der die Brennpunkte miteinander und mit dem Mittelpunkt zusammenfallen).



Vorausgesetzt ist dabei allerdings, dass es außer der Sonne und dem sie umkreisenden Körper kein weiterer Körper mit seiner Anziehungskraft auf den Körper oder die Sonne einwirkt (was natürlich nicht der Fall ist), so dass die Umlaufbahnen nur annähernd Ellipsen der genannten Art sind.

Die meisten am Himmel sichtbaren Sterne sind ebenfalls sehr weit von uns entfernte Sonnen, also durch Kernfusion selbstleuchtende Himmelskörper, die aber so weit weg sind, dass ihr Licht verglichen mit dem der Sonne äußerst schwach ist. Aufgrund der weiten Entfernung konnte die Eigenbewegung dieser Sterne (d.h. Bewegungen, durch welche sie ihre Position zueinander verändern, in Gegensatz zu der täglichen Bewegung aller Sterne über den Himmel infolge der Rotation der Erde) nicht ohne starke Teleskope festgestellt werden, so dass sie für den menschlichen Betrachter vor dem Zeitalter der instrumentellen Astronomie relativ zueinander „festzustehen“ schienen. Man nannte sie daher Fixsterne. Diese dachte man nämlich an der drehbaren Himmelskugel fixiert und sie bildeten durch ihre feste Stellung zueinander für den menschlichen Betrachter bestimmte, über die Jahrhunderte gleichbleibende Figuren und Bilder: die Sternbilder. Davon gibt es achtundachtzig. Die wichtigsten zwölf Sternbilder sind die im folgenden Absatz erwähnten Tierkreissternbilder. Erst in jüngerer Zeit konnte man entdecken, dass viele der Fixsterne ebenfalls von Körpern begleitet werden, so dass es sich hier um andere Sonnensysteme handelt.

Planeten des (bzw. eines) Sonnensystems sind nicht-selbstleuchtende Himmelskörper, die um die Sonne kreisen, und zusätzlich die folgenden drei Bedingungen erfüllen:

- (1) Sie werden durch das Gravitationsfeld der Sonne auf einer Umlaufbahn um die Sonne festgehalten, umkreisen dabei aber (im Gegensatz zu den Monden) keinen anderen sich ebenfalls auf einer solchen Umlaufbahn befindlichen Körper;
- (2) Sie sind infolge einer Rotation um die eigene Achse und infolge des Ausgleichs zwischen Gravitation und innerem Druck annähernd kugelförmig, was in der Regel der Fall ist, wenn der Körper größer als 1000 km ist und
- (3) Sie sind auf ihrer Umlaufbahn dominierend, derart dass sich auf ihrer Umlaufbahn um die Sonne oder in der Nähe dieser Umlaufbahn kein anderer zum Sonnensystem gehörender Körper derselben Größenordnung befindet.

1

Eine Ellipse ist bekanntlich die Menge aller Punkte P einer Ebene, die die Eigenschaft haben, dass für zwei fest gewählten Punkten  $F_1$  und  $F_2$  (genannt die Brennpunkte der Ellipse) die Summe der Abstände  $PF_1 + PF_2$  stets einen bestimmten festen Wert  $h$  hat (genannt der Hauptachsenwert). Man kann daher die Ellipse in der sog. „Gärtnerkonstruktion“ dadurch zeichnen bzw. abstecken, dass man am Ort der Brennpunkte  $F_1$  und  $F_2$  jeweils einen Pflock in die Erde steckt und einen Strick der Länge  $h$  mit den beiden Ende an den beiden Pflocken befestigt. Diesen Strick spannt man dann mit einem Stift straff an, und zeichnet mit dem Stift eine geschlossene Kurve um die Pflocke herum, wobei man den Stift so hält, dass der Strick jederzeit gestrafft bleibt. Auf diese Weise kann man offenbar die Ellipse mit Brennpunkten  $F_1$  und  $F_2$  und Hauptachsenwert  $w$  zeichnen. Wenn die beiden Brennpunkte identisch sind, d.h. in einem einzigen Punkt  $F$  zusammenkommen, so ist die Ellipse mit ein Kreis mit Mittelpunkt  $F$  und Radius  $h/2$ .



Die Umlaufbahnen der Planeten unseres Sonnensystems befinden sich alle annähernd in ein und derselben Ebene: der *Planetenebene*. Die Umlaufebene der Erde heißt die *Ekliptik*. Die Bahnebenen der anderen Planeten sind gegenüber der Ekliptik nur um eine wenige Grad geneigt. Das Wort „Planet“ kommt von griech. „planao“ = *wandern, umherirren*, bedeutet also „*Wandelstern*“ im Gegensatz zu „*Fixstern*“. Die Planeten verändern nämlich ihre Position relativ zu den Fixsternen, sie wandern von einem Sternbild ins andere. Die zwölf Sternbilder, die am Himmel die Planetenebene markieren und durch welche die Planeten (aber auch Sonne und Mond) „hindurchwandern“, heißen Widder, Stier, Zwillinge, Krebs, Löwe, Jungfrau, Waage, Skorpion, Schütze, Steinbock, Wassermann und Fische (das ist die Reihenfolge, in der von der Erde aus gesehen die Sonne sie im Lauf eines Jahres durchwandert). Die Position der Sonne im Frühlingsanfang – zum Zeitpunkt der „Tag- und Nachtgleiche“, wo Tag und Nacht gleich lang sind – heißt „*Frühlingspunkt*“ und befindet sich im Sternbild Fische. Der Frühlingspunkt (also der Aufenthaltsort der Sonne zu Frühlingsanfang) verschiebt sich allerdings sehr langsam, und zwar ca. alle 2000 Jahre um ein Sternbild; er befand sich vor über 2000 Jahren im Sternbild Widder und wird bald in das Sternbild Wassermann eingehen. Da die meisten dieser wichtigen Sternbilder, in welchen man Sonne, Mond und Sterne finden kann, Tier-Bilder sind, heißen sie die *zwölf Tierkreis-Sternbilder*.

*Zwergplaneten* des (bzw. eines) Sonnensystems sind nicht-selbstleuchtende Himmelskörper, die von den drei Bedingungen für einen Planeten nur die Bedingungen (1) und (2), nicht aber Bedingung (3) erfüllen.

*Asteroiden* (von griech: „asteroides“ = *sternartig*) auch Kleinplaneten oder Planetoiden genannt) und *Meteoroiden* (von griech. „meteoros“ = *schwebend*) sind um die Sonne kreisende nicht-selbstleuchtende Kleinkörper, die kleiner als Zwergplaneten (also in der Regel kleiner als 1000 km) aber nicht kleiner als ein Millimeter sind; dabei sind die Meteoroiden die kleineren dieser Kleinkörper (kleine Gesteinsbrocken mit Durchmessern in der Größenordnung von einem Millimeter bis zu ca. 10 Metern), die Asteroiden sind die größeren, wobei es aber eine scharfe Abgrenzung zwischen Meteoroiden und Asteroiden nicht gibt. Ein Meteoroid, der in die Atmosphäre der Erde eindringt und dabei durch Luftreibung eine Leuchtspur erzeugt, heißt *Meteor* oder Sternschnuppe. Ein Meteoroid, der als Meteor nicht verdampft, sondern bis zum Erdboden vordringt, und dort manchmal einen Einschlagkrater erzeugt, heißt *Meteorit*.

Geladene Teilchen (Elektronen und Atomkerne) die von der Sonne ausgehend das Sonnensystem durchheilen, nennt man den *Sonnenwind*, und Partikel im Sonnensystem, die nicht zum Sonnenwind gehören, aber kleiner als Meteoroiden sind, und eine Art „Medium“ des vom Sonnensystem eingenommenen Raumes ausmachen, das über die ganze Planetenebene hin verteilt ist, heißen *interplanetare Staubteilchen* (oder *Mikrometeoroiden*). Von der Sonne angestrahlte Staubteilchen in der Planetenebene bilden das in manchen Nächten sichtbare matt schimmernde *Zodiakallicht* (von griech. zodiakos = tierhaft; daher auch *Tierkreislicht* genannt) – so genannt, weil es nur in den zwölf Tierkreis-Sternbildern sichtbar werden kann, welche die Planetenbahnebene markieren.



Zodiakallicht

Unter einem *Kometen* (von griech. „Kometes“ = *haartragend, langhaarig*; auch *Schweifstern* oder *Haarstern*) versteht man einen kleinen Himmelskörper von meist einigen Kilometern Durchmesser, der aber in den sonnennahen Teilen seiner Bahn eine durch Ausgasen einen leuchtenden Schweif entwickelt, der um ein Vielfaches größer als der Kern des Kometen sein kann.

Unter einem *Mond* (auch *Satellit* von lat. „satelles“ = Begleiter; oder *Trabant* genannt) versteht man einen Himmelskörper, der einen um die Sonne kreisenden Himmelskörper umkreist. Sowohl Planeten als auch Zwergplaneten als auch Asteroiden als auch Kometen können Monde haben. Monde sind immer kleiner als die Himmelskörper, die sich umkreisen, aber ein Mond eines großen Planeten kann größer sein als andere Planeten. Theoretisch könnte es auch Monde von Monden geben (sog. *Submonde*), aber bisher wurde noch kein Submond entdeckt.

---

Die *Rotation* eines Himmelskörpers ist seine Drehung um eine eigene Achse, die *Rotationsachse* (fast jeder Himmelskörper führt eine solche Drehung aus). Die beiden Punkte, in denen die Rotations-Achse die Oberfläche des Himmelskörpers berührt, heißen seine *Pole*. Die Ebene, die auf der Achse senkrecht steht und die durch den Mittelpunkt zwischen den beiden Polen geht, heißt die Äquatorialebene des Himmelskörpers; der Linie, in der sich Oberfläche und Äquatorialebene schneiden, heißt der *Äquator* des Himmelskörpers. Bei den meisten um die Sonne kreisenden Körpern liegen nicht nur ihre Umlaufbahnen alle ungefähr in derselben Ebene auf der auch die Erde sich bewegt, sondern sie drehen sich auf dieser Ebene auch im selben Drehsinn wie die Erde, und zwar sowohl um die Sonne als auch um sich selbst in genau demselben Drehsinn. Bei Himmelskörpern des Sonnensystems, die sich anders herum drehen, heißt die

Drehung *retrograd* („rückwärts herum“). Ferner ist die Umlaufbahnebene eines um die Sonne kreisenden Himmelskörpers in der Regel in etwa (aber nicht genau) mit der Äquatorebene identisch. Wir können deshalb bei den meisten Körpern im Sonnensystem die beiden durch ihren Äquator getrennten Halbkugeln eindeutig als „Nordhalbkugel“ und „Südhalbkugel“ bezeichnen, und den dort liegenden Pol als „Nordpol“ bzw. „Südpol“. Ebenso können wir diejenige Richtung in die sich die meisten Körper drehen, (nämlich bei Blick „von oben“ auf den Nordpol entgegen dem Uhrzeigersinn) als „Ostrichtung“ und die Gegenrichtung als „Westrichtung“ auf dem entsprechenden Himmelskörper festlegen. Wenn die Bahnebene und die Äquatorebene identisch sind, steht die Rotationsachse genau senkrecht auf der Bahnebene, andernfalls ist sie gegenüber der Bahnebene leicht geneigt. Man spricht von der Achsenneigung des Himmelskörpers und gibt diesen in Winkelgrad an (bei der Erde derzeit etwa 23,5°). Eine Achsenneigung von 90° bedeutet, dass die Rotationsachse des Himmelskörpers auf seiner Bahnebene liegt, so dass sich der Himmelskörper quasi auf seiner Bahnebene wälzt (dies ist beim Planet Uranus der Fall). Bei retrograder Rotation gibt man als Achsenneigung Werte größer als 90° an. Die Rotationsachse zeigt während des Umlaufes um die Sonne in etwa immer in dieselbe Richtung und behält auch ihre Neigung bei; auf sehr lange Zeiten hin kann sich aber sowohl die Achsenneigung als auch ihre Richtung deutlich ändern. Die Achsenneigung sorgt dafür, dass auf dem Planeten Jahreszeiten gibt, d.h. regelmäßige Perioden in der Zeit eines Umlaufs des Planeten um die Sonne, in denen es am selben Ort auf der Planetenoberfläche kälter und wärmer wird, wobei die Kalt- und Warmzeiten auf der Nord- und Südhalbkugel stets „gegenläufig“ sind: Ist auf der Nordhalbkugel die kalte Jahreszeit („Winter“) so auf der Südhalbkugel die warme („Sommer“) und umgekehrt.

---

**besondere astronomische Entfernungsmaße:**

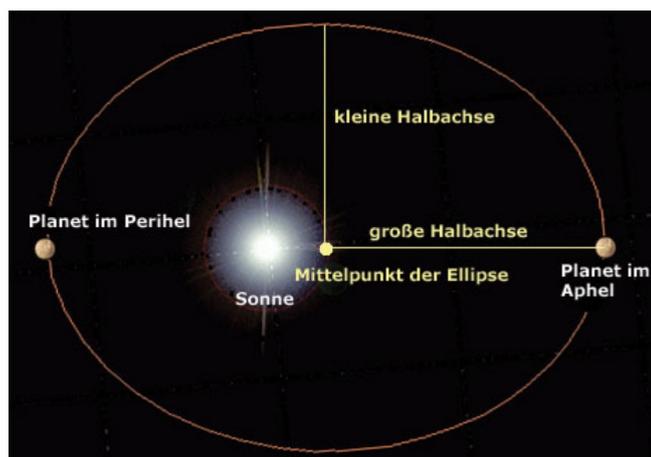
1 AU (Astronomical Unit, Astronomische Einheit): die mittlere Entfernung der Erde von der Sonne = ca. 150 Millionen Kilometer, genauer 149,6 Millionen km.

1 Lj (Lichtjahr): die Zeit, die das Licht in einem Jahr zurücklegt = ca. 63.241 AU = ca. 10 Billionen Kilometer. (das Licht legt in 1 Sekunde ca. 300.000 Kilometer zurück, gelangt also in einer Sekunde zum fast bis zum Mond, in 8 Minuten zur Sonne, in ca. 4 Stunden und 10 Minuten von der Sonne zum Neptun, dem fernsten Planeten des Sonnensystems, und in ca. 4 Jahren zum nächsten Fixstern, d.h. zur nächsten Sonne: diese ist also ca. 4 Lichtjahre von uns entfernt).

1 pc (Parsec, Parallaxensekunde): die Entfernung, von der aus gesehen die Erde von der Sonne nur eine Bogensekunde entfernt erscheint, wobei eine Bogensekunde der 3600. Teil des Winkels von einem Grad ist. Es stellt sich heraus, dass 1 pc ungefähr 3 Lichtjahre ist (genauer: 3,26 Lichtjahre).

---

**Kategorien für Körper, die einen anderen auf einer Ellipse umreisen, der im Brennpunkt der Ellipse steht**



Die Große Halbachse einer Ellipse ist der Abstand vom Ellipsen-Mittelpunkt zum entferntesten Ellipsenpunkt. Bei einem Planeten ist dies zugleich seine mittlere Entfernung von der Sonne (die ja in einem der beiden Brennpunkte seiner elliptischen Bahn steht); bei einem Planeten-Mond ist dies seine mittlere Entfernung zu dem Planeten, den er umkreist.

Die Periapsis (griech. „peri“ = *nahe bei*, „apsis“ = *Bogen*) einer elliptischen Bahn ist die kleinste Entfernung eines Ellipsenbahn-Punktes vom Körper, den er umkreist, und der in einem der beiden Brennpunkte der Bahnellipse steht; die Apoapsis (griech. „apo“ = *von etwas weg*, „apsis“ = *Bogen*) ist die größte Entfernung eines Ellipsenbahn-Punktes vom Zentralkörper, der im Brennpunkt der Bahnellipse steht. Beide zusammen (Periapsis und Apoapsis) heißen auch die beiden Apsiden einer elliptischen Umlaufbahn.

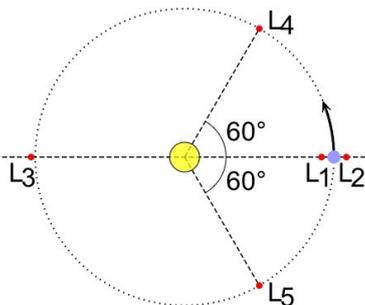
Bei Umlaufbahnen eines Himmelskörpers *um die Sonne* (griech. Helios) heißt die Periapsis das Perihel, die Apoapsis auch das Aphel; Bei Umlaufbahnebene eines Himmekörpers *um die Erde* (griech. Gäa) heißt die Periapsis das Perigäum, die Apoapsis auch Apogäum.

Die numerische Exzentrizität (griech. „ek kentron“ = *aus dem Zentrum heraus*, gemeint ist die Abweichung von der Kreisform) einer elliptischen Bahn eines Himmelskörpers ist der Abstand der Ellipsen-Brennpunkte vom Mittelpunkt geteilt durch die Länge der großen Halbachse der Ellipse; der Wert der Exzentrizität ist 0 beim Kreis und nahezu 1 bei einer langgestreckten Ellipse; daher ist die numerische Exzentrizität ein *Maß für die Abweichung der Ellipse von der Kreisform*.

Die Inklination (lat. *Neigung*) ist *bei einem Planeten des Sonnensystems* der Winkel zwischen seiner Bahnebene und der Erdbahnebene (der Ekliptik), eine Inklination  $0^\circ$  bedeutet also, dass der Planet in genau derselben Bahnebenen um die Sonne kreist wie die Erde; die größte Inklination wäre  $90^\circ$  und würde bedeuten, dass seine Bahnebenen senkrecht auf der Bahnebene der Erde steht. *Bei einem Mond* bezeichnet die Inklination den Winkel zwischen den Äquatorebene des Himmelskörpers, den der Mond umkreist, und der Bahnebenen des Mondes. Eine Inklination  $0^\circ$  bedeutet hier also, dass die Mondbahn über die beiden Pole des Planeten.

Knoten nennt man die Schnittpunkte der Bahn eines Himmelskörpers mit der Erdbahnebene (Ekliptik). Der Punkt, in dem die Bahn des Himmelskörpers die Erdbahnebene von Süden nach Norden durchstößt, heißt *aufsteigender Knoten* und der Punkt, an dem die Bahn die Erdbahnebene von Norden nach Süden durchstößt, heißt *absteigender Knoten*. Beide Knoten liegen sich am Himmel genau gegenüber. Die Knoten der Mondbahn sind besonders wichtig: Nur wenn der Mond sich genau in einem der beiden Knoten befindet, kann es zu einer Sonnen- oder Mondfinsternis kommen: Denn dazu müssen Sonne, Erde und Mond genau in einer Linie stehen – nur dann kann entweder der Mond die Sonne verdecken (und es kommt zur Sonnenfinsternis) oder die Erde den Mond verdecken (dann kommt es zur Mondfinsternis).

Die Lagrange-Punkte (Librationspunkte) L1 bis L5 in einer Umlaufbahn eines Himmelskörpers mit kleinerer Masse um einen anderen mit größerer Masse (z.B. in der Umlaufbahn der Erde um die Sonne) sind die folgenden fünf „Punkte des Gleichgewichts“, an denen sich ein Raumflugkörper antriebslos um den massereicheren Himmelskörper kreisen kann, derart dass er seine Position relativ zu den beiden Himmelskörpern immer dieselbe bleibt.



L4 bis L5 sind stabile Gleichgewichtspunkte (d.h. bei kleinen Abweichungen vom Librationspunkt kommt der Raumflugkörper von selbst wieder zum Librationspunkt zurück), L1 bis L3 sind dagegen instabil. Bei kleinen Körpern, die sich in den stabilen Punkten L4 bis L5 befinden, spricht man von den Trojanern des umlaufenden Himmelskörpers. Die in L4 befindlichen Kleinkörper nennt man das *dem Himmelskörper voraneilende „Lager der Griechen“*, die L5 befindlichen, dem Himmelskörper nacheilenden Kleinkörper bilden dagegen das *„Lager der Trojaner“*.

Elongation: Unter der von einem bestimmten Raumpunkt P aus beobachteten Elongation zweier Himmelskörper A und B versteht man den Winkel APB. Spricht man nur von der Elongation eines Himmelskörpers A, meint man damit die von der Erde aus beobachtete Elongation zwischen A und der Sonne.

Scheinbare Helligkeit oder Größe(nklasse) (lat. *Magnitude*, Formelzeichen mag oder m, siehe auch unten S. 95) eines leuchtenden Himmelskörpers: Die hellsten Fixsterne wurden in der Antike (vielleicht schon bei den Babyloniern und bei Hipparch, in jedem Fall aber im um 145 n. Chr. geschriebenen Almagest des Ptolemäus) Sterne 1-ter Größe genannt, die etwas weniger hellen Sterne 2-ter Größe usw., die schwächsten Sterne 6-ster Größe. Die Helligkeitsskala wurde nach oben und unten erweitert und 1850 von *Norman Pogson* logarithmisch so *definiert*, dass ein Stern erster Größe (1,0 mag) genau hundertmal so hell sein soll wie ein Stern sechster Größe (6,0 mag), und dieser hundertmal heller als ein Stern elfter Größe (11,0 mag), es soll sich also die physikalisch messbare (Licht-)Strahlstärke (= Strahlungsleistung pro Raumwinkeleinheit = Strahlungsenergie pro Zeit und Raumwinkeleinheit) alle fünf Magnituden ver Hundertfachen. Pro Magnitude soll sich dabei natürlich die Lichtstrahlstärke um denselben Faktor erhöhen, und folglich entspricht einem Größenunterschied von einer Magnitude (1 mag) ein Helligkeitsunterschied um den Faktor  $\sqrt[5]{100} = 2,511886 \dots$  Als Referenzpunkt diente anfangs der Polarstern, der auf mag 2 gesetzt wurde (bis entdeckt wurde, dass er in der Helligkeit differiert). Wega galt als Stern mit mag 0. Seit 1922 definiert man den absoluten Fixpunkt durch eine Reihe von Sternen konstanter Helligkeit nahe dem Himmelsnordpol (mit bis zu  $2^\circ$  Abstand vom Polarstern), deren Helligkeit genau gemessen wurde: die sog. „Polsequenz-Sterne“, deren Zahl schrittweise erweitert wurde, sie umfasst heute 96 Sterne. Beachte: Je *kleiner* die Zahl m ist, desto *heller* ist der Himmelskörper: Sterne mit  $m = 1$  sind *heller* als solche mit  $m = 2$ , ähnlich wie die Schulnote 1 besser und Anzeichen eines „helleren Verstandes“ ist als die Schulnote 2; die deutschen Schulnoten 1 bis 6 entsprechen daher den Größenklassen der Sterne. Die Skala der ursprünglich 6 Größen wurden in beide Richtungen hin erweitert: So haben Sterne, die noch lichtschwächer sind als jene der 6-ten

Größenklasse, Größenklassen 7, 8, 9 usw., während Sterne die noch heller sind als solche der 1-sten Größenklasse die Klassen 0, -1, -2 usw., und man benutzt für genauere Angaben auch Kommazahlen, so hat die Sonne die scheinbare Helligkeit  $-27,73$ .

Absolute Helligkeit oder Größe(nklasse) (lat. Magnitude, Formelzeichen  $M$ ) eines leuchtenden Himmelskörpers: Die scheinbare Größe, die er hätte, wenn er von uns 10 Persec (= 32,6 Lichtjahre) entfernt wäre. Die absolute Helligkeit der Sonne, deren scheinbare Helligkeit ja  $-27,73$  ist, ist „nur“ 4,83, d.h. wenn die Sonne 32,6 Lichtjahre von uns entfernt wäre (oder auch, wenn wir uns so weit von ihr entfernen würden), würde sie uns nur noch als ein Stern der 4-ten Größenklasse erscheinen.

Absolute Größe  $H$  eines nicht selbst-leuchtenden Körpers im Sonnensystem: Dies soll die scheinbare Größe sein, die er hätte, wenn er von der Sonne 1 AE entfernt wäre, und ebenso vom Beobachter 1 AE entfernt, wobei der Phasenwinkel (Winkel Sonne-Objekt-Beobachter)  $0^\circ$  wäre (d.h. der Beobachter müsste auf der Sonne lokalisiert sein).

Albedo (lag. Weiße): Rückstrahlvermögen: Anteil des einfallenden Lichtes, der reflektiert wird.

---

Unter der auf einem Himmelskörper vorherrschenden Schwerkraft versteht man die Beschleunigung in  $(\text{km/s})/\text{s}$  bzw in  $\text{km/s}^2$ , die ein in Oberflächennähe frei fallen gelassener Körper durch die Anziehungskraft (Gravitationskraft) des Himmelskörpers erhält. Die irdische Schwerkraft (von  $9,81 \text{ km/s}^2$ ) bezeichnet man auch als 1 g. Unter der Ersten kosmischen Geschwindigkeit (oder Kreisbahngeschwindigkeit) eines Himmelskörpers versteht man die Geschwindigkeit, die ein von der Oberfläche aus horizontal geworfenes Objekt mindestens haben muss, um in eine Umlaufbahn um den Himmelskörper zu gelangen, also nicht mehr auf den Himmelskörper zurückzufallen. Sie beträgt auf der Erde 8 km/s. Unter der Zweiten kosmischen Geschwindigkeit (oder Fluchtgeschwindigkeit) versteht man die Geschwindigkeit, die ein vom Himmelskörper aus startendes Projektil mindestens haben muss, um die Anziehungskraft des Himmelskörpers endgültig zu überwinden, d.h. um ohne weiteren Antrieb diesen Körper endgültig zu verlassen (also weder auf ihn zurückzufallen noch in einer Umlaufbahn um ihn eingefangen zu werden). Diese Geschwindigkeit beträgt für die Erde 11,2 km/s.

## 1.2. Erde



**Erde** (lat. Terra; griech. Ge, Gaia; sumerisch Ki; chin. 地球 (*Dìqiú*) und Element Erde 土), Thulcandra („schweigender Stern“) bei C.S. Lewis. Symbol ♂ (Reichsapfel, Christus regiert über sie). Alter 4,54 Milliarden Jahre.

**Gr. Halbachse:** 149,6 Millionen km (Perihel 147,1, Aphel 152,1, Exzentrizität 0,02), d.h. 1 AU (0,983 – 1,017).

**Umlaufzeit:** 365d: tropisch 365,2422, siderisch 365,2564, anomalistisch 365,2596;<sup>2</sup> 30 km/s.

**Rotation** 23d (siderischer Tag), 24 Stunden (Sonntag), Achsenneigung 23,5°; ½ km/s;

**Größe:** Ø 12.742 km;<sup>3</sup> Umfang 40.000km; Fläche 510 Mio. km<sup>2</sup>, Land 150 Mio. km<sup>2</sup> (30%); Albedo 0,36; H = -3,9.

**Masse:** 6•10<sup>24</sup> kg, Dichte 5510 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft: 9,81 km/s<sup>2</sup> (= 1 g),<sup>4</sup> 1. Kosmische Geschw. 8 km/s Fuchtschwindigkeit 11,2 km/s.

**Atmosphäre:** Luftdichte 1,2 kg/m<sup>3</sup>, Druck 1 Bar (1013 Millibar = Hektopascal), wie Wasserdruck in 10 Metern Tiefe, Skalenhöhe 8,5 km,<sup>5</sup> Zusammensetzung 78 % Stickstoff, 21 % Sauerstoff, 1 % Argon, 0,04 Kohlenstoffdioxid;

**Temperatur:** -89° bis 58° im Schatten. Mittlere Temperatur 15°. Gleichgewichtstemperatur (die die Erde ohne Treibhauseffekt hätte, berechnet durch den Sonnenabstand unter der Annahme, dass der Planet ein Schwarzer Körper wäre): -18°.

**Magnetfeld** (Oberfläche) 30–60 Mikrottesla µT (30 am Äquator, 60 an den Polen). Vgl. Hufeisenmagnet mit 0,1 Tesla (2000 x stärker). Magnetisches Dipolmoment der Erde derzeit 7,7 • 10<sup>22</sup> Am<sup>2</sup>, Inklination 11,4°, Verschiebung der Achse aus dem Mittelpunkt 510 km.<sup>6</sup>

**Topologie:** Nullniveau (NN) ist der Meeresspiegel, Amsterdamer Pegel (*Normaal Amsterdams Peil*, NAP);

Nullmeridian (von dem aus die Längengrade gemessen werden): Greenwich bei London.

Höchster Punkt, bzgl. NN: Mount Everest / Himalaya 8,848 m; Tiefster Punkt: Challenger-Tief / Marianen-Graben 10.994 m.

Höchster Punkt, bzgl. Erdmittelpunkt (Geozentrum = Schwerpunkt der Erde): Chimborazo / Ecuador 6267 m (früher 6310).<sup>7</sup>

Höchster Punkt in Bezug auf Ozeanboden: Mauna Kea (weißer Berg) / Hawaii 4205 m über NN, aber 10.203 m über dem Ozeanboden.

Einteilung der Atmosphäre: erstens *Troposphäre* 0–15 km, genauer 18 km am Äquator, 8 km an den Polen (dort im Winter 2 km niedriger als im Sommer): veränderliche Wetterschicht mit Wolken, Regen und Wind, diese Schicht enthält 90 % der Luft und fast allen Wasserdampf, Abnahme der Temperatur um 1° je 100 m bis -75° am Äquator und -45° an den Polen; zweitens *Stratosphäre* („Deckensphäre“) 15–50 km: anders als in der Troposphäre sind hier wärmere Bereiche über kühleren; in der unteren Stratosphäre liegt die *Ozonschicht* 15–35 km hoch; in 50 km liegt die Temperatur wieder bei 0°; drittens *Mesosphäre* 50–80 km: Bereich der Meteore, kalte Schicht, Temperatur sinkt langsam mit der Rate von 3° je km von 0° auf -90° ab; viertens *Thermosphäre* 80–500 km: extrem dünn (millionenfach dünner als am Boden), wieder Temperaturanstieg auf 2000° (der sich wegen der geringen Dichte nicht bemerkbar macht), fünftens *Exosphäre* 500–100.000 km. Die *Ionosphäre* (60–600 km mit D-, E-, und F-Schicht: D = Dämpfungsschicht in 60–80 km tagsüber bei starker Sonneneinstrahlung vorhanden, dämpft=absorbiert Kur- und Mittelwellen, reflektiert Langwellen; E-Schicht reflektiert Mittelwellen, Kurzwellen passieren, verschwindet in den späten Abendstunden; F-Schicht 200–600 km, reflektiert Kurzwellen) umfasst die Thermosphäre und Teile der Meso- und Exosphäre. Andere Einteilung: *Homosphäre* (mit Durchmischung der Atmosphärogase) 0–80 km, *Homopause* oder *Turbopause* (Übergangsbereich 80–120 km) und *Heterosphäre* (Trennung der Bestandteile) über 120 km. Grenze zum Weltraum (*Kármán-Grenze*, nach dem ungarisch-amerikanischen Luft- und Raumfahrtgenieur Theodore von Kármán) in der Mitte der Homopause bei 100 km.

Einteilung der Erdschichten: *Kruste* (0–35 km, Dicke variiert zwischen 5 und 70 km; zwei Arten: die kontinentale Kruste, die neben Sauerstoff Silizium und Aluminium enthält, und die ozeanische Kruste unter dem Meeresboden, die neben Sauerstoff Silizium und Magnesium enthält; die Temperatur steigt um 3° pro 100 m an.), *Mantel* (35–2900 km: oberer 35–410 km, Übergangszone 410–750 km, unterer 750–2900, Temperatur einige 100–3500°, Mantel besteht aus Olivin und Pyroxiden, Mineralien mit mehr Eisen und Magnesium und weniger Silizium und Aluminium als das Krustengestein; Olivin des oberen Mantels hat Dichte 3300 kg/m<sup>3</sup>, weiter unten hat es eine wesentlich dichtere Phase), *Kern* aus Eisen & Nickel: flüssiger äußerer Kern 2900–5100 km, enthält neben Eisen und

<sup>2</sup> Tropisches Jahr

Offizielles bürgerliches Jahr seit 1582

Offizielles bürgerliches Jahr (45 v.Chr. – 1582):

Siderisches Jahr:

Anomalistisches Jahr:

Das tropische Jahr, welches das gewöhnliche ist, nimmt derzeit um ½ s pro Jh. ab. Die obigen genauen Angaben beziehen sich auf das Jahr 2000 (die sog. „Epoche J2000.0“), beim anomalistischen Jahr auf das Jahr 2011. Für die Definition des *Lichtjahrs* (Strecke, die das Licht in einem Jahr zurücklegt) verwendet man übrigens nicht das tropische, sondern das julianische Jahr, weil man damit einfacher rechnen kann. Dazu kommen die noch stärker vom tropischen Jahr abweichenden weiteren „Jahre“:

*Drakonisches Jahr* (Zeit, in der die Sonne in ihrem jährlichen Lauf von einem der beiden Mondknoten – d.h. einem der beiden Punkte am Himmel, in dem die Mondbahnebene die Erdbahnebene schneidet – ausgehend wieder zu diesem zurückkommt): 346d.6;

*Vollmondzyklus* (Zeit in der die Sonne in ihrem jährlichen Lauf von Perigäum des Mondes – dem Punkt, in dem der Mond seinen kürzesten Abstand zur Erde hat – ausgehend wieder zu diesem zurückkommt): 411d.9;

*Lunares Jahr* (12 synodische Monate, d.h. zwölf Perioden vom Neumond über den Vollmond zurück zum Neumond): 354.37d.

<sup>3</sup> Äquatordurchmesser: 12.756 km; Poldurchmesser: 12.714 km, Differenz 42 km; also Abplattung 0,3 %.

„Könnte man einen Tunnel durch die Erde hindurch bohren, Reibungsverluste ausschalten und dem Einfluss der Corioliskraft entgegenwirken und wäre die Dichte der Erde in jedem Punkt gleich der mittleren Dichte der Erde, würde ein in diesen Schacht hineinfallender Gegenstand im freien Fall in rund 42 Minuten bis zum anderen Ende hindurchfallen. Die Bewegung wäre wie eine Schwingung mit einer Periodenlänge von 84 Minuten.“

<sup>4</sup> Variiert zwischen Pol und Äquator von 9,83 auf 9,767 m/s<sup>2</sup> (Chimborazo). Die Erde hat unter den Planeten die drittgrößte Schwerkraft nach Jupiter und Neptun.

<sup>5</sup> Die Skalenhöhe („scale height“) ist die Höhendifferenz, die man zurücklegen muss, damit der Druck um das e-fache ( $e \approx 2,71828$ ) sinkt. Zum Vergleich: Venus 15,9 km, Mars 11,1, Jupiter 27 km, Saturn 59,5 km, Titan 40 km, Uranus 27,7 km, Neptun 19,1 bis 20,3 km.

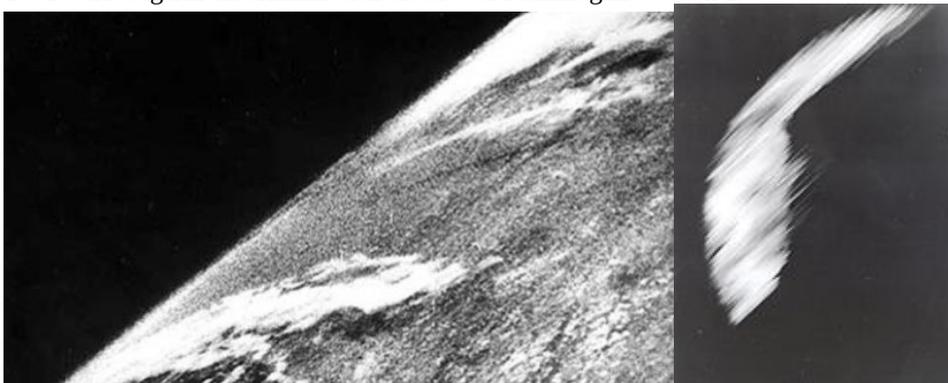
<sup>6</sup> Zum Vergleich: **Sonne** 100 µT (Sonnenflecke 0,4 T); **Merkur** 450 nT (Nanotesla), Dipolmoment 4,9 • 10<sup>19</sup> Am<sup>2</sup>, magnetische Inklination 2,3°, Abstand der Magnetachse vom Zentrum 500 km; **Venus** < 10 nT (vgl. interplanetar 2–4 nT), atmosphärisch induziert aber 120 nT; < 4 • 10<sup>18</sup> Am<sup>2</sup>; **Mond** lokal max. 300 nT, < 4,4 • 10<sup>10</sup> Am<sup>2</sup>; **Mars** regional max. 220 nT, < 2,5 • 10<sup>19</sup> Am<sup>2</sup>; **Jupiter** 400–1.400 mT, 1,5 • 10<sup>27</sup> Am<sup>2</sup>, 9,6°, 5000 km; **Saturn** 20 mT Äquator, 4,7 • 10<sup>25</sup> Am<sup>2</sup>, 0,0°, 2400 km; **Uranus** 10–110 µT, Durchschnitt 23 µT, 3,8•10<sup>24</sup> Am<sup>2</sup>, 58,6°, 8000 km; **Neptun** 1,5 µT am Äquator, 2,1•10<sup>24</sup> Am<sup>2</sup>, 46,9°, 13.600 km.

<sup>7</sup> Der Chimborazo liegt auf 1° südl. Breite und ist höher als alle nördlicheren Berge Amerikas, galt bis 1856 (Höhenmessungen von George Everest im Himalaya) als höchster Berg der Erde, Entfernung vom Geozentrum 6267 + 6.384,557 km = 6390,824 km gegenüber Mount Everest (28° nördl. Breite, 6382,414 km) um 2 km größer.

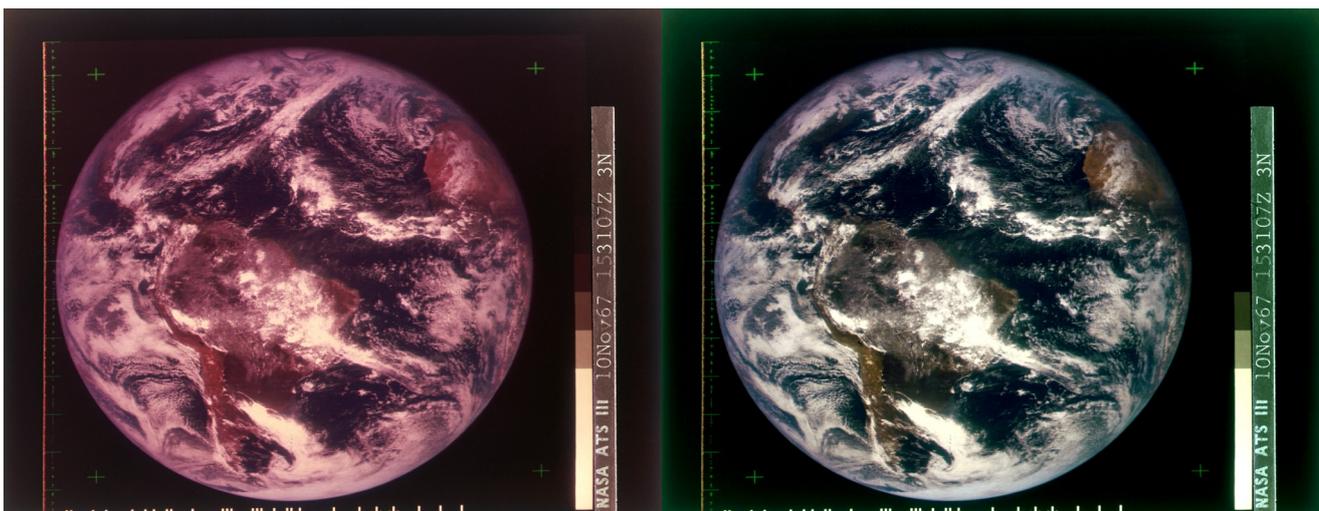
Kickel 10–15% leichtere Elemente, vermutlich Sauerstoff, Schwefel und Silizium, strömt mit 1mm/s: hier entsteht das Magnetfeld; fester innerer Kern 5100–6371 km, Eisen-Nickel-Legierung mit 80% Eisen; Temperatur 6000°. Die oberste Schicht (100 km) des Erdmantels wird mit der Kruste zur *Lithosphäre* zusammengefasst. Darunter kommt die *Asthenosphäre* (bis hinunter zur Grenze zwischen oberem und unterem Erdmantel bei 410 km) mit festem, aber plastisch-duktilen Gestein in ständiger Bewegung bis zu 10cm pro Jahr mit Olivin, Orthopyroxen, Spinell und Granit. Unter der *Erdhülle* versteht man die Atmosphäre, die Hydrosphäre (Wasserhülle), Biosphäre und Lithosphäre zusammengekommen.

**Missionen**

- 596–594 v. Chr.: Phönizische Kaufleute umsegeln im Auftrag von Pharao Necho II. (610-595 v. Chr.) den Kontinent Afrika.
- 1492: Kolumbus entdeckt Amerika.
- 1519–22 Magellans Flotte (zuletzt unter Befehl von Elcano) umsegelt die Erde.
- 1606: Willem Jansz entdeckt Australien.
- 1821: John Davis betritt als erster Mensch die Antarktis.
- 1909: Robert Peary erreicht den Nordpol.
- 1911: Roald Amundsen erreicht (kurz vor dem Engländer Robert Scott) den Südpol.
- 1944 (20. Juni): eine V2-Testrakete erreicht von Peenemünde/Usedom aus den Weltraum (175 km Höhe); Grenze des Weltraums nach heutiger Definition der FAI in nur 100 km Höhe).<sup>8</sup>
- 1946: eine V2-Rakete startet von White Sands Missile Range in New Mexico und erreicht 105 km Höhe, von wo ein erstes Bild der Erde aus dem Weltraum geschossen wird.
- 1953: Edmund Hillary (Neuseeland) und Tenzing Norgay besteigen den Mt. Everest im Himalaya.
- 1960: Jacques Piccard und Don Walsh besuchen das Challengerief im Marianengraben.
- 1957 (4. Okt.): Erster künstlicher Satellit Sputnik („Begleiter“, UdSSR), Erdumkreisung alle 96 Min., verglüht 92d nach Start.
- 1959 (7. Aug.): Satellit Explorer 6 (USA) startet; am 14. Aug. erste Aufnahme der Erde aus dem Weltraum aus 27.000 km.
- 1961: Juri Gagarin unternimmt den erster Weltraumflug in Wostok 1.



erstes Erdbild vom Weltraum aus: V2-Rakete (1946), aus 105 km Entfernung<sup>9</sup> Explorer 6 (1959) aus 27.000 km Entfernung



<sup>8</sup> Schon am 3. Oktober 1942 hatte eine V2 die Höhe von 85 km erreicht, also fast die Grenze zum Weltraum erreicht. 1948 erreichen den Weltraum ebenfalls die amerikanischen Raketen Bumper 1 (127 km), Bumper 3 (150 km); 1949 erreicht Bumper 5 393 km Höhe. Die Bumper-Raketen waren Weiterentwicklungen der V2.

<sup>9</sup> Dies ist eines der ersten Foto der Erde vom Weltraum aus, gemacht von einer Kamera, die an einer V2-Rakete befestigt war, welche von der White Sands Missile Range der US-Armee von New Mexico aus gestartet wurde. Nach dem Ende es zweiten Weltkriegs wurden V2-Raketen (für „Vergeltungswaffe 2“) von der US-Armee benutzt, um ihre eigenen Raketenpläne zu verbessern. Am 24. Oktober 1946 wurde eine V2 von der Missile Range gestartet, während eine darauf befestigte 35mm Filmkamera alle 1,5 Sekunden Bilder schoss. Sie erreichte eine Höhe von 65 Meilen (= 105 km), bevor sie auf die Erde zurückfiel; während die Kamera beim Aufschlag zerstört wurde, überstand diesen die Filmkassette. Das obige körnige Foto war auf der Filmrolle, und ist eine unserer ersten Bilder der Erde, die von einem Standpunkt über der Atmosphäre aus aufgenommen wurden.

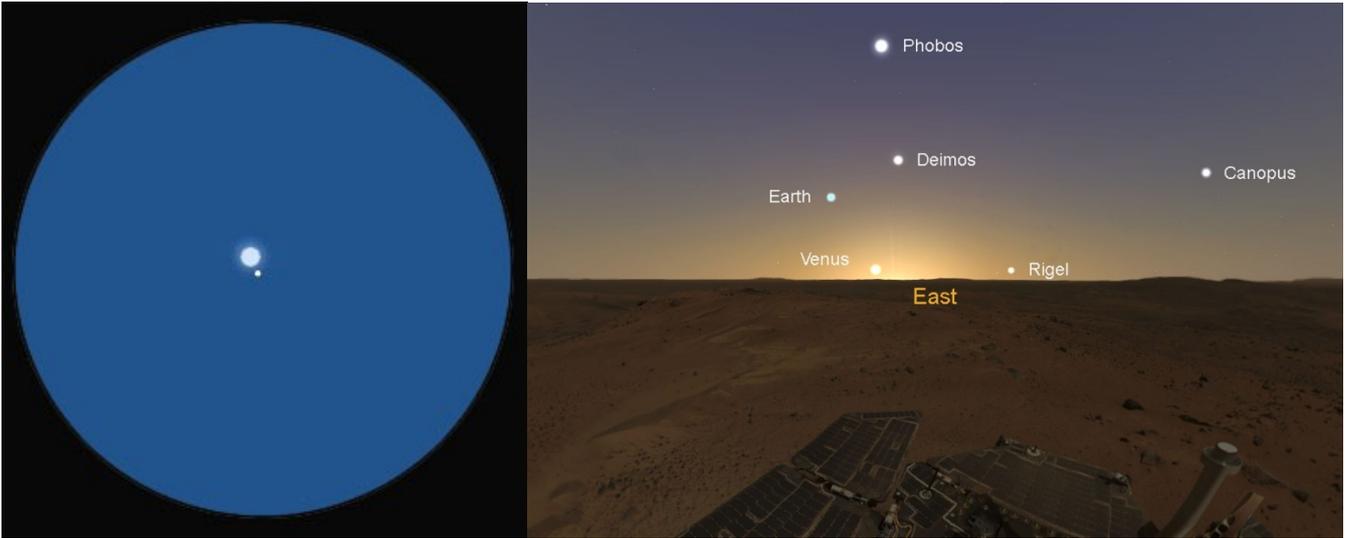
Applications Technology Satellite (ATS-III) am 10. Nov. 1967, aus 36.000 km (links ohne Farbkorrektur, rechts mit Farbkorrektur)



„Blue Marble“- Bild (von Apollo 17 am 7.12.1972 beim Verlassen des Orbits) „Pale Blue Dot“-Bild von Voyager 1 am 14.02.1990 aus 6 Mrd. km Entfernung



„Earthrise“: das Bild wurde von Apollo 8 am 24. Dezember 1968 während der vierten Umrundung des Mondes aufgenommen.



Erde und Mond vom Mars aus (durch einen Feldstecher)

### 1.3. Mond

**Mond** (lat. *Luna & Diana*, griech. *Selene & Artemis* (= Delia, *Cynthia*) & *Hekate & Proserpina* (Eigenname des Mondes im 17. Jh.), germ. *Mani*, äg. *Jah* und *Isis*, bab./akkad. *Sin*, sumerisch *Nanna & Ningal*, nordwestsem. *Jarich*, arab. *Hubal*, sanskr. *Chandra*, China: *Chang'e*), vgl. Montag & die Stadt Ur/Jericho, Alter: 4,47 Milliarden Jahre.



Symbole: ☾ abnehmender Mond vor Sonnenaufgang; ☽ zunehmender Mond nach Sonnenuntergang (Neulicht).

☾ Schwarzer Mond (Lilith, sumerische Dämonin), d.h. Apogäum oder leerer Brennpunkt der Mondumlaufbahn.

„Supermond“: Vollmond im Perigäum;

„Blauer Mond“ = zweiter Vollmond in einem Monat; in älterem Sprachgebrauch: 3. Vollmond in einer Jahreszeit mit 4 Vollmonden.

„Schwarzmond“ = zweiter Neumond in einem Monat oder dritter Neumond in einer Jahreszeit mit vier Neumonden.

„Blutmond“ = dunkelroter Mond bei Mondfinsternis

**Gr. Halbachse** 384.000 km (Perigäum 363.300, Apogäum 405.500, Exzentrizität 0,06); Inclination: 5,1°.

**Umlaufzeit** 27d: drakonisch 27,2, tropisch 27,3, siderisch 27,3, anomalistisch 27,6, synodisch 29,5,<sup>10</sup> scheinbar 24h 40m; Äquatorumlauftgeschwindigkeit 1km/s. **Rotation:** gebunden.

**Größe:** Ø 3467 km (27 % < 1/3 Erde), 37.932.330 km<sup>2</sup> (< Amerika mit 42,5 Mill.), 29,3-34,1'; H = 0,2 mag; mittlere Helligkeit des Vollmonds 12,74 mag; maximale Helligkeit des Vollmonds -12,92 mag; minimale Helligkeit nach Neumond -2,50 mag; Albedo 0,1.

**Masse:** 7•10<sup>22</sup> kg, Dichte 3341 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft: 1/6 Erdschwerkraft (17%), Fluchtgeschwindigkeit 2,4 km/s.

**Atmosphäre:** Drei-Hundertbillionstel des Drucks auf der Erde, Atmosphäre wiegt 10.000 kg, entspricht einen 20,3m-Würfel Erdluft. ca. 80.000 Atome pro Kubikmeter: 40.000 Argon, 40.000 Helium, 70 Natrium, 17 Kalium, < 17 Wasserstoff.

Nach einer anderen Quelle gibt es pro Kubikzentimeter: 40.000 mal Helium-4-Moleküle, 40.000 mal Neon-20, 35.000 mal Wasserstoff, 30.000 mal Argon-40, 5.000 mal Neon-22, 2.000 mal Argon-36, 2000 mal Methan, Ammoniak und Kohlendioxid, außerdem Sauerstoff in Spuren, außerdem Aluminium, Silizium, Phosphor, Natrium, Magnesium. Die Mondatmosphäre erzeugt vermutlich das „spukhafte Leuchten über dem Mondhorizont“, das Astronauten gelegentlich bei Sonnenaufgang beobachteten.

**Wasser:** Der Sonnenwind (ein von der Sonne kommender Strom geladener Teilchen) trifft ungehindert auf die Mondoberfläche (da der Mond im Gegensatz zur Erde kein globales Magnetfeld hat, wird der Sonnenwind nicht abgelenkt, wie es bei der Erde der Fall ist), und wirbelt dort Staub auf, den er teilweise ionisiert. Auf diese Weise entsteht ein Teil der Mondatmosphäre. Zugleich bildet der Sonnenwind Wassermoleküle (die man im Mondgestein nachgewiesen hat, die die Apollo-Astronauten vom Mond mitbrachten). Vermutlich gibt es außerdem an den Mondpolen größere Mengen gefrorenen Wassers.

**Temperatur:** Nachts -150 und Tagsüber 100 Grad, Durchschnitt -50°. Extremtemperatur -238° (kälter als Pluto, kältester von Raumschiffen gemessener Wert) in Südpol-Kratern auf die nie Licht fällt. Gleichgewichtstemperatur: 0°.

**Magnetfeld:** lokal, 300 Nanotesla (< 1 % Erdmagnetfeld); siehe auch Fußnote 6.

**Topologie:** Nullpunktshöhe, d.h. mittlerer Abstand der Oberfläche vom Mittelpunkt des Mondes: 1738 km; Nullmeridian: *Sinus Medii* = Mondmitte von der Erde aus gesehen. Als *dunkle Flecken* sieht man *22 Maria* („Meere“ = größere Dunkelflecken), *1 Oceanus* („Ozean“ = größter Dunkelfleck), *Palus und Lacus* („Sümpfe“ und „Seen“ = kleine Dunkelflecken) sowie *Sinus* („Buchten“). Die hellen Flecken dazwischen heißen *Terrae* („Erdmassen“).

Von NW nach SO:

	Mare Frigoris	Crisium Anguis – Humboldtianum
Oceanus Procellarum – Mare Imbrium – <sup>11</sup> Serenitatis – Tranquilitatis – Fecunditatis – Undarum – Margomus		
	Mare Insularum Mare Vaporum	Nectaris – Spumans – Smythii
	Mare Cognitum (N: Fra Mauro)	Sinus Medii
Mare Orientale	Mare Humorum Mare Nuium	Mare Australe
	Palus Epidemiarum im Süden; Palus Putretudinis im Norden	

**Rückseite:** N: Mare Moscoviensis; S: Mare Australe O: Mare Orientale; markant dunkel: Krater Tsiolkovskiy,

**Südpol-Aitken-Basin** = größtes Einschlagbecken beim Mare Ingenii;

**Krater:** *Krater Leibnitz*; *Krater Apollo*, *Krater Karman*, besonders schöne *Strahlenkrater*: Im Oceanus Procellarum: Aristarch (hell) - Kepler – Kopernikus. Im Süden: Tycho (größtes Strahlensystem), *Dunkle Krater*: Grimaldi im Osten; Plato im Norden.

**Rupes** (Furchen) und **Rimae** (Rillen und Rillengruppen): geheimnisvolle Linien.

**Gebirge:** Alpen am Südrand des Mare Frigoris; Kaukasus am Südrand des Mare Imbrium nördl. von Kopernikus;

Apenninen am Südostrand des Mare Imbrium, Grenze zum Mare Vaporum; Mons Huygens höchster Berg (5,5 Km).

Karpaten am Ostrand des Mare Imbrium = Westgrenze zum Mare Serenitatis

Haemus (antike Bez. für Balkengebirge) am Rand zwischen Mare Serenitatis und Mare Vaporum;

Taurus am Südostrand des Mare Serenitatis

Kordilleren am Südwestrand des Mondes

**Höchster Punkt:** Leibnitz-Beta fast am Südpol auf Südhalkugel am Südrand des Südpol-Aitken-Basins (10,8 km). Aber kein Berg, da die Landschaft selbst sehr hoch ist; höchster Berg ist der Mons Huygens, der sich rund 5,5 Kilometer über das Mare Imbrium erhebt.

**tiefster Punkt:** Krater Antoniadi Südhalkugel (9 km tief).

<sup>10</sup> Drakonischer Monat	Rückkehr zum selben Mondknoten	27d 5h 5m 35,9s	= 27,212 221 Tage
Tropischer Monat	Rückkehr zum Frühlingspunkt	27d 7h 43m 4,7s	= 27,321 582 Tage
Siderischer Monat	Rückkehr zum selben Stern	27d 7h 43m 11,6s	= 27,321 662 Tage
Anomalistischer Monat	Rückkehr zur selben Apside	27d 13h 18m 33,1s	= 27,554 550 Tage
Synodischer Monat	Rückkehr zur selben Mondphase	29d 12h 44m 2,9s	= 29,530 589 Tage

<sup>11</sup> Übergang M. Imbrium / M Serenitatis: Palus Putretudinis (Sumpf der Fäulnis).

**Einordnung der Größe:** Der Erdmond ist der mittlere der zehn größten Monde des Sonnensystems: Fügt man noch die Planeten und Zwergplaneten ein, die kleiner als manche Monde sind, lautet die Reihenfolge der Monde mit über 1500 km Durchmesser:

1. *Jupitermond Ganymed* (Ø 5262 km) – 2. *Saturnmond Titan* (Ø 5159 km) – *Planet Merkur* (Ø 4879 km) – 3. *Jupitermond Kallisto* (Ø 4821 km) – 4. *Jupitermond Io* (Ø 3643 km) – 5. *Erdmond Luna* (Ø 3476 km) – 6. *Jupitermond Europa* (Ø 3122 km) – 7. *Neptunmond Triton* (Ø 2707 km) – *Zwergplanet Pluto* (Ø 2377 km) – *Zwergplanet Eris* (Ø 2326 km) – 8. *Uranusmond Titania* (Ø 1578 km) – 9. *Saturnmond Rhea* (Ø 1529 km) – 10. *Uranusmond Oberon* (Ø 1523 km).

#### **markante Mondmissionen:**

Pioneer 1 (11. Oktober 1958, USA): Erreichte ein Drittel der Entfernung zum Mond, fiel dann zurück und verglühte in der Atmosphäre.

Lunik 1 (4. Januar 1959, UdSSR): Vorbeiflug am Mond in 6000 km Entfernung

Lunik 2 (13. September 1959, UdSSR): Harte Landung auf dem Mond

Lunik 3 (4. Oktober 1959, UdSSR): Vorbeiflug in 6200 km Entfernung, erste Weltraum-Aufnahmen vom Mond (insbes. Rückseite).

Luna 9 (3. Februar 1966, UdSSR): Erste weiche Landung auf dem Mond; mit Panorama-Aufnahmen; Batterien arbeiten bis 6. Februar.

Luna 10 (3. April 1966, UdSSR): Erste Raumsonde, die in den Mondorbit einschwenkt.

Apollo 8 (21.–27. Dezember 1968, USA): Erste bemannte Mondumrundung mit Rückkehr zur Erde.

Apollo 11 (20. Juli 1969, USA): Erste bemannte Mondlandung.

Luna 16 (12.–24. September 1970, UdSSR): Erste unbemannte Sample-Return-Mission (101 Gramm Mondgestein).

Luna 17 mit Lunochod 1 (10. November 1980-4. Oktober 1971): Erster unbemannter ferngesteuerter Mond-Rover.

Apollo 17 (11. Dezember 1972, USA): Letzte der Apollo-Mondlandungen (Apollo 11–12, 14–17; dabei 15–17 mit Rover).<sup>12</sup>

Luna 24 (9.–22. August 1976, UdSSR): Letzte der sowjetischen Reihe der Sample-Return-Missionen (170 Gramm Mondgestein).

Smart-1 (28. Sept. 2003 – 3. Sept. 2006, ESA): Erreichte am 15. November 2004 die Mondumlaufbahn mit einem Ionenantrieb.

Lunar Reconnaissance Orbiter LRO (18. Juni 2009, USA): Langzeit-Orbiter, arbeitet noch 2021, machte hochauflösende Bilder.<sup>13</sup>

Chang'e 3 (3. Januar 2019, China): erste Landung auf der Mondrückseite.

Beresheet (22. Februar 2019–11.04.2019, SpaceIL/Israel): Versuch einer privaten Raumsonde, weich zu landen, endet mit Aufschlag.<sup>14</sup>

Chang'e 5 (23. Nov. – 16. Dez. 2020, Mondlandung 1. Dez., China): unbemannte Sample-Return-Mission (1731 Gramm Mondgestein).

---

<sup>12</sup> Im Rahmen der Apollo-Missionen flogen 18 Personen zum Mond oder zum Mondorbit; 12 von ihnen landeten auf dem Mond. – Drei Mondumrundungsmissionen:

Apollo 08 (21.–27. Dezember 1968): Frank Borman (1928-), James Lovell (auch Mondumrundung Apollo 13, 1928-), William Anders (1933-)

Apollo 10 (18.–26. Mai 1969): Tom Stafford (1930-), John Young (auch Mondlandung Apollo 16, 1930-), Eugene Cernan (auch Mondlandung Apollo 17, 1934-)

Apollo 13 (11.–17. April 1970): James Lovell (2 Mondmissionen, Umrundung Apollo 8, 1928-), John Leonard „Jack“ Swigert (1931-1982), Fred Haise (1933-)

Sechs Mondlandungen: Apollo 11 (20./21. Juli 1969, Mare Tranquillitatis): Neil Armstrong (1930-2012) Buzz Aldrin (1930-); im Orbit: Michael Collins (1930-)

Apollo 12: (19.–21. November 1969, Oceanus Procellarum): Charles Conrad (1930-1999) Alan LaVern Bean (1932-); im Orbit: Richard Francis Gordon (1929-)

Apollo 14: (5./6. Februar 1971, Fra Mauro): Alan Shepard (erster US-Astronaut im All, 1923-1998), Edgar Mitchell (1930-); im Orbit: Stuart Roos (1933-1994)

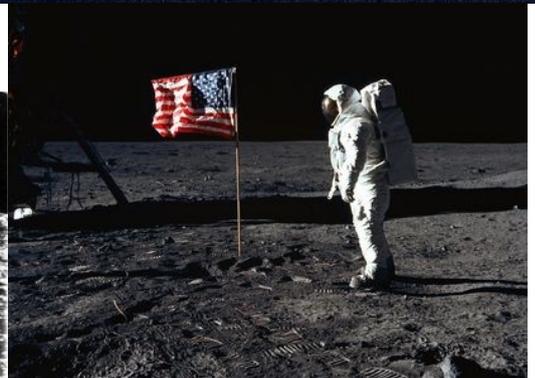
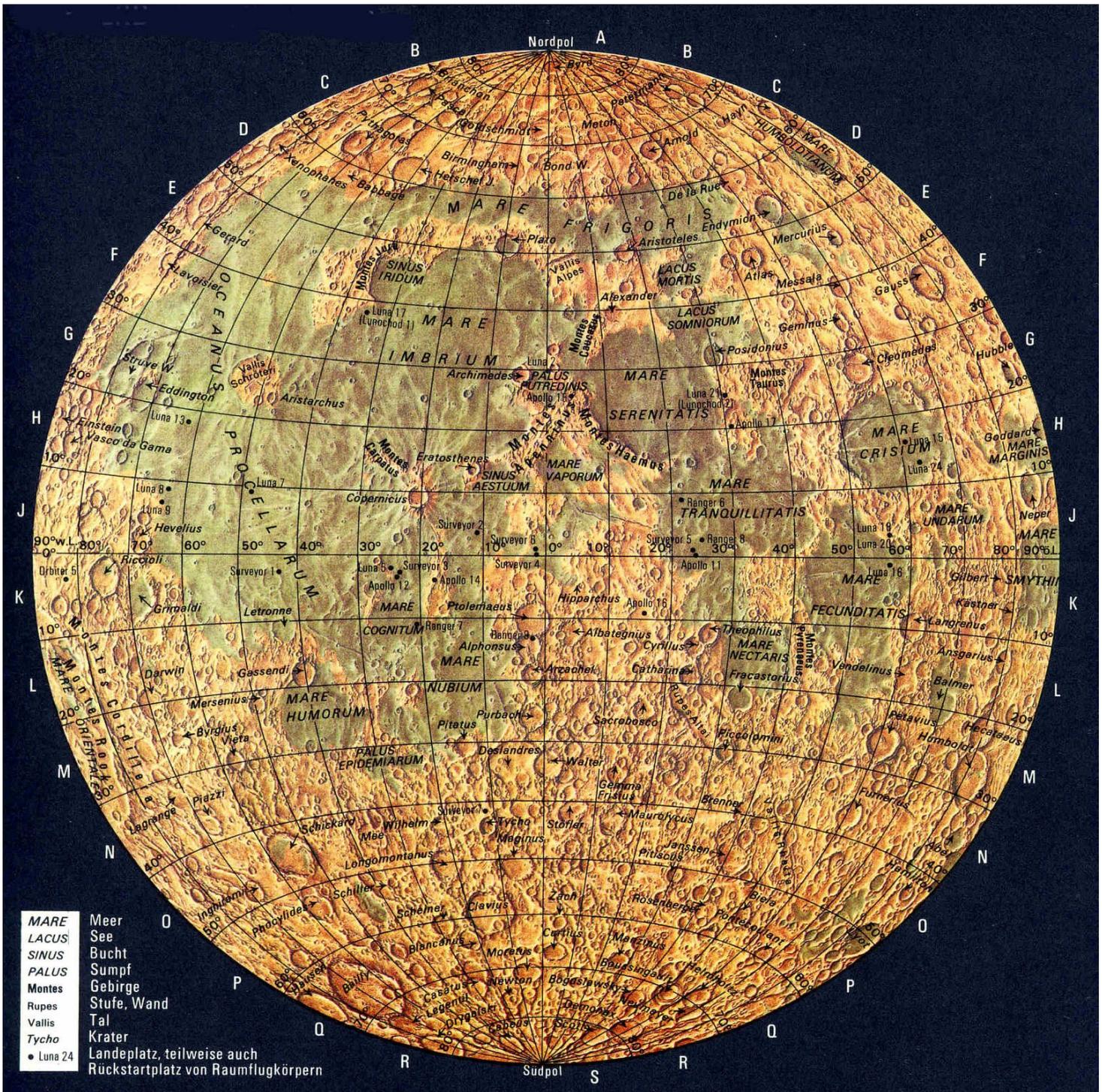
Apollo 15: (30. Juli – 2. Aug. 1971, Hadley Rinne/Apeninen-Fuß): David Randolph Scott (1932-), James Benson Irwin (1930-1991); im Orbit: Alfred Worden (1933-)

Apollo 16: (20.–24. April 1972, Descartes-Hochplateau): John Young (auch Mondumrundung Apollo 10, 1930-), Charles Duke (1935-), im Orbit: Ken Mattingly (1936-)

Apollo 17: (11.–14. Dezember 1972, Taurus): Eugene Cernan (auch Mondumrundung Apollo 10, 1934-), Harrison Schmitt (1935-); im Orbit: Ronald Evens (1933-1990), Die Apollo-Missionen brachten insgesamt 382 kg Mondgestein auf die Erde mit.

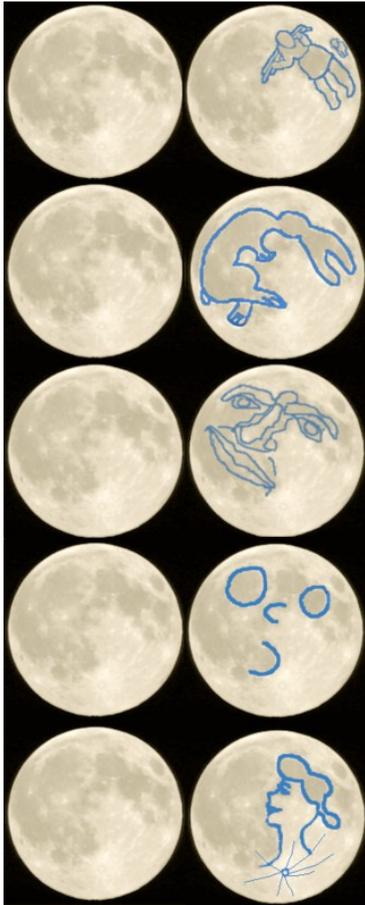
<sup>13</sup> Die Bilder zeigen auch die Apollo-Landestellen mit den Überbleibseln der Missionen, einschließlich Fußspuren der Astronauten. Der LRO-Orbiter brachte auch den *Lunar CRater Observation and Sensing Satellite* (LCROSS) mit, der am 9. Oktober 2009 im westlichen Teil des 95-km-Kraters Cabeus in der Mondsüdpol-Region aufschlug, um dort Wassereis nachzuweisen. Die Daten belegte eine sehr geringe Menge von Wasser.

<sup>14</sup> Das Projekt gilt als die erste rein privat initiierte und finanzierte Mondmission, wobei die Initialzündung durch den Wettbewerb Google Lunar X Prize gegeben wurde. Die Kosten beliefen sich auf 100 Millionen US-Dollar. An Bord war neben den wissenschaftlichen Gerätschaften auch eine Zeitkapsel. In ihr befinden oder befanden sich analoge und digitale Speichermedien, die für Israel besonders bedeutsame Dokumente und Werke, darunter eine hebräische Bibel beinhalteten, aber neben weiterem auch Text und XML der englischsprachigen Wikipedia. Außerdem waren menschliche DNS-Proben und einige tausend getrocknete Bärtierchen an Bord. Ein weiteres Missionsziel bestand darin, junge Menschen für die Weltraumforschung, Technologie und Ingenieurwissenschaften zu begeistern. Obwohl das letzte Missionsziel nicht erreicht wurde, erhielt SpaceIL von der X-Prize Foundation den mit einer Million US-Dollar dotierten „Moonshot Award“.



Lunik 3 (1959): Mondrückseite Luna 9 (1966): Bild von der Oberfläche von Apollo 11: (20. Juli 1969)

Die lunare Pareidolie (pareidolie = das Phänomen, in Dingen und Mustern Gesichter und vertraute Gegenstände zu erkennen):



*Mann mit Brennholz (begleitet von einem kleinen Hund)*

Laut Sage ein törichter Mann, der das Arbeitsverbot am Sabbat oder Sonntag missachtete. Er ging am Sabbat bzw. Sonntag zum Holzsammeln aus und wurde zum Strafe mit dem Holzbündel auf den Mond versetzt. (die jüdisch-christlich geprägte Sage sieht in dem Mann den nach Num 15,32–36 gesteinigten Sabbatsünder oder den umherwandernden Kain; eine germanische Abwandlung der Sage glaubt, der habe ein Stück Hecke vom Nachbarn gestohlen, um die eigene auszubessern; Römer sahen in ihm einen Dieb, der ein Schaf stahl).

Der „Hase im Mond“ (Tsuki no Usagi) ist ein in Japan (und allgemein in Ostasien) verwendetes Bild  
Auch: Kaninchen oder Krokodil

Mondgesicht. Nach talmudischer Tradition ist es das Gesicht des Patriarchen Jakob.

Mondgesicht

Frau im Mond

Mondtäuschung (eine optische Täuschung, durch die Mond und Sonne in Horizontnähe größer erscheinen als bei größerer Höhe).



Wie die Sonne auf einem Foto aussieht: links Originalfoto

Wie die Sonne wahrgenommen wird: rechts Fotomontage

Die **Mondtäuschung** ist eine optische Täuschung, durch die Mond und Sonne in Horizontnähe größer erscheinen als bei größerer Höhe. Dafür gibt es keine physikalische oder astronomische Ursache, es ist ein wahrnehmungspsychologisches Phänomen (da es auf Fotos nicht sichtbar ist), dessen Ursache umstritten ist. Vermutlich hängt diese Täuschung mit einer anderen zusammen: Dass man nämlich den Himmel als Firmament wahrnimmt, das nicht genau halbkugelförmig ist, sondern eine „abgeflachte Halbkugel“ darstellt, so dass der Horizont weiter vom Beobachter entfernt ist als das Zenit. In Wirklichkeit sind Sonne und Mond (wie Fotos zeigen) am Horizont gleich groß wie im Zenit; aber am Horizont bedeutet dies, dass sie dem Betrachter größer vorkommen, da sie aber an der Horizontlinie, bei der Sonne und Mond beim Auf- und Untergang befinden, weiter weg zu sein scheinen, macht ihre Größe hier mehr Eindruck, d.h. sie kommen uns größer vor.

## 1.4. Weitere Begleiter der Erde (Near Earth Objects)

Von den 10.713 zum Stand Februar 2014 (fast 12.000 Ende 2014) katalogisierten erdnahen Objekten sind 94 Kometen und 10.619 Asteroiden.<sup>15</sup> Damit sind weniger als ein Prozent aller Erdbahnkreuzer, die eine potentielle Kollisionsgefahr mit der Erde bergen, Kometen. Da bis Nov. 2014 insgesamt 5253 Kometen bekannt waren, sind knapp 2 Prozent aller bekannter Kometen Erdbahnkreuzer.

1. **Amor**-Asteroiden (Perihel zwischen 1,3 AU<sup>16</sup> und 1,017 AU (Aphel der Erde), keine Erdkreuzer
  - a) Amor I (Halbachse < Mars 1,52 AU); ganz innerhalb der Marsbahn (wie bei Lucianotesi), oder auch nicht (wie bei Eros).
  - b) Amor II (Mars 1,52 < Halbachse < Innenrand Hauptgürtel 2,12 AU); ein Beispiel ist Amor selbst, Phobos und Deimos könnten vom Mars eingefangene Asteroiden dieser Gruppe sein;
  - c) Amor III (Halbachse im Asteroid-Hauptgürtel 2,12–3,57 AU): kein Jupiterkreuzer (wie Alina, Ganymed) oder doch (Taranis)
  - d) Amor VI (Halbachse > 3,57, also Nähe Jupiterbahn): alle 14 bekannten sind Jupiterkreuzer (wie Don Quixote)
2. **Apollo**-Asteroiden (Halbachse > 1 AU, aber Perihel < 1,017 (Aphel der Erde), Bsp.: Apollo mit Mond)
3. **Aten**-Asteroiden (Halbachse < 1 AU, aber Aphel > 0,983 (Perihel der Erde); Bsp. Aten, Cruithne, Apophis).
4. **Atira**- oder **Apohele**-Asteroiden<sup>17</sup> oder Inner Earth Objects (Aphel kleiner als Perihel der Erde 0,983 AU); Stand 2015: 14 Objekte stehen im Verdacht, zu dieser Gruppe zu gehören (bei 3 ist dies sicher); weitere 28 haben ihr Perihel kleiner als das Aphel der Erde (1,017 AU), Bsp. Atira selbst.
  - **Arjuna**-Asteroiden: erdnähliche Bahnelemente (Umlauf ca. 1 Jahr, d.h. 1:1 Resonanz, Inklination & Exzentrizität klein). Meist zugleich Apollo-, Aten- oder Atira-Asteroiden<sup>18</sup>
  - **PHA's** (Potentially Hazardous Asteroids)<sup>19</sup>
  - **Erdtrojaner** (in L4 oder L5 des Erde-Sonne-Systems): bisher ist nur **2010 TK<sub>7</sub>** (Ø 300 m) in L4 bekannt.<sup>20</sup>

<sup>15</sup> Asteroiden, Planetoiden, Kleinplaneten wird synonym gebraucht; sie sind kleiner als Zwergplaneten aber größer als 10 m; kleinere Himmelskörper im Sonnensystem heißen Meteoroiden (im Fallen auf die Erde Meteore, als auf die Erde gefallene Meteorite), ihre Gesamtmasse ist kleiner als die des Erdmondes. Täglich kommen 1000 Tonnen Meteorstaub aus dem All zur Erde; ein Großteil dieser Masse verglüht in der Atmosphäre und gelang nicht auf den Boden. Im Januar 2015 waren 670.474 bekannt (über 422.636 hatten eine Nummer), über 200 sind größer als 100 km; man schätzt, dass 750.000 größer als 1 km sind. Von diesen sind ca. 10.713 (Stand Februar 2014) erdnah, also ca. 1,5%. Von diesen waren 867 größer als 1 km und von diesen 154 als potentiell gefährlich (PHA's) eingestuft. Raumsonden haben bisher 13 Asteroiden (davon 3 erdnah) besucht: Die Raumsonde Galileo flog auf ihrem Weg zum Planeten Jupiter im Jahre 1991 am Asteroiden (951)**Gaspra** und 1993 an (243)**Ida** vorbei. Die Sonde NEAR-Shoemaker passierte 1997 den Asteroiden (253)**Mathilde** und umkreiste und landete 2001 auf dem erdnahen Asteroiden (433)**Eros**. Die Sonde Deep Space 1 näherte sich 1999 dem Marsbahnkreuzer-Asteroiden (9969)**Braille** bis zu einem Abstand von lediglich 28 km. Die Sonde Cassini zog 2000 in 1,6 Millionen km Entfernung an (2685)**Masursky**, und die Sonde Stardust 2002 in 3.300 km Entfernung an (5535)**Annefrank** vorbei. Die japanische Sonde Hayabusa erreichte 2005 den erdnahen Asteroiden (25143)**Itokawa** und entnahm erstmalig Gesteinsproben von einem Asteroiden, die sie zur 2010 Erde brachte. Die Sonde New Horizons flog 2006 in 100.000 km Entfernung an (132524)**APL** (Applied Physics Lab) vorbei. Die europäische Sonde Rosetta passierte 2008 den Asteroiden (2867)**Steins** und 2010 den Asteroiden (21)**Lutetia**. Seit 2011/12 befand sich die 2007 gestartete Raumsonde Dawn ein Jahr lang im Orbit um (4)**Vesta**. Im März 2015 wird sie den Zwergplaneten (1)**Ceres** (kein Asteroid!) umkreisen. Die chinesische Sonde Chang'e 2 flog 2012 in 3,2 km Abstand an dem erdnahen Asteroiden (4179)**Toutatis** vorbei.

<sup>16</sup> 0,3 AU ist aufgerundet die kleinste Distanz der Erde zu dem ihm am nächsten liegenden Nachbarplaneten (d.h. zur Venus); denn für einen „Near Earth“-Asteroiden verlangt man, dass er der Erde näher kommt als andere Planeten.

<sup>17</sup> Apohele = hawaiisch „Orbit“ (klingt ähnlich wie Aphel).

<sup>18</sup> Das erste derartige Objekt **1991 VG** (5-12m mit ungewöhnlichen Helligkeitsschwankungen) wurde am 6. November 1991 von James Scotti entdeckt; es wurde vermutet, dass es ein von Menschen gebautes oder extraterrestrisches künstliches Objekt (Bracewall probe) handelt. Weitere Kandidaten sind **2003 YN107** (20m), **2006 JY26** (6-13m), **2013 BS45** („sechster Erdmond“, siehe unten, Zusatz zu Cruithne).

<sup>19</sup> <http://neo.jpl.nasa.gov/neo/groups.html>:

PHO's are currently defined based on parameters that measure the asteroid's potential to make threatening close approaches to the Earth. Specifically, all asteroids with an Earth Minimum Orbit Intersection Distance (MOID) of 0.05 AU or less and an absolute magnitude (H) of 22.0 or less are considered PHAs. In other words, asteroids that *can't* get any closer to the Earth (*i.e.* MOID) than 0.05 AU (roughly 7,480,000 km or 4,650,000 mi) or are smaller than about 150 m (500 ft) in diameter (*i.e.* H = 22.0 with assumed albedo of 13%) are *not* considered PHAs. There are currently (17.01.2015) 1533 PHA's known (listed in <http://neo.jpl.nasa.gov/orbits/>).

<sup>20</sup> 2010 TK<sub>7</sub> ist an den Lagrange-Punkt L<sub>4</sub> der Erde gebunden und läuft ihr damit auf ihrer Bahn voraus. Er ist nur verhältnismäßig schwach an L<sub>4</sub> gebunden und kann sich daher im Zuge seiner Libration weit davon entfernen. Er läuft mit einer Periode von 390 Jahren bis fast zum Librationspunkt L<sub>3</sub> in 300 Millionen km Erdentfernung und anschließend wieder zurück bis kurz vor die Erde, ohne ihr jedoch näher als 20 Millionen km [3] kommen zu können. Dies entspricht mehr als dem 50fachen der mittleren Entfernung des Mondes (384.400 km). Gegenwärtig hat die große Halbachse der Asteroidenbahn eine Länge von 1,0004 AU, der Asteroid also eine etwas geringere Geschwindigkeit als die Erde, und er driftet auf seiner Librationsbahn langsam auf die Erde zu. Die Wechselwirkung mit der Erde verringert jedoch gegenwärtig seine

- **Kordylewskische Wolken** (Staubwolken in L4 und L5 des Mond-Erde-Systems)

### Amor-Asteroiden:

(15817)**Lucianotesi** (benannt nach dem italienischen Asteroidenjäger Ludiano Tesi, \* 1931, der ca. 200 Asteroiden entdeckt hat), erstes in Italien entdecktes NEO, entdeckt 28. August 1994 von A. Boattini & M. Tombelli; Asteroid vom Typ *Amor I*, der die Marsbahn nicht kreuzt, sondern sich ganz zwischen Mars- und Erdbahn bewegt; Gr. Halbachse 1,325 AU (Perihel 1,168; Aphel 1,481, Exzentrizität 0,118), MOID 0,25 AU, Inklination 13,9°; Umlaufzeit 1,5 Jahre (556,9 d), Rotation 11 h; Größe 0,7 km, 1,5 km<sup>2</sup>, H = 18,6.

(433)**Eros** (griech. Liebesgott), erstentdeckter zweitgrößter erdnaheer Asteroid (Carl Gustav Witt, 13. August 1898), wurde 1900/1901 und 1930/1941 zur Vermessung der Sonnenparallaxe benutzt; Sonde NEAR Shoemaker absolvierte erstmalig an ihm einen Flyby, schwenkte dann erstmalig in seinen Orbit (und in den Orbit eines Asteroiden) ein und landete erstmalig auf ihm (und auf einem Asteroiden) im Jahre 2001; Marsbahnkreuzer vom Typ *Amor I*; möglicher Ursprünge der L-Chondriten (siehe Fußnote 46). Gr. Halbachse 1,458 AU (Perihel 1,133, Aphel 1,783, Exzentrizität 0,2), MOID 0,15 AU, Inklination 10,8°, Geschwindigkeit 24,4 km/s, Umlaufzeit siderisch 1a 278d, synodisch 846d (2,3 Jahre!) im Sonnensystem maximal; Rotation 5h 15min, Größe 34×11×11 (Ø 16,84) km, schuhähnlich, 1106 km<sup>2</sup> (wie Hongkong), max. 6,8 mag, H = 11,16, Albedo 0,25, Größe: Masse 7•10<sup>15</sup> kg, Dichte 2670 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 6 mm/s<sup>2</sup>, Fluchtgeschwindigkeit 10,3 m/s (38 km/h), Temperatur -150 – 100° (-46°); Spektraltyp S, Topologie: Krater Himaros und Psyche auf entgegengesetzter Seite und ; Eros hat Gold, Aluminium, Platin und seltene Erden



(1221)**Amor** (röm. Liebesgott), entdeckt von Eugène Joseph Delporte am 12. März 1932; Marsbahnkreuzer, Namensgeber des Typs „Amor“ vom Typ *Amor II*; Gr. Halbachse 1,920 AU (Perihel 1,086, Aphel 2,754 Exzentrizität 0,4), MOID 0,108 AU; Inklination 11,9°; Umlaufzeit 2,66 Jahre (971,635 Tage), Größe 1,5 km, , Albedo 0,15; H = 17,7; Masse 3,5 •10<sup>12</sup> kg, Dichte 2000 kg/m<sup>3</sup>, Gravitation 0,42 mm/s<sup>2</sup>, Fluchtgeschwindigkeit 79cm/s; Temperatur -75°.

(887)**Alinda** (Mythologie der Aborigines: Mann im Mond, oder Stadt in Kleinasien/Karien); entdect von Max Wolf in Heidelberg am 3. November 1918; Marskreuzer, aber kein Jupiterkreuzer vom Typ *Amor III*, zugleich Namensgeber des *Alinda*-Typs (3:1 Bahnresonanz zum Jupiter, daher 1:4 zur Erde und Bahnhalbachse ca. 2,5 AU);<sup>21</sup> Gr. Halbachse 2,4842 AU (Perihel 1,0815, Aphel 3,8870, Exzentrizität 0,5647), MOID 0,1037 AU, Inklination 9,3°; Umlaufzeit 3,92 Jahre mit 18,89 km/s, Rotation 73 h 58 s; Größe 4,2 km, 55,4 km<sup>2</sup> (54 Bermuda; St. Martin); max 9,89 mag, H = 13,76, Albedo 0,31; Spektraltyp S.

(1036)**Ganymed** (Mundschenk des Zeus), entdeckt von Walter Baade am 23. Oktober 1924; größter erdnaheer Asteroid; Marskreuzer, aber kein Jupiterkreuzer vom Typ *Amor III*; Gr. Halbachse 2,662 AU (Perihel 1,233, Aphel 4,091, Exzentrizität 0,537), Inklination 26,6°, Umlaufzeit 4,3 Jahre (1586d) mit 16,86 km/s, Rotation 10,3 h; Größe 34 km, 3632 km<sup>2</sup> (wie South Georgia), H = 9,45, Albedo 0,17; Temperatur -113°, Spektraltyp S.

(5370)**Taranis** (keltischer Donnergott Taranis = Jupiter/Pluto), entdeckt von Aain Maury am 2. September 1986; Mars- und Jupiterkreuzer vom Typ *Amor III* mit 2:1 Bahnresonanz mit Jupiter (Hecuba-Lücke);<sup>22</sup> Gr. Halbachse 3,3328 AU (Perihel 1,2191, Aphel 5,4465, Exzentrizität 0,6342), MOID 0,22637 AU, Inklination 19,1°; Umlaufzeit 6,08 Jahre (3186,6d) mit 16,29 km/s; Größe 16,3 km, 834 km<sup>2</sup> (vgl. Kiribati 811), H = 15,7

(3552)**Don Quixote** (Comic-Ritter nach Cervantes Romanfigur, 1605), entdeckt von Paul Wild am 26. September 1983; Mars- und Jupiterkreuzer vom Typ *Amor IV*; Gr. Halbachse 4,232 AU (Perihel 1,216, Aphel 7,247, Exzentrizität 0,713), MOID 0,30317 AU, Inklination 30,8°; Umlaufzeit 8,7 Jahre (3179,5d) mit 12,14 km/s, Rotation 7,7h (0,3208d); Größe 18,4 km, 1064 km<sup>2</sup> (wie Hong Kong 1054), 11,76–22,32 mag; H = 13,0, Albedo 0,03; Temperatur -135°, Spektralklasse D (verdacht, dass ein ausgelöschter Komet vorliegt), nach Infrarotbeobachtungen mit dem Spitzer Teleskop fand man eine blasse Koma und einen Schweif um das Objekt (CO<sub>2</sub>-Emission); unklar ist, ob es sich um permanente Aktivität oder um die Folge eines Impakts mit einem kleineren Körper handelt.

große Halbachse, so dass sich gemäß dem Dritten Kepler-Gesetz seine Geschwindigkeit erhöht und er sich wieder von der Erde entfernen wird. Etwa im Jahr 2200 wird 2010 TK<sub>7</sub> fast L<sub>3</sub> erreichen und sich dann wieder der Erde annähern. Wegen der merklichen Exzentrizität von 0,191 schwankt sein Sonnenabstand während eines Jahres zwischen 0,8 und 1,2 AU, so dass er sich mit einer Periode von einem Jahr um bis zu ± 0,2 AU seitlich von der Erdbahn entfernt. Wegen der erheblichen Bahnneigung von knapp 21° entfernt er sich mit einer Periode von einem Jahr außerdem bis ± 0,4 AU in senkrechter Richtung aus der Erdbahnebene. Diese beiden Auslenkungen laufen mit der gleichen jährlichen Periode gleichzeitig ab, so dass der Asteroid zusätzlich zu seiner Librationsbahn jährliche ungefähr senkrecht stehende Schleifen um die Erdbahn zieht. Diese zusätzlichen Schleifen, die sich der Librationsbewegung des Trojaners überlagern, werden auch Epizykel genannt. 010 TK<sub>7</sub> wird über mindestens 10.000 Jahre stabil an die Erdbahn gebunden sein. Eine präzise Vorhersage seiner Bahnbewegung ist wegen sensitiver Abhängigkeiten von kleinen Störungen jedoch nur über die nächsten 250 Jahre möglich. Über den Zeitraum von vor 1800 Jahren bis in 5000 Jahren lassen sich durch rechnerisches Verfolgen leicht variiert Bahnen allerdings statistische Aussagen über das mögliche Verhalten des Asteroiden ableiten. Demnach sind der Übergang auf eine Hufeisenbahn, ein „Umspringen“ zum Lagrange-Punkt L<sub>5</sub> (da der Asteroid in der Nähe von L<sub>3</sub> im Zuge eines seiner ausgeprägten Epizykel auch über L<sub>3</sub> hinauschießen kann) oder eine kurzzeitige instabile Libration um den Punkt L<sub>3</sub> nicht völlig auszuschließen. Die Rechnungen zeigen, dass 2010 TK<sub>7</sub> bereits früher um L<sub>5</sub> gelaufen war, aber etwa um das Jahr 500 herum auf L<sub>4</sub> übersprungen ist.

<sup>21</sup> Die meisten Resonanzen zum Jupiter sind instabil: 4:1 (2,07 AU), 3:1 (2,50 AU), 5:2 (2,82 AU, innere Begrenzung der Koronis-Gruppe), 7:3 (2,96 AU), 2:1 (3,28 AU) und so entstehen im Asteroidengürtel die sog. Kirkwood-Lücken (Daniel Kirkwood, 1866), die Kirkwood-Lücke der 3:1-Resonanz heißt Hestia-Lücke, diejenigen der 2:1-Resonanz Hecuba-Lücke. Stabilisierende Resonanzen sind 1:1 (5,20 AU: Trojaner), 4:3 (4,29 AU: Thule), 3:2 (3,97 AU: Hilda) und 7:4 (3,58 AU: Kybele). Wegen der Instabilität werden die Exzentrizitäten der Alinda-Asteroiden beständig erhöht, bis die Resonanz bei einer Annäherung an einen der inneren Planeten aufgelöst wird. Einige Alinda-Asteroiden haben ihr Perihel nahe oder innerhalb der Erdbahn und nähern sich dann wegen der 1:4-Resonanz alle vier Jahre der Erde. Wichtigstes Beispiel ist (4179) Toutatis.

<sup>22</sup> Siehe Fußnote 21.

## Apollo-Asteroiden:

(54509)**YORP** (Yorp-Effekt), „**Vierter Erdmond**“ (siehe unten zum Aten-Asteroid Cruithne), entdeckt am 3. August 2000 von LINEAR; durch Messungen der Rotationsrate dieses Asteroiden konnte zum ersten Mal der YORP-Effekt beobachtet und bewiesen werden. Durch ihn steigt die Rotationsperiode des Asteroiden um  $2,0 \times 10^{-4}$  deg/day<sup>-2</sup>. Simulationen des Asteroiden legen nahe, dass er sich in den nächsten 35 Millionen Jahren in einer stabilen Umlaufbahn um die Sonne befinden wird. Bis dahin wird er eine Rotationsperiode von etwa 20 Sekunden erreicht haben. Die Kräfte, die bei dieser außerordentlich hohen Rotationsgeschwindigkeit auftreten, können dann dazu führen, dass sich die Form des Asteroiden ändert oder dass er dadurch zerbricht.

Gr. Halbachse 1,005 AU (Perihel 0,774, Aphel 1,237, Exzentrizität 0,230), Inklination 1,601°; Umlaufzeit 1,01a (368,218d) mit 29,31 km/s, Rotation 12,174 min, Achsenneigung -173° Größe 150×128×93 m, H = 22,7, Albedo 0,1; Temperatur 5°.

(1862)**Apollo** (Lichtgott); entdeckt von Karl Wilhelm Reinmuth am 24. April 1932, verloren und wiederentdeckt 1973, 2007 wurde an ihm der YORP-Effekt bestätigt;<sup>23</sup> Mars-, Venus- und Erdbahnkreuzer und vom Typ *Apollo*, dessen Namengeber er ist; PHA, erster entdeckter Erdbahnkreuzer; Gr. Halbachse 1,471 AU (Perihel 0,648, Aphel 2,295, Exzentrizität 0,560), MOID is 0.0258 AU (3,86 Mill km); Inklination 6,4°; Umlaufzeit 1,78 Jahre (651,5d) mit 22,5 km/s, Rotation 3,1h (0,13d); Größe 1,5 km, 7 km<sup>2</sup> (6,5 Gibraltar); Masse  $5 \cdot 10^{12}$  kg, Dichte 2000 kg/m<sup>3</sup>, Gravitation 0,5 mm/s<sup>2</sup>, Fluchtgeschwindigkeit 83 cm/s (3 km/h), H = 16,25, Albedo 0.25; Temperatur -51°, Spektraltyp Q.

Anhand von Radarbeobachtungen mit dem Arecibo-Observatorium konnte im Jahr 2005 nachgewiesen werden, dass Apollo von einem kleinen Mond (bezeichnet als S/2005 (1862) 1) begleitet wird (über 230 Monde um Kleinplaneten waren im Juni 2013 bekannt). Der Begleiter hat einen Durchmesser von etwa 75 Meter und läuft im Abstand von rund 3 km um den Asteroiden.

(1566)**Icarus** (griech. Sage: stürzt, da er mit künstlichen Flügeln der Sonne zu nahe kommt, so dass diese schmelzen, ins Meer); entdeckt von Walter Baade am 27. Juni 1949; PHA und Mars-, Erd-, Venus- und Merkurbahnkreuzer vom Typ *Apollo*; bis 1983 unter den bekannten Himmelskörpern derjenige, welcher der Sonne periodisch am nächsten kommt, d.h. mit kleinstem Perihel.<sup>24</sup> Gr. Halbachse 1,0779 AU (Perihel 0,1866, Aphel 1,9692, Exzentrizität 0,8269), Inklination 22,9°; Umlaufzeit 408,8d mit 28,69 km/s, Rotation 2,273h; Größe 1 km, 3 km<sup>2</sup>, H = 17, Albedo 0,4 (relativ hell).

(3200)**Phaeton**(griechisch: *der Strahlende*, Name für den Sonnengott Helios und dessen Sohn): so wurde zunächst ein aufgrund der Titius-Bode-Reihe der Planetenabstände (1766)<sup>25</sup> vermuteter Planet zwischen Mars und Jupiter genannt, dann ging der Name über auf den am 11. Oktober 1983 von Simon Green und John K. Davies auf Bildern des Infrarot-Teleskopsatelliten IRAS entdeckten Kleinplaneten über. Dieser erste mit Hilfe eines Satteliten entdeckte Kleinplanet ist ein PHA, Mars-, Erd-, Venus- und Merkurbahnkreuzer vom Typ *Apollo*, außerdem ein Mitglied der *Pallas*-Gruppe<sup>26</sup> und Quelle des alljährlich Mitte Dezember niedergehenden *Geminiden*-Meteorschauers. Gr. Halbachse 1,271 AU (Perihel 0,140 < 50% Merkurperihel = kleinstes Perihel der mit einem Namen versehenen Asteroiden, Aphel 2,403, Exzentrizität 0,89), Inklination 22,2°; Umlaufzeit 1.43 a (523.586 d) mit Durchschnittsgeschwindigkeit 19,98 km/s, Perihelgeschwindigkeit 200 m/s, Rotation 3h 36 min; Größe 5,1 km, 81,7 km<sup>2</sup> (78 Guernsey), H = 14,6, Albedo 0,1; Durchschnittstemperatur -26°, Temperatur im Perihel 752° (über dem Schmelzpunkt von Blei 327,5° und Zink 419,5° und nahe dem von Aluminium 660,3°); Spektraltyp C (genauer: B). Es ist ein erloschener Felsenkomet (Bilder von den STEREO-Sonden der NASA lassen auf Materieemissionen schließen). Er näherte sich der Erde am 10. Dezember 2007 auf 0.12 AU (18 Mill km), am 10. Dezember 2017 kommt auf 0.0689 AU (10,3 Mill. km) nahe, am 14. Dezember 2093 auf 0.0198 AU (2,960,000 km). Beim Perihelion im Juli 2009 war er heller als erwartet; im Juni 2009 entdeckte das STEREO-A Raumschiff eine unerwartete Aufhellung um den Faktor 2.

<sup>23</sup> The Yarkovsky effect (Ivan O. Yarkovsky, 1900) is a force acting on a rotating body in space caused by the anisotropic emission of thermal photons, which carry momentum. It is usually considered in relation to meteoroids or small asteroids (about 10 cm to 10 km in diameter), as its influence is most significant for these bodies. The effect was first measured in 1991–2003 on the asteroid 6489 Golevka (Apollo-Typ,  $0,35 \times 0,25 \times 0,25$  km). The asteroid drifted 15 km from its predicted position over twelve years (the orbit was established with great precision by a series of radar observations in 1991, 1995 and 1999) from the Arecibo radio telescope. The Yarkovsky–O’Keefe–Radzievskii–Paddack effect, or YORP effect for short, is a second-order variation on the Yarkovsky effect that changes the rotation rate of a small body. In 2007 there was direct observational confirmation of the YORP effect on the small asteroids 54509 YORP (then designated 2000 PH5)[3][4] and 1862 Apollo.[5] The spin rate of 54509 YORP will double in just 600,000 years, and the YORP effect can also alter the axial tilt and precession rate, so that the entire suite of YORP phenomena can send asteroids into interesting resonant spin states, and helps explain the existence of binary asteroids.

<sup>24</sup> 1983 wurde der Rekord durch den *Apollo*-Asteroiden **Phaeton** durchbrochen (Perihel 0,14 AU), 1995 wurde übernahm den Rekord der *Aten*-Asteroid **1995 CR** (Perihel 0,119 AU), dann aber dieser neue Rekord wieder durch den von LINEAR am 26. Januar 2000 entdeckten 0,91 km großen Asteroiden (**137924**) **2000 BD**, mit Perihel 0,092 AU; dieser Marsgrazer, Erd-, Venus- und Merkurbahnkreuzer vom Typ *Aten* (gr. Halbachse 0,88 AU) ist extrem exzentrisch (0,89) und hat von allen *Atens* das drittgrößte Aphel (1,66 AU). Im Perihel ist seine Temperatur bei 647°. Es ist noch mehr als Merkur geeignet zum Test für Einsteins Relativitätstheorie (über die Periheldrehung). – Noch extremer ist (394130) **2006 HY51**, entdeckt von LINEAR am 26. April 2006, ein Jupitergrazer, Mars-, Erd-, Venus- und Merkurkreuzer vom Typ *Apollo* mit dem kleinsten Perihelion von allen nummerierten Asteroiden: Gr. Halbachse 2,5995 AU (Perihel 0,091, Aphel 5,1180, Exzentrizität 0,9688), Inklination 30,5°, Umlaufzeit 4,19 Jahre (1530,8575d); Größe 1,219 km, H= 17,2. Er wird wiederum übertroffen durch die *Apollo*-Asteroiden **2008 FF**, mi Perihel 0,079. Von allen bislang bekannten Asteroiden hat das kleinste Perihelium der am 30. April 2005 von LONEOS entdeckte Mars-, Erd-, Venus- und Merkurbahnkreuzer **2005 HC**, vom Typ *Apollo*: Gr. Halbachse 1,82 AU (Perihel 0,071 =23% des Merkurperihelions, Aphel 3,562, Exzentrizität 0,96), MOID 0,06 AU, Inklination 8,4°; Umlaufzeit 894,552d; Größe 210–480 m, H = 20,7 Dieser Asteroid ist aber nur 11 Tage im Jahre 2005 beobachtet worden.

<sup>25</sup> Der weniger bekannte Astronom itius ging 1766 von der Zahlenfolge 0,3,6,12,24,... aus, in der die nach 3 folgenden Zahlen sukzessiv verdoppelt werden, und zählte jeweils 4 dazu: 4,7,10,16,28, .... Setzte er nun 10 als Abstand Sonne-Erde, erhielt er die großen Halbachsen der Planeten im richtigen Maßstab, wobei zwischen Mars und Jupiter ein Planet fehlte. Dies griff der bekannte Astronom Bode 1772 auf; renormiert lautet die Formel nach Johann Friedrich Wurm: Entfernung in AU =  $0,4 + 0,3 \cdot 2^n$  für  $n = -\infty$  (Merkur), 0 (Venus), 1 (Erde), 2 (Mars) usw. Es ergibt sich: Merkur 0,4 AU (real 0,39), Venus 0,7 AU (real 0,72), Erde 1 AU, Mars (n=2) 1,6 AU (real 1,52), Ceres (n=3) 2,8 AU (real 2,77), Jupiter (n = 4) 5,2 AU (real 5,21), Saturn (n=5) 10 AU (real 9,54), Uranus (n=6) 19,6 AU (real 19,19), Neptun passt nicht, Pluto (n = 7) 38,8 AU (real 39,41), Eris (n = 8) 77,2 AU (real 67,7).

<sup>26</sup> Die **Pallas-Familie** sind B-Type (dunkle C-Typ-Asteroiden) mit sehr hohen Inklinationen im mittleren Asteroiden-Hauptgürtel (Cellino et al., 2002; zuerst bemerkt von Kiyotsugu Hirayama 1928), benannte nach dem größten Asteroiden (2) Pallas (ca. 550 km).

(4179)**Toutatis** (kelt. Teutates = Mars, Merkur, Stammesgott); entdeckt von Christian Pollas am 4. Januar 1989; PHA, Mars- und Erdbahnkreuzer vom Typ *Apollo*, zugleich vom Typ *Alinda* (3:1-Bahnresonanz zum Jupiter);<sup>27</sup> gr. Halbachse 2,5225 AU (Perihel 0,9212, Aphel 4,1238, Exzentrizität 0,6348), Inklination 0,4°; Umlaufzeit 4,006 Jahre (1463d) mit 16,69 km/s, Rotation 5,41d und 7,35d um zwei Längsachsen; Bahn wird stark vom Gravitationsfeld der Erde beeinflusst; Größe  $4,5 \times 2,4 \times 1,9$  km, 8,8–22,4 mag, H = 15,3 mag, Albedo 0,13; Masse  $5 \cdot 10^{13}$  kg, Dichte 2100 kg/m<sup>3</sup>, Gravitation 1mm/s<sup>2</sup>, Fluchtgeschwindigkeit 1,9 m/s = 6,84 km/h; Temperatur -99°, Spektralklasse S.

Am 29. September 2004 zog Toutatis in ca. 4fachem Mondabstand (1.549.719 km) an der Erde vorbei, am 9. November 2008 in 7.524.773 km, am 12. Dezember 2012 in 6.940.000 km. Am 13. Dezember 2012 flog die chinesische Raumsonde Chang'e-2 in 3,2 km Abstand an Toutatis vorbei und nahm aus einer Entfernung von 93 bis 240 km eine Bilderserie auf; im November 2069 wird Toutatis in einem Abstand von nur drei Millionen Kilometern die Erde passieren. In einem Auftragswerk der Berliner Philharmoniker mit Sir Simon Rattle vertonte die finnische Komponistin Kaija Saariaho 2005 den Asteroiden unter dem Werkstitel *Asteroid 4179: Toutatis*.

(14827) **Hypnos** (Traumgott), entdeckt am 5. Mai 1986 vom Ehepaar Carolyn & Eugene Shoemaker, PHA der *Apollo*-Klasse; kam 1958 sowohl der Erde als auch dem Mars näher als 0,03 AU (seit 862 und bis 2214 wird Hypnos weder dem Mars noch der Erde wieder so nahe kommen). 2,846 AU (Perihel 0,9536, Aphel 4,738, Exzentrizität 0,66), Inklination 1,98°, Umlaufzeit 4,8 Jahre, Durchmesser 0,9–1,2 km, 3 km<sup>2</sup> (2,02 km<sup>2</sup> Monaco), 18,3 H, Albedo 0,07. Hypnos scheint Kern eines erloschenen Kometen zu sein, der von einer zentimeterdicken Kruste bedeckt ist, die weiteres Ausgasen verhindert.

(25143)**Itokawa** (nach Hideo Itokawa, 1912–1999, Pionier des japanischen Raketen- und Weltraumprogramms); entdeckt von LINEAR am 26. September 1998; Mars- und Erdbahnkreuzer vom Typ *Apollo*; erster Asteroid, der Ziel einer Sample Return Mission war: Die japanische JAXA-Sonde Hayabusa („Pilgerfalte“) startete 2003, erreichte 2005 den Asteroiden und begleitete ihn eine Zeitlang (dessen Anziehungskraft war für den Eintritt in einen Orbit zu schwach); der Mini-Lander MINERVA (10 cm hoch, 12 cm Durchmesser, 591 Gramm, Micro/Nano Experimental Robot Vehicle for Asteroid) und setzte am 20. November 2005 auf ihm, startete 2007 wieder mit dem Ionenantriebwerk und warf 2010 eine Kapsel mit den etwa 1500 meist sehr kleinen Partikeln des Asteroiden über Australien ab. Gr. Halbachse 1,324 AU (Perihel 0,897, Aphel 1,356, Exzentrizität 0,204), Inklination 6°; Umlaufzeit 1 Jahr 71 Tage (436,65 d) mit xxx km/s, Rotation 4d 7h 8min; Ø 492 m, H = 20,2, Albedo 0,53; Masse  $5 \cdot 10^{10}$  kg, mittlere Dichte 1950 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,1mm/s<sup>2</sup>, Fluchtgeschwindigkeit 20 cm/s; Temperatur -67°, Spektraltyp S. Itokawa besteht aus zwei Teilen mit unterschiedlichen Dichten (2850 kg/m<sup>3</sup> = kleinerer Teil bzw. 1750 kg/m<sup>3</sup> = größerer Teil), entstand also durch Zusammenstoß zweier Asteroiden (bislang einmalig). Oberfläche ist silikathaltig wie bei gewöhnlichen Chondriten.

(101955) **Bennu** (englischer Name für den altägyptischen Totengott Benu, hatte zunächst die Bezeichnung 1999 RQ<sub>36</sub>, nachdem bei einem Wettbewerb der NASA Namensvorschläge von über 8000 Schülern eingegangen waren, wurde am 1. Mai 2013 der offizielle Eigenname *Bennu* bekanntgegeben); entdeckt von LINEAR am 11. September 1999 im Rahmen des LINEAR-Projekts; Kollision mit der Erde möglich, aber unter 0,07 % Wahrscheinlichkeit; wurde im Rahmen der Mission OSIRIS-Rex angefliegen (diese startete am 8. September 2016 und entnahm am 20. Oktober 2020 Bodenproben; die Rückkehr mit gesammelten Bodenproben zur Erde ist für 2023 vorgesehen);

Gr. Halbachse 1,126 AU (Perihel 0,897, Aphel 1,356, Exzentrizität 0,20375), Inklination 6°; Umlaufzeit 1 Jahr 71 Tage (436,65) mit 28 km/s, Rotation 4h 18 min (4,297 h); Ø 524m, H = 20,9, Albedo 0,05; Masse  $6 \cdot 10^{10}$  kg, mittlere Dichte 1260 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft = 0,05 mm/s<sup>2</sup>, Fluchtgeschwindigkeit 15–19,4 cm/s; Temperatur -37 bis 6° (Durchschnitt -14°), Spektraltyp B. Bennu ist innen porös.

(162173) **Ryugu** (japanisch: Drachenpalast, hatte zunächst die Bezeichnung 1999 JU 3), entdeckt von LINEAR am 10. Mai 1999; besteht aus wenig verändertem, 4,5 Milliarden Jahre altem Material, das eventuell einmal mit Wasser in Berührung gekommen ist; Ryugu war Ziel der am 3. Dezember 2014 gestarteten japanischen Asteroidenmission Hayabusa 2, die den Asteroiden am 27. Juni 2018 erreichte; der schuhkartongroße bewegliche Lander MASCOT landete dort am 3. Oktober 2018; die Raumsonde brachte am 5. Dezember 2020 Bodenprobe von Ryugu zur Erde zurück; PHA der *Apollo*-Klasse; 1,1895 AU (Perihel 0,96319, Aphel 1,41582, Exzentrizität 0,19), Inklination 5,88°, Umlaufzeit 473,87 Tage, a Rotation 7,63h, Durchmesser 0,9 km, 2,5 km<sup>2</sup> (2,02 km<sup>2</sup> Monaco), 19,2 H, Albedo 0,07, Spektraltyp C.

(357439)**2004 BL 86**, entdeckt von LINEAR am 30. Januar 2004; PHA der *Apollo*-Klasse; Gr. Halbachse 1,502 AU (Perihel 0,8967, Aphel 2,1077, Exzentrizität 0,4), Inklination 23,7°, Umlaufzeit 1,84 Jahre (1 Jahr 307 Tage), Rotation 5 h oder 2,6 h, Durchmesser 325m, 0,33 km<sup>2</sup> (vgl. 0,44 Vatikanstadt), max. 9,5 mag, H = 19,1, passierte am 26. Januar 2015 in ca. 1,2 Mill km MOID-Abstand (0,008 AU, 3,2 LD = ca. 3-fache Mondentfernung) die Erde, V-Typ (Vesta). Bis 2027 (Passage von Asteroid 1999 AN 10) kommt kein anderer Brocken dieser Größe der Erde so nahe; 2004 BL86 selbst kommt der Erde mindestens 200 Jahre lang nicht mehr so nahe. Er hat einen kleinen Mond von 70 m Durchmesser (ca. 16% aller erdnahen Asteroiden mit einem Durchmesser von über 200 m haben min einen, manche sogar zwei Monde).

(137108)**1999 AN 10**, entdeckt von LINEAR am 13. Januar 1999; PHA der *Apollo*-Klasse; 1,4587 AU (Perihel 0,63880, Aphel 2,2787, Exzentrizität 0,56209), Inklination 39,9°, Umlaufzeit 1,76 Jahre, Durchmesser 0,8–1,8 (Ø 1,3) km, 5,3 km<sup>2</sup> (6 km<sup>2</sup> Clipperton-Insel), max. 7,3 mag, 17,1 H, Masse  $3 \cdot 10^{12}$  kg, Fluchtgeschwindigkeit a t 77 cm/s = 2,8 km/h, am 7. August 2027 zieht dieser Asteroid in 390.000 km MOID-Abstand (390.000 km = 0,0026 AD = Mondabstand) an der Erde vorbei.

<sup>27</sup> Siehe Fußnote 21.

## Aten-Asteroiden (16 Atens bis Juli 2004 nummeriert, 212 provisorisch)

(2062)**Aten** (ägyptischer Sonnengott Aton/Aten), entdeckt von Eleanor F. Henlin am 7. Januar 1976, erster Asteroid mit Gr. Halbachse < 1 AU, Namensgeber der Aten-Klasse. Gr. Halbachse 0,967 AU (Perihel 0,790, Aphel 1,143, Exzentrizität 0,183), Inklination 18,9°; Umlaufzeit 0,95 a (347,168 d) mit 30,04 km/s, Rotation 40,77 h; Größe 1,1 km, 3,8 km<sup>2</sup>, H = 16,80, Albedo 0,26; Masse  $7 \cdot 10^{11}$  kg, Dichte 2000 kg/m<sup>3</sup>, Gravitation 0,25 mm/s<sup>2</sup>, Fluchtgeschwindigkeit 48 cm/s; Temperatur 2°; Spektraltyp S.

(3753)**Cruithne „Zweiter Erdmond“** (irische Aussprache: kru:'inia, benannt nach Cruidne, son of Cinge in den Pictish Annals der Annals of Ulster, den König der Picten = Schotten = irisch. Cruthin), entdeckt am 10. Oktober 1986 vom Fotografen und Amateurastronomen Duncan Waldron; Erd-, Mars- und Venusbahnkreuzer der Aten-Klasse in 1:1 Orbitalresonanz zur Erde (also Quasi-Satellit im Sinne von Erdbegleiter), kreist von der Erde aus gesehen in einer bohnen- oder hufeisenförmigen geschlossenen Bahn (welche weder Erde noch Sonne einschließt, aber unweit der Erde sich befindet), auch Mars- und Venusbahnkreuzer.

**Gr. Halbachse** 0,998 AU (Perihel 0,484, Aphel 1,51, Exzentrizität 0,515), Earth MOID 10,7 Mio. km (0,07184 AU), Inklination 19,81°.  
**Umlaufzeit** 364,01 Tage; **Geschwindigkeit** 27,73 km; die ganze Bahn entfernt sich von und nähert sich wieder der Erde mit einer Periode von 774 Jahren. **Rotation** 27h 26min.

**Größe:** Durchmesser: 3,3 km; Oberfläche 79 km<sup>2</sup> (wie Guernsey), max. 15,5 mag; H = 15,1; Albedo 0,15.

**Masse:**  $10^{14}$  kg, Dichte 2000 kg/m<sup>3</sup>, 1/7007 Erdschwerkraft (0,01%, 1,4mm/s<sup>2</sup>), Fluchtgeschwindigkeit 2,6 m/s (9,36 km/h).

Zusatz: Ein „**Dritter Erdmond**“ in einer Hufeisenumlaufbahn ist am 18. November 1998 entdeckte Aten-Asteroid **1998 UP<sub>1</sub>**. Obwohl die Umlaufzeit mit 364,48d fast mit derjenigen der Erde übereinstimmt, sind die Umlaufbahnen sehr verschieden, der Asteroid ist exzentrisch mit Perihel 0,65 AU and Aphel 1,35 AU und hat große Inklination 33°; Größe 220–500 (Ø 360) m, H = 20,5.

Ein „**Vierter Erdmond**“ ist der oben erwähnte im Jahre **Apollo-Asteroid YORP** (150×128×93 m: Ø 124m)

ein „**Fünfter Erdmond**“ in einer Hufeisenumlaufbahn ist **2002 AA<sub>29</sub>**, entdeckt am 9. Januar 2002 von LINEAR mit 50–110 m Durchmesser: Gr. Halbachse 0,993 AU (Perihel 0,988, Aphel 1,012, Exzentrizität 0,012), Inklination 10°; Umlaufzeit 1 Jahr mit 29,784 km/s, Rotation < 33m, Größe 50–110 (Ø 80m), H = 24,08–25,23, Albedo 0,04–0,2.

Ein „**Sechster Erdmond**“ in einer Hufeisenumlaufbahn ist **2013 BS<sub>45</sub>**, entdeckt von James V. Scotti im KPNO / Arizona am 20. Januar 2013 (im Rahmen des Spacewatch project); Erdbahnkreuzer von Aten-Typ, zugleich vom *Arjuna*-Typ, es ist der erdähnlichste von allen Asteroiden in erdähnlichen Orbits; Gr. Halbachse 0,9974 AU (Perihel 0,9136, Aphel 1,0812, Exzentrizität 0,084), Inklination 0,79°; Umlaufzeit 1 Jahr (363,8394d), Rotation: sehr schnell im Bereich von nur einigen Minuten gemäß Radarmessungen; Größe 30m, H = 25,9. Der Orbit ist chaotisch und schon über wenige tausend Jahre schwer vorherzusagen. Nahe Begegnungen mit der Erde fanden statt am 12. Februar 2013 (0,013 AU) und am 11. Februar 2014 (0,032 AU).<sup>28</sup>

Ein „**Siebter Erdmond**“ in einer Hufeisenumlaufbahn ist der Erdbahnkreuzer vom *Apollo*-Typ **2016 HO<sub>3</sub>**, entdeckt am 27. April 2016, der stabilste der Quasi-Satelliten der Erde: Gr. Halbachse 1,0 AU (Perihel 0,9 Aphel 1,1, Exzentrizität 0,1), Inklination 0,77°; Umlaufzeit 1,00 Jahre, Größe 30-100m, H = 24,2.

(99942)**Apophis** (ägyptischer Schlangengott Apep), entdeckt von Roy Tucker, David J. Tholen und Fabrizio Bernardi am 19. Juni 2004; PHA, für die nahe Begegnung am 13. April 2029 wurde kurzzeitig eine Kollisionswahrscheinlichkeit von 2,7 % berechnet und eine Einstufung von 4 auf der Turiner Risikoskala vorgenommen; nach neuen Berechnungen wird er 2029 in mehr als 31.000 km Höhe mit ca. 7,5 km/s über den Ring der geostationären Satelliten hinweg an der Erde vorbei fliegen und eine scheinbare Helligkeit von 3,3 mag (Größe 2'') erreichen. Das Jahrtausendereignis des nahen Vorbeiflugs wird seine Bahn erheblich verändern, die Erde wird die neue Bahn jährlich am 13. April kreuzen, die große Halbachse wird auf über 1,1 AU anwachsen, so dass er vom *Aten*-Typ zum *Apollo*-Typ hinüberwechselt. Bereits 2036 gibt es eine erneute Annäherung, dann wieder 2068. Der Abstand ist noch nicht genau bekannt, da kleine Unsicherheiten bezüglich der Position am 13. April 2029 nach der Ablenkung schnell anwachsen.

Bis 2029 gilt: Gr. Halbachse 0,9332 AU (Perihel 0,746, Aphel 1,098, Exzentrizität 0,191), Inklination 3,331°; Umlaufzeit 323d 12h mit 31,012 km/s, kreuzt Erdbahn mit 5,87 km/s, Rotation 30h 37m; Größe 325 m, H = 19,7, Albedo 0,23; Masse  $4 \cdot 10^{10}$  kg, Dichte 3200 kg/m<sup>3</sup>, Gravitation 0,25 mm/s<sup>2</sup>, Fluchtgeschwindigkeit 0,52 km/h (14,4 cm/s), H = 16,80, Albedo 0,26; Temperatur -3°; Spektraltyp Q.

## Atira-Asteroiden / Apohele-Asteroiden

(163693)**Atira** (Erd- und Morgenstern-Göttin der Pawnee-Indianer) erstentdecktes namengebendes und größtes Objekt dieser Art, bisher einziges mit Eigennamen, entdeckt 11. Februar 2003 vom Lincoln NEAR Projekt, Venusbahnkreuzer, Gr. Halbachse 0,7011 AU (Perihel 0,502, Aphel 0,9798, Exzentrizität 0,3), Inklination 25,6°, Umlaufzeit 233d mit 34 km/s, Rotation 3 h, Größe: Durchmesser 2,5 km, 19,6 m<sup>2</sup> (14 m<sup>2</sup> Cocos Islands), Albedo 0,1, Größenklasse 16,3 H, Masse  $10^{12}$  kg, Dichte 2000 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,3 mm/s<sup>2</sup>, Fluchtgeschwindigkeit 0,5 m/s, Temperatur 50°.

<sup>28</sup> Der 10 m große **2008 BD** wäre ein *weiterer (siebter) erdbegleitender Felsen*. Sieha auch Fußnote 18.

## 1.5. Sonne

**Sonne** (lat. *Sol*; griech. *Helios* & *Apollon* & *Hyperion*; ahd. *Sol*, *Sunna*; sanskr. *Surja*, pers. *Mithras*, sem. *Schemesch*; äg. *Aton* & *Re* (*Chepre*, *Harachte/Hor*, *Atum*), sumerisch *Utu*, azteken: *Huitzilopochtli*, japan: *Amaterasu*), vgl. Sonntag, Dies solis. Symbol: ☉. Alter: 4,567 Mrd Jahre, Geschwindigkeit: 20 km/s gegen Nachbarsterne, 230 km/s um Galaxiekern (27.000 Lichtjahre) in 225 Mio. Jahren; 370 km/s gegen Hintergrund.

**Rotation:** siderisch 25,4 Tage, Achsenneigung gegenüber der Normale der Erdbahnebene 7,25°.

**Größe:** Ø 1.392.684 km (109 Erden), 31,5–32,5' (wie der Mond); -26,74 mag (400.000 × Vollmondshelligkeit);<sup>29</sup> absolut 4,83 mag

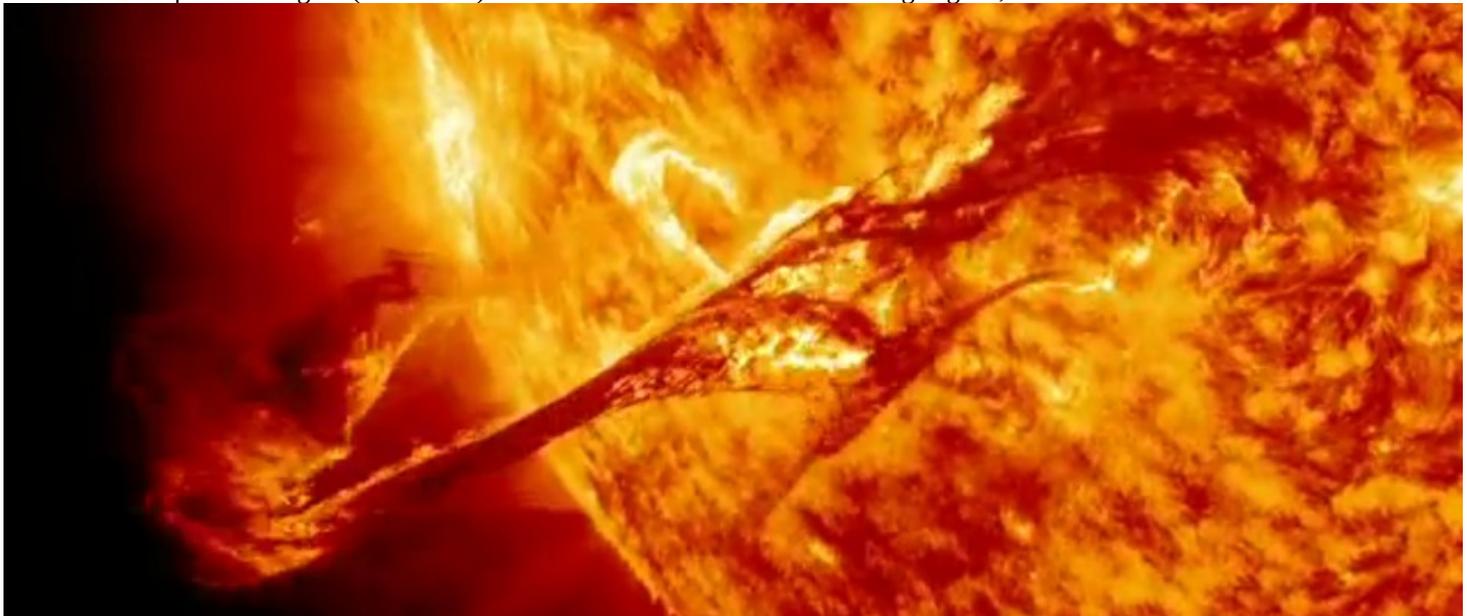
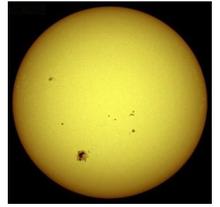
**Masse:**  $2 \cdot 10^{30}$  kg (99,8% der Masse des Sonnensystems), Dichte 1408 kg/m<sup>3</sup>, Oberflächen-Schwerkraft: 30x Erdschwerkraft, Fuchtgeschwindigkeit 617,3 km/s

**Bestandteile:** Wasserstoff 92,1%, Helium 7,9%, Sauerstoff 500 ppm, Kohlenstoff 240 ppm, Neon 100 ppm, Stickstoff 70 ppm, Spektralklasse G2V; B-V Farbindex 0.656.<sup>30</sup>

**Temperatur:** Oberfläche 5505° (5778 K), Kern 15.600.000°;

**Magnetfeld** 100 Mikrottesla (= 1 Gauß = 2 × Stärke des Erdmagnetfeldes). **Sonnenflecken** (11jähriger Zyklus; Abkühlung 3430–4230°, Magnetfeld 0,4 Tesla (4000 Gauß = 10.000 × Erde); siehe auch Fußnote 6.

**Topologie:** Nullmeridian ist der derjenige, der am 9 November 1853 durch die Mitte der Sonnenscheibe ging, als Amateurastronom Richard Christopher Carrington (1826-1875) mit seiner Sonnenflecken-Beobachtung begann, welche die Rotation der Sonne bewies.



### Missionen

**Helios 1** (1974–1986, BRD 70% + USA 30%): Sonnenumlaufbahn mit Perihel 46,5 Mio. (≈ Perihel Merkurs)<sup>31</sup>

**Helios 2** (1976–1981, BRD 70% + USA 30%): Sonnenumlaufbahn mit Perihel 43,5 Mio. (≈ innerhalb der Merkurbahn)

**Ulysses** (1990–2008, ESA + NASA): polare Sonnenumlaufbahn.

**Wind** (1994–, NASA): zum L1-Punkt und dann in „Blütenblatt“-Orbit an der Grenze des Erdschwerefeldes (Erforschung des hereinkommenden Sonnenwindes beim Kontakt mit der Schockfront der Erde.

**SOHO**, Solar and Heliospheric Observatory (1995–, ESA + NASA): Orbit um L1-Punkt. Flaggschiff der Sonnenforschungssonden.

**Genesis** (2001–2004, NASA): Zum L1-Punkt des Sonne-Erd-Systems, sammelte Sonnenwind-Teilchen ein und brachte sie zur Erde, aber der Bremsschirm öffnete sich nicht: harter Aufschlag in der Wüste von Salt Lake City: nur Teile der Kollektoren bleiben intakt.

**STEREO** (2006- NASA): Das Projekt **STEREO** (Solar **TER**restrial **REL**ations **OB**servatory) der US-Raumfahrtbehörde NASA besteht aus zwei fast identischen Raumsonden, die die Sonne und die Wechselwirkung ihrer Teilchenausbrüche und Felder mit der Magnetosphäre der Erde erstmals dreidimensional beobachten (Stereoeffekt).

<sup>29</sup> -29,30 mag Sonne vom Merkur aus im Perihelium; -27,4 mag Sonne von der Venus aus im Perihelium; -26,74 mag Sonne von der Erde aus; -25,60 mag Sonne vom Mars aus im Aphelium; -23,00 mag Sonne vom Jupiter aus im Aphelium; -21,70 mag Sonne vom Saturn aus im Aphelium; -20,20 mag Sonne vom Uranus aus im Aphelium; -19,30 mag Sonne vom Neptun aus im Aphelium; -18,20 mag Sonne vom Pluto aus im Aphelium; -16,70 mag Sonne von Eris aus im Aphelium; -11,20 mag Sonne von Sedna aus im Aphelium.

<sup>30</sup> Astronomen messen die Helligkeiten nur in bestimmten **Spektralbereichen**. Entsprechend definierte man Ultraviolett-Helligkeit (U) bei 356 nm, visuelle Helligkeit (V) bei 550 nm (gelb-grün), Blau-Helligkeit (B) bei 440 nm, Rot-Helligkeit (R), Infrarot-Helligkeit (I), und welche die durch bestimmte Filter gemessenen Helligkeiten sind, die nur den betreffenden Spektralbereich durchlassen. Besonders gebräuchlich in der Astronomie ist das *Johnson-Filterssystem* (1950), bestehend aus einem UB<sub>V</sub>-System. Die gemessenen Helligkeiten in den einzelnen Filtern kann man voneinander abziehen (kurzwellig minus langwellig). So erhält man den so genannten **Farbindex**, sehr gebräuchlich ist beispielsweise U-B, U-V, B-V, V-R. Je größer der Farbindex ist, desto „röter“ ist das Objekt. Für visuelle Beobachtung hat B-V die größere Bedeutung. z.B. bedeutet B-V = -0,23 blau (wie Spica), B-V = 0 bläulichweiß (Rigel), B-V = 0,09 weiß (Deneb), B-V = 0,65 gelblich (Sonne), B-V = 2,06 tiefrot (119 Tauri).

<sup>31</sup> Helios 1 war die erste Raumsonde, die nicht in den USA oder in der UdSSR gebaut wurde. Die Sonden halten den Geschwindigkeitsrekord für Raumsonden mit 70,22 km/s relativ zur Sonne.

## 1.6. Merkur

**Merkur** (griech. *Hermes*, *Stilbon* = der Schimmernde/Glänzende; germ. *Wotan/Odin*, kelt. *Esus*, für den Opfer erhängt werden, indisch *Budha*, bab. *Nabu*, assyr. *Gu-ud*, *Ninurta*, akkad *Schih-tu* Sprung, sumerisch *Enki* (= *Ea*), äg. *Sebeg/Sebgu* = Seth+Toth, Stern des Seth, chin. 水星 (*shuǐxīng*) Wasserstern = jap. *Suisei* = viet. *Sao Thuy*; altchin. *Chenxing* = jap. *Shinsei* = viet. *Thàn tinh*) vgl. Mittwoch, Mercredi, Wednesday=Wotanstag, Symbol ☿ (Kopf und Flügelhelm des Handels- & Botengottes Merkur, seinen Stab<sup>32</sup> überragend).



**Gr. Halbachse** 58 Mio. km = 0.387 AU (Perihel 0.307, Aphel 0.467, Exzentrizität 0,21), Periheldrehung 572"/Jh.; Inklination 7°, max. Elongation 28°.

**Umlaufzeit:** siderisch 88d Tage (3 Monate), synodisch 116 Tage (4 Monate); 47 km/s.

**Rotation:** 58d.647 (siderischer Tag; 3× Tag = 2× Umlauf) bzw. 176d (Sonnentag = 2x Umlauf); Sonne läuft in Perihelnähe rückläufig, kann an bestimmten Orten im O aufgehen, vorlaufen, zurücklaufen, im O untergehen und erneut aufgehen; Achsenneigung 0,01°.

**Größe:** Ø 4879 km nicht abgeplattet (38% Erde > 1/3), Oberfläche 74.800.000 km<sup>2</sup> (Asien + Afrika); 4.6 – 12.2"; max. -2,45 mag obere Konjunktion (anders als bei der Venus ist Merkur in oberer Konjunktion hinter der Sonne heller als in unterer vor ihr); min. 5,73 mag untere Konjunktion; Albedo 0,1 (dunkle Oberfläche, vielleicht durch Kometenstaub)

**Masse:** 3•10<sup>23</sup> kg, Dichte: 5427 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft: 1/3 Erdschwerkraft (0,38%), Fluchtgeschwindigkeit 4,3 km/s.

**Atmosphäre** Ein Billiardstel des Drucks auf der Erde, Gesamtatmosphäre wiegt 1000 kg, entspricht einen 9,4 m Würfel Erdluft. Sauerstoff 42%, Natrium 29%, Wasserstoff 22%, Helium 6%, Kalium 0,5%

**Temperatur** -183 bis +427 Grad (Zink schmilzt). Gleichgewichtstemperatur: 164°.

**Magnetfeld** global 450 Nanotesla (ca. 1 % Erdmagnetfeld); siehe auch Fußnote 6.

**Topologie:** Nullmeridian ist definiert als der Meridian, auf dem einer der Punkte der Merkuroberfläche liegen, die zur Zeit des Perihelions (des Zeitpunktes der größten Annäherung an die Sonne) subsolar sind (wegen der 3:2-Resonanz zwischen Umlauf und Rotation gibt es zwei solche Punkte, die sich diametral gegenüberliegen, einer von ihnen liegt im Caloris-Becken, *Caloris Planitia*); von diesen beiden Punkten ist es derjenige, der bei der ersten Perihelion-Passage des Jahres 1950 subsolar war (der *nicht* im Caloris Planitia liegt). Definiert ist er auch dadurch, dass er kleine Krater (1,5 km) *Hun Kal* („Zwanzig“ in der Maya-Sprache) auf 20° liegt.

**Sonne vom Merkur aus:** -30 mag; im Perihel ist die Sonnenscheibe 10 ½ mal größer als auf der Erde, im Aphel 4 ½ mal.

**Mercurmond:** Merkur ist vielleicht ein entlaufener Venusmond.

### Raumfahrtmissionen:

**Mariner 10** (1974, USA): nach Swingby an Venus (erstes Swingby-Operation der Raumfahrtgeschichte) Vorbeiflug am 29. März 1974 in einer Entfernung von 705 km, am 21. September 1974 fand in einer größeren Distanz von etwa 50.000 km und letztmalig am 16. März 1975, 375 km entfernt.

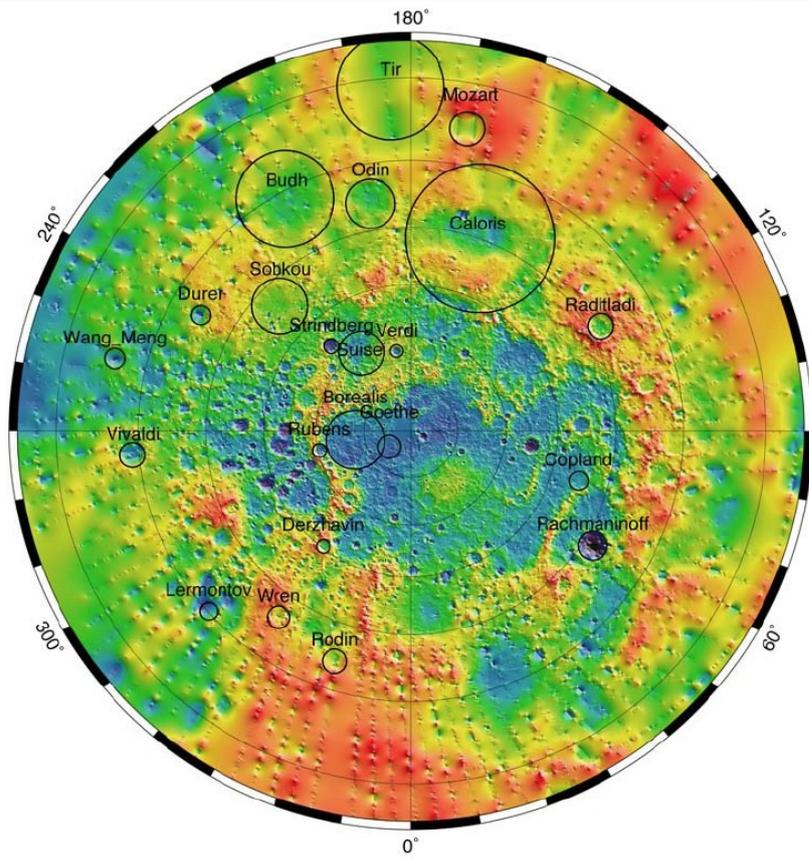
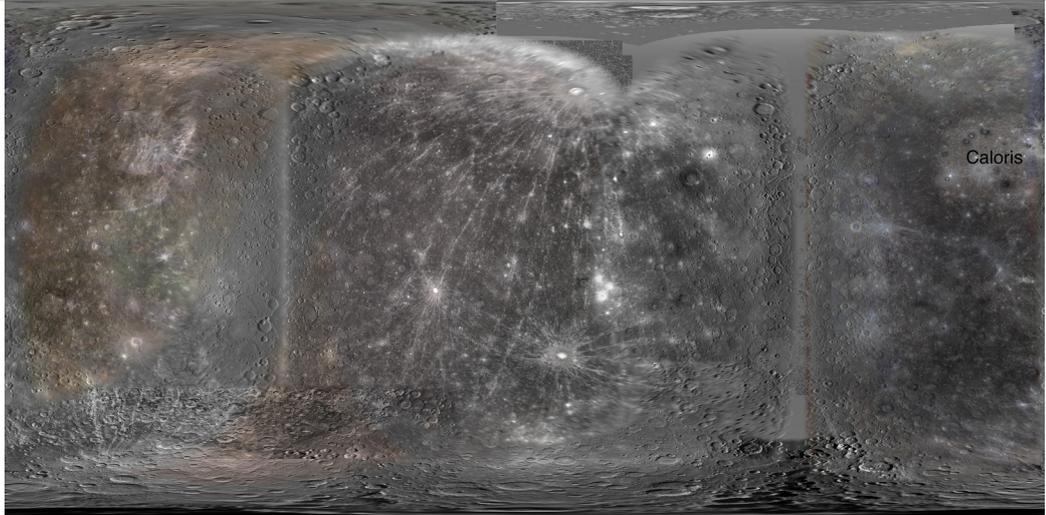
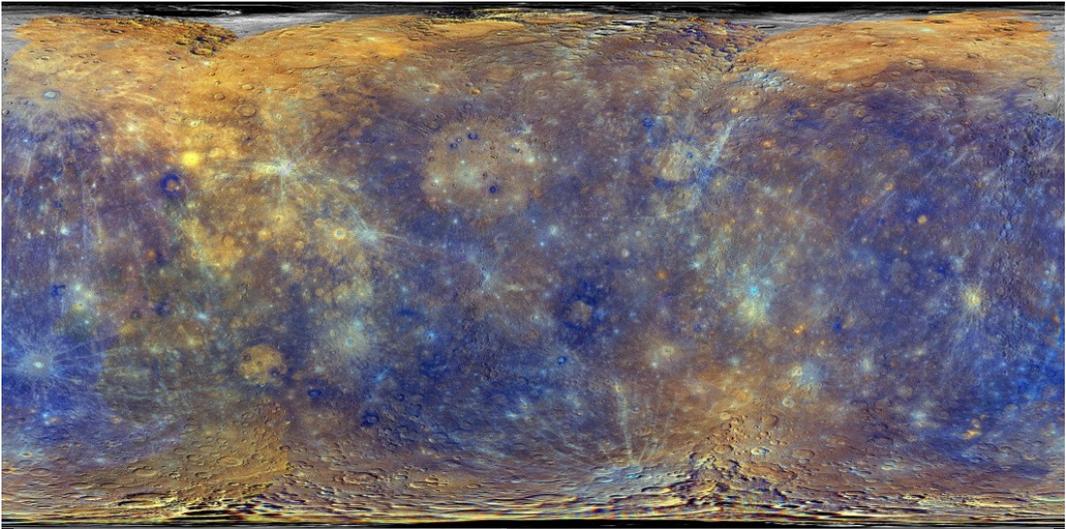
**MESENTER** (Mercury Surface, Space Environment, Geochemistry and Ranging) (seit 18. August 2011, USA): Orbitermission.

**BepiColombo** (Europa), startete am 20. Oktober 2018, ist auf dem Weg zum Merkur und soll 2025 eine Umlaufbahn einschwenken.Raum



Mariner 10 (1974), nat. Farben Messenger (Flyby 14.1.2008) Messenger (Falschfarben)

<sup>32</sup> Der Merkurstab (lat. Caduceus, griech. κηρύκειον von κήρυξ „Herold“) ist ein Stab mit zwei Flügeln, der von zwei Schlangen mit einander zugewendeten Köpfen umschlungen wird. Im Altertum war dieser Heroldsstab Erkennungszeichen der Herolde, der die Immunität dieser Überbringer militärischer Befehle oder geheimer Nachrichten signalisieren und ihre schadhlose Rückkehr sichern sollte.



## 1.7. Venus

**Venus** (griech. *Aphrodite*, als Morgenstern *Phosphoros* = Lichtbringer, als Abendstern *Hesperos*; germ. *Freya*, indisch *Shukra*, bab. *Ishtar*, westsemitisch *Astarte*, assyr. *Dil-Bat* (*Dele-bat*), akkad *Nabu*, *Nabitu* hell leuchtend, sumerisch *Inanna=Ninsianna*. äg. *Isis*, *Netjer-duai*, *Ba'ah*, *Seba-djai*, chin. 金星 (*Jīnxīng*) Metallstern = jap. *Kinsei* = viet. *Sao Kim*, antchin. *Tai-bai-xing* = jap. *Taihakusei* = viet. *Sao thài bach*); „Perelandra“ bei C.S.Lewis; vgl. April, Ventredi, Friday, Freitag; Pythagoras erkannte Identität von Abendstern und Morgenstern (zuvor in Babylon bekannt): Symbol ♀ (Handspiegel der Liebesgöttin). **Gr. Halbachse** 108 Millionen km (0,723 AU; Perihel 0,718; Aphel 0,728, Exzentrizität 0,01), Inklination 3,4°; max. Elongation 47°.



**Umlaufzeit** siderisch 225 Tage (7,5 Monate), synodisch: 584 Tage (1 Jahr 7 Monate); 35 km/s; Umlaufzeiten Erde: Venus = 8:13 -> Venus holt Erde (13–8 = 5x) ein: Punkte der unteren Konjunktionen bilden ein regelmäßiges Fünfeck („Venus-Petragramm“).

**Rotation** siderischer Tag 243 Tage (8 Monate; 1,1 Umläufe = langsamste Rotation im Sonnensystem); Sonnentag 116 $\frac{3}{4}$  Tage (knapp 4 Monate; knapp > 0,5 Umläufe); Achsenneigung 177,4° bzw. 2,6° retrograd wie Pluto & Uranus, d.h. Sonne geht im Westen auf); Äquator-Rotationsgeschw. 6,5 km/h (1,8 m/s = schnelles Schrittempo); Eigenartig: Siderischer Venustag : Siderisches Erdenjahr = 2:3 [243: 365,26 = 0,665];

Superrotation retrograd in der Hochatmosphäre in 50 km Höhe am Äquator: 4 Tage mit 100 m/s = 360 km/h.

**Größe** Ø 12.104 km, Fläche 460.234.317 km<sup>2</sup> (= 3-fache Landmasse der Erde), 9,6–66,0" max. -4,98 mag (Venussichel untere Konjunktion) min -3,82 mag (obere Konjunktion) Albedo 0,75.

**Masse** 5•10<sup>24</sup> kg, Dichte 5243 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 9/10 Erdschwerkraft (90%), Fluchtgeschwindigkeit 10,4 km/s.

**Atmosphäre** 92 Bar (wie Wasserdruck in 900 Meter Tiefe)

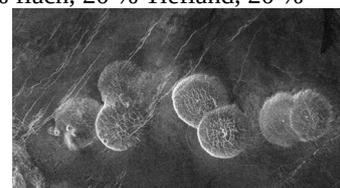
96% Kohlendioxid, 3,5% Stickstoff, 0,5% Schwefeldioxid, Schwefelsäure, Wasserdampf, Argon; starker Treibhauseffekt.

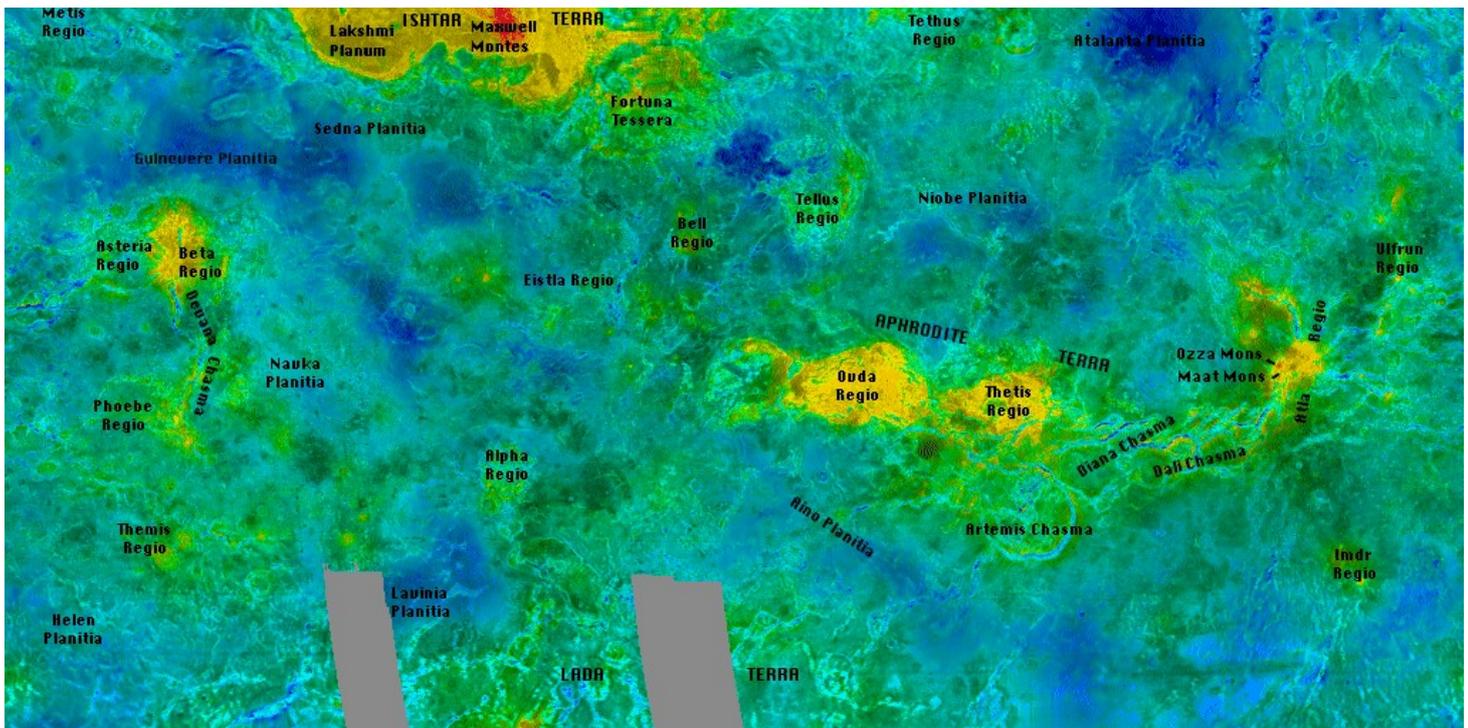
Wolkenschicht zwischen 50 und 70 km Höhe, Wolken aus Schwefelsäure.

**Temperatur** meist ca. 437°–497° (mittlere: 462°), am Boden wegen der dichten Atmosphäre kaum Unterschiede zwischen Tages- und Nachttemperaturen; Unterschiede gibt es nur aufgrund verschiedener Höhenlagen: der kälteste Punkt auf den Maxwell-Montes hat 380° (bei einem Druck von „nur“ 45 Bar), höher als der Schmelzpunkt von Zinn (232°), Blei (327°) und Zink (419,5°); die mittlere Temperatur ist auch höher als die Höchsttemperatur des sonnennächsten Planeten Merkur (427°) und höher als die ohne Treibhauseffekt für Venus errechnete Gleichgewichtstemperatur (-41°). Das Kohlendioxid am Boden ist superfluid, also in einem Zustand zwischen flüssig und gasförmig, es gleich einem dünnflüssigen Meer. Vom Sonnenlicht erreichen nur 2 % (5000 Lux) den Boden, der dunkelrotglühend ist; die Sicht beträgt 3 km wie bei einem trüben Nachmittag auf der Erde. Auf hohen Bergen ist eine schneeartige weiße Substanz, vermutlich Tellur oder Bleisulfid. Es gibt Vulkanismus, Gewitter und Blitze und regnet Schwefelsäure, die Tropfen kommen aber nicht am Boden an. Windstärke am Boden gering (1-10 m/s). Viele Beobachter seit Riccioli (1643) haben auf der Nachtseite der Venus ein Leuchten, das sog. aschgraue Licht der Venus gesehen, vermutlich ein Wetterphänomen. Einige Regionen zeigen „Windfahnen“, die von einzelnen Kratern und Vulkankegeln ausgehen; sie bevorzugen eine den globalen atmosphärischen Strömungen in Bodennähe entsprechende westliche und äquatoriale Richtung. In 125 km Höhe herrschen aber Temperaturen von -175°. Dort könnte Kohlendioxid in Form von Schnee oder Eis vorliegen. In etwa 50 Kilometern Höhe über dem Boden herrschen etwa 75 Grad und der atmosphärische Druck auf diesem Level entspricht dem der Erde auf Meeresebene (1 Bar).

**Magnetfeld:** < 10 Nanotesla (praktisch nicht vorhanden, da interplanetar 2–4 Nanotesla); aber induziertes Magnetfeld in der Atmosphäre bis 150 Nanotesla; siehe auch Fußnote 6.

**Topologie:** Nullmeridian geht durch die Zentralspitze des Kraters Ariadne (Ø 23,6 km, 43,9° nörd. Breite) in Sedna Panitia (Tiefland südlich von Ishtar Terra), die Maxwell Montes nördlich davon und die Alpha Regio südlich davon. 60 % flach, 20 % Tiefland, 20 % Hochland (12 Km Höhenunterschied); Kontinente (Hochland): 1. Ishtar Terra (Größe Australiens) im Norden; Ostausläufer sind die Maxwell Montes 10,2 Km; 2. Aphrodita Terra im Südosten langgestreckt in Äquatornähe von der Größe Südamerikas; 3. kleineres Hochland 4000 südlich von Ishtar Terra (südlich vom Äquator): Apha Regio. dort Seoritsu Farra („farrum“ = Lavafeldkuppel) = 7 pfannkuchen-artige Farra mit Durchmessern bis 35 km und Höhen von ca. 1 km





**Bemerkenswert:**

1. Zunahme der durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von 300 km/h auf 400 km/h in acht Jahren von 2006 bis 2014;
2. Abnahme der Rotation um 6,5 Minuten in 16 Jahren von den Zeiten Magellans (1989-1994) bis Venus-Express (2005-2014);
3. Venus Express konnte nach der Ankunft an der Venus stark steigende Schwefeldioxidwerte über den Wolken feststellen, die mit der Zeit durch Aufspaltung des SO<sub>2</sub> durch das Sonnenlicht zurückgingen. Da bereits Pioneer-Venus 1 nach ihrer Ankunft ähnlich hohe Werte antraf und ihr Absinken verfolgen konnte, kommt als Ursache, neben Vulkanausbrüchen, ein regelmäßig durch das Venusklima bedingtes Aufsteigen des Gases aus tieferen Atmosphärenschichten in die Hochatmosphäre in Frage.
4. Die Pioneer-Venus-Eintauchkapsel fand in den Wolken Partikel in Bakteriengröße; es gibt Spekulationen über mögliches Leben in den Wolken.

**Venusmond:** Im Jahr 1672 behauptete aber der italienische Astronom Giovanni Domenico Cassini, einen solchen entdeckt zu haben und nannte ihn Neith (ägypt. Göttin „die Schreckliche“). Bis 1892 war der Glaube an einen Venusmond verbreitet, bevor sich herausstellte, dass anscheinend Sterne irrtümlich für einen Mond gehalten worden waren.

Ein einstiger echter Venusmond könnte Merkur gewesen sein, der sich von der Venus irgendwann trennte.

**Venustrojaner:** Im 13. Juli 2013 fand man im Rahmen der Pan-STARRS-Himmelsdurchmusterung im L4-Punkt der Venus erstmals einen Trojaner;<sup>33</sup> dieser erhielt die Bezeichnung 2013 ND 15 erhielt (42-93m Durchmesser). Er ist ko-orbital mit Venus, aber zugleich ein Merkur- und Erdbahnkreuzer, und seine Bahn ist so instabil, dass er in etwa 500 Jahren seine Trojaner-Bahn verlassen und zu einem Quasisatelliten werden wird.

**Venus-Quasisatelliten:** Seit 2001 fand man drei Quasisatelliten (322756) 2001 CK 32 (Durchmesser 800 m), 2002 VE 68 (Durchmesser 120-480 m) und 2012 XE 133 (Durchmesser 70 m) am

**Venusmissionen:**

**Venera 1** (20. Mai 1961, UdSSR): Vorbeiflug in 100.000 km Entfernung (Funkkontakt war schon am 19. Februar in 2 Mill. Km Entfernung von der Erde abgebrochen, die Sonde war aber das erste von Menschen gebaute Projektil, das in die Nähe der Venus kam.

**Mariner 2** (14. Dezember 1962, USA): Vorbeiflug 34.000 km Entfernung, erste erfolgreiche Flyby-Mission zu einem Planeten, die Sonde entdeckte den Sonnenwind und die überraschend heißen Temperaturen auf der Venus (425°).

**Venera 2** (27. Februar 1966, UdSSR): Vorbeiflug in 24.000 km, kurz vorher bricht Funkkontakt ab.

**Venera 3** (1. März 1966, UdSSR): vermutlich harte Landung (vorher bricht Funkkontakt ab). Erste Landung auf einem Planeten.

**Venera 4** (18. Oktober 1967, UdSSR): Lander taucht in Atmosphäre ein & überträgt 96 Min. Daten bis in 25 km Höhe, dann Abbruch.

**Mariner 5** (19. Oktober 1967, UdSSR): Vorbeiflug 3990 km Entfernung.

**Venera 5** (16. Mai 1969, UdSSR): Lander taucht in Atmosphäre ein & überträgt 53 Min. Daten, dann Abbruch.

**Venera 6** (17. Mai 1969, UdSSR): Lander taucht in Atmosphäre ein & überträgt 51 Min. Daten, dann Abbruch.

**Venera 7** (15. Dezember 1970, UdSSR): Lander überträgt 35 Min. Atmosphären-Daten, nach Landung weitere 23 Min (ohne Bilder).

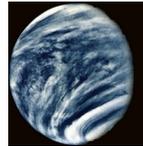
**Venera 8** (22. Juli 1972, UdSSR): Lander überträgt 50 Min lang Daten, aber nur 11 Sekunden von der Oberfläche (ohne Bilder).

<sup>33</sup> Entdecker war ein Astronomenteam um N. Primak, A. Schultz, T. Goggia und K. Chambers mit dem Pan-STARRS-1-Teleskop auf dem Haleakalā / Hawaii.

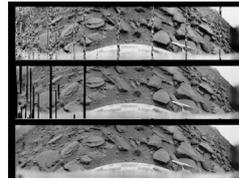
**Mariner 10** (5. Februar 1974, UdSSR): Vorbeiflug in 5800 km; erste Bildaufnahmen von der Venus; dann erstes Swingby-Manöver der Geschichte und Weiterflug zum Merkur.



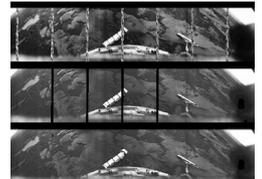
Mariner 10:  
reale Farben



Mariner 10  
UV-Licht



Venera 9



Venera 10

**Venera 9** (20. Oktober 1975 UdSSR): Lander überträgt erstmals Bilder & Daten (53 Minuten lang) von der Oberfläche eines anderen Planeten.

**Venera 10** (25. Oktober 1975, UdSSR): Lander arbeitet 63 Min auf der Oberfläche und übermittelt Bilder. Wie sich später herausstellte, wurde das Ende der Übertragung nicht durch Ausfall der Lander verursacht, sondern weil die Orbiter vom Lander aus gesehen hinter dem Horizont verschwanden, so dass keine Daten mehr empfangen wurden. Der Venera-9-Orbiter arbeitete bis zum 22. März 1976.

**Pioneer Venus 1** (4. Dezember 1978-Mai 1992, USA): Orbitermission.

**Pioneer Venus 2** (9. Dezember 1978, USA): vier erfolgreiche Atmosphärensonden: eine überstand unerwartet die Landung und lieferte 67 Minuten Daten von der Oberfläche.

**Venera 12** (21. Dez. 1978, startete nach Venera 11, kam aber vorher an): Lander arbeitet 110 Min. auf der Oberfläche (keine Bilder).

**Venera 11** (25. Dezember 1978): Lander arbeitet 95 Min. auf der Oberfläche (keine Bilder).

**Venera 13** (1. März 1982): Lander arbeitet 117 Min. auf Oberfläche (Daten und erstmals Farbbilder).

**Venera 14** (3. März 1982): Lander arbeitet 57 Min. auf Oberfläche (Daten und Bilder).

**Venera 15** (10. Oktober 1983-1984): Orbitermission: Radarkartierung.

**Venera 16** (14. Oktober 1983-12. Juli 1984): Orbitermission: Radarkartierung.

**Vega 1** (11. Juni 1985, UdSSR): Vorbeiflug (weiter zum Halleyschen Kometen), Lander (56 Min.) und Ballon (46,5 Stunden), der erste Atmosphärenballon auf einem fremden Planeten.

**Vega 2** (14. Juni 1985, UdSSR): Vorbeiflug (weiter zum Halleyschen Kometen), Lander (57 Min.) und Ballon (60 Stunden).

**Magellan** (10. August 1990-12. Oktober 1994, USA): Orbitermission: Radarkartierung.

**Galileo** (10. Oktober 1994): Vorbeiflug in 16.000 km Entfernung, Swingby-Manöver auf dem Weg zum Jupiter.

**Cassini** (April 1988 und Juni 1999, USA, ESA): Zwei Vorbeiflüge (Swingby-Manöver) auf dem Weg zum Saturn.

**MESSENGER** (14. Okt. 2006 und 5. Juni 2007, USA): Zwei Vorbeiflüge auf dem Weg zum Merkur.

**Venus-Express** (11. April 2006- 28. November 2014, ESA): Orbiter, genaue Kartierung.

**Akatsuki** (2015, Japan): Sonde zur Erforschung von Klime und Atmosphäre, Eintritt in den Orbit am 8.12.2014 scheitert, 2015 wurde erfolgreich ein zweiter Versuch unternommen, die Sonde in den Orbit einschwenken zu lassen.

**BepiColombo** (Merkur-Sonde Europas), machte auf dem Weg zum Merkur am 15. Oktober 2020 ein Swing-By an der Venus.



Bilder von Verena 13

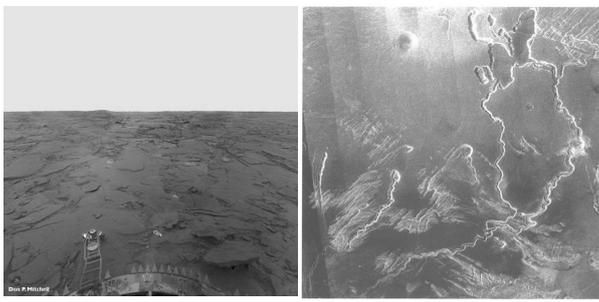


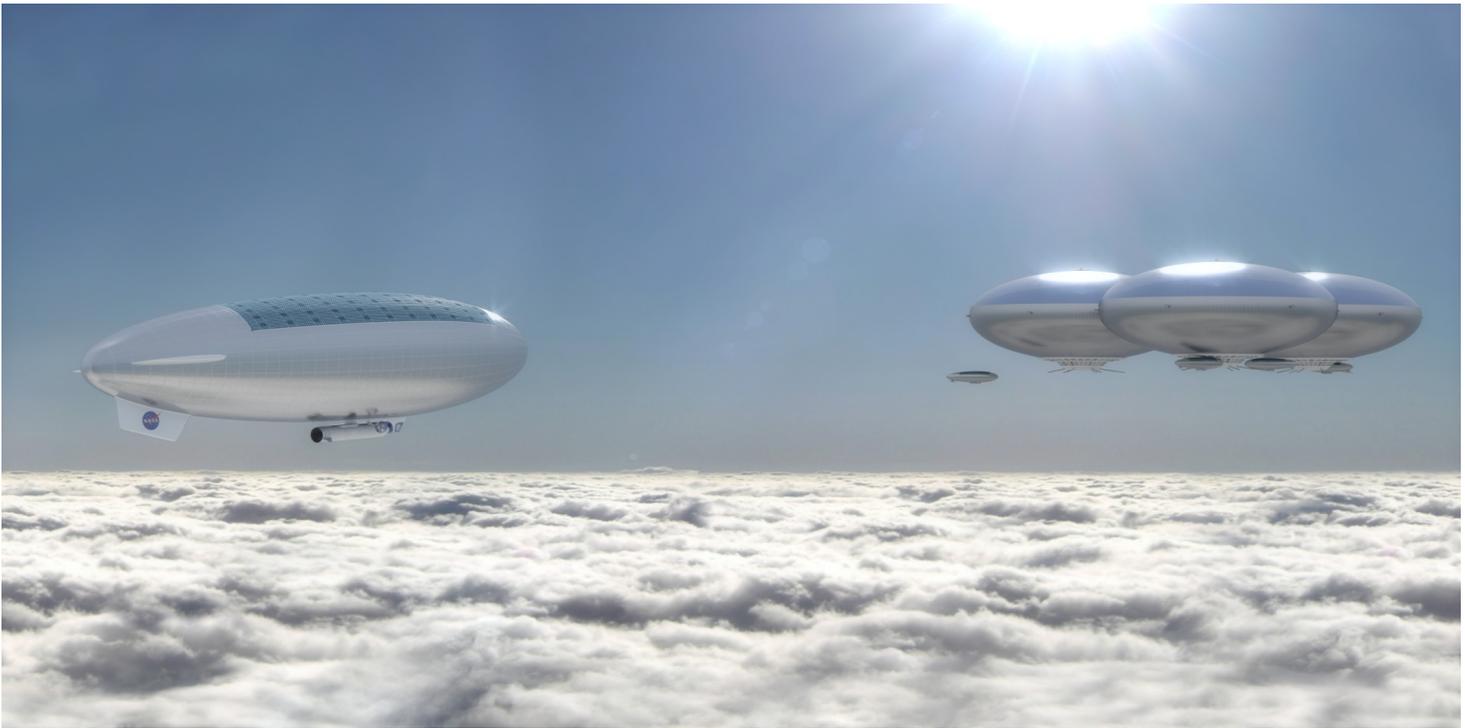
Bild von Verena 14 Magellan: Flussbetten auf der Venus



Venus als Abendstern über einem irdischen Ozean



Venusoberfläche: Künstlerische Darstellungen



künstlerische Darstellung einer bemannten Venus-Atmosphären-Mission.

**Leben:** Auf der Venus könnten Milliarden von Jahren in der Vergangenheit erdähnliche Bedingungen mit flüssigem Wasser und gemäßigten Temperaturen geherrscht haben; nach einer in Scientific American (Artikel von Shannon Hall, 10. August 2016) könnte es vor 2,9 Milliarden Jahren Ozeane und angenehme Temperaturen um 11 Grad gegeben haben; noch bis vor 715 Milliarden Jahren wäre nach diesem Modell die Temperatur erst um 4 Grade angestiegen. Irgendwann ist dann aber das Wasser verdampft und setzte einen Treibhauseffekt in Gang, der zur weiteren Aufheizung führte. Die langsame Rotation muss nicht lebensfeindlich (gewesen) sein, sie könnte sogar förderlich gewesen sein, weil ohne sie die extreme Erwärmung noch schneller voranginge. Bei langsamer Rotation könnten die Wolke sich auf der Tagesseite aufgebaut und eine zu starke Aufheizung verhindert haben, während die Nachtseite wolkenfrei blieb, was das Entweichen der Hitze in den Weltraum ermöglichte.

Möglich ist also, dass auf der Venus Leben entstanden ist, dessen Spuren vielleicht noch auf der Oberfläche erhalten geblieben sind. Vielleicht gibt es sogar auch heute noch Leben, das in die Hochatmosphäre ausgewichen ist.

Eine **Kolonisation** der Venus (vorgeschlagen von Geoffrey Alan Landis, vgl. das HAVIC, High Altitude Venus Operational Concept HAVOC der NASA, in dem bemannte Venusmissionen in Atmosphärenballons entworfen werden) wäre in schwebenden Städten aus Ballon-Habitaten in 50-55 km Höhe über den dichtesten Wolken möglich (Landis: Auf der Oberfläche sei der Planet zwar eine Hölle, aber „At cloud-top level, Venus is the paradise planet“), da in der Kohlendioxidatmosphäre Ballons mit Atemluft (Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch) Auftrieb haben und somit in dieser Höhe problemlos schweben können, wo „paradiesische Bedingungen“ herrschen sollen, jedenfalls die erdähnlichste Umgebung im Sonnensystem außerhalb der Erde vorliegt. Hier herrscht in etwa dieselbe Gravitation und derselbe Luftdruck wie auf der Erde (oberhalb dieser Schicht sind weitere vor der Sonne schützende Wolken bis 65 km Höhe); da die darüber liegende Ionosphäre ein Magnetfeld erzeugt, ist man vor kosmischen Strahlen geschützt; es herrscht eine Superrotation, am Äquator von ca. 100 Stunden (4 Erdtagen), in höheren Breiten reduzierte sie sich auf 1 Tag, die Temperaturen liegen tagsüber bei bis zu 75 Grad (in 55 km bis zu 27 Grad), in der Nacht bei -140 Grad. Energie kann mit Sonnenkollektoren gewonnen werden, die über und (wegen der hohen Rückstrahlkraft der Licht reflektierenden unteren Schwefelsäure-Wolkenschicht) auch unter dem Ballon angebracht werden können; Sauerstoff kann aus Kohlenstoffdioxid  $\text{CO}_2$  der Venusluft und/oder Schwefeldioxid  $\text{SO}_2$  der Wolken gewonnen werden, Stickstoff N ist ohnehin vorhanden, so kann atembare Luft (Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch 21:79) gewonnen werden; Wasser  $\text{H}_2\text{O}$  kann aus der Schwefelsäure  $\text{H}_2\text{SO}_4$  der Wolken gewonnen werden. So können die überlebenswichtigen Stoffe aus der Umgebung des Habitats erzeugt werden.

Zugleich wird ein **Terraforming** der Venusoberfläche (ihre Bewohnbarmachung für den Menschen) vorgeschlagen: Maßnahmen, welche im Laufe von Jahrhunderten Temperatur und Luftdruck verringern, eine atembare Sauerstoffatmosphäre erzeugen (all diese könnte nach einem Vorschlag von Carl Sagen aus dem Jahre 1961 mit der Aussetzung entsprechend gezüchteter Mikroorganismen bzw. Algen in den Wolken gelingen; Robert Zubrin schlug 1999 Solarschilde vor, die einen Schatten auf den Planeten werfen und diesen Abkühlen; der Schild oder die Schilde sollte/sollten im L1-Punkt des Systems Sonne-Venus angebracht werden, dann würde zugleich der Sonnenwind vom Planeten abhalten; wenn es ein einziger Schild ist, müsste er den vierfachen Venusdurchmesser haben), und Wasser auf den Planeten bringen sollen (z.B. indem man viele wasserhaltige Kometen auf den Planeten abstürzen lässt oder – wie Robert Zubrin 1991 meinte – indem man einen saturnmond aus der Bahn wirft und seine Fragmente auf die Venus wirft). Im Wesentlichen handelt es sich um eine Rückversetzung des Planeten in seinen früheren lebensfreundlichen Zustand.

Zum **Abbau von Bodenschätzen auf Asteroiden** wird vorgeschlagen, diese zuvor in eine Venusumlaufbahn und dort zu bearbeiten (das wäre nicht so gefährlich wie sie in eine Erdumlaufbahn zu bringen).

## 1.8. Mars

**Mars** (*Roter Planet*, griech. *Ares* oder *Pyroeis*, der Feurige; germ. *Ziu=Tyr=Taiwaz* / *\*Deiwos*, kelt. *Teutates*, für den Opfer ertränkt werden, indisch *Mangala*, bab. *Nergal*, assyr. *Dir* oder *Zal-Bat-a-nu* (*Salbatanu*) nbekannte Bedeutung, sumerisch *Gugulanna*, *A.PIN* und *LACH.MU* der Zerstörung bringt, äg. *Hor-descheru* (Heru-deshet) = Roter Horus, Stern des *Re*, chin. 火星 (*Huǒxīng*) Feuerstern = jap. *Kasei* = viet. *Sao Hoa*; altchin. *Ying-huo* = jap. *Keiwaku* = viet. *Huynh Hoac*);<sup>34</sup> vgl. März, Mardi, Tuesday, Dienstag, Symbol ♂ (Schild & Speer vom Kriegsgott Ares).



**Gr. Halbachse:** 1,524 AU (Perihel 1,381; Aphel 1,666, Exzentrizität 0,09), Erdentfernung 55–401 Mio. km; 3–22 (12,5) Lichtmin. Inklination 1,85°.

**Umlaufzeit:** siderisch 687d (22,5 Monate; 1,9a), synodisch 780d (25,5 Monate; 2,1a); 24 km/s.

**Rotation** 24 h 37 min 22 s (siderischer Tag), 24 h 40 min (Sol = Sonnentag 24,623 h), Achsenneigung 25,2°.

**Größe:** Ø 6679 Km (52% = ½ Erde), Oberfläche so groß wie die Landfläche der Erde; 3.5–25"; in Opposition -1,4 – -2,91 mag; in oberer Konjunktion 1,84; Albedo 0,25

**Masse:** 6•10<sup>23</sup> kg, Dichte 3933 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft: 1/3g (0,38% Erdschwerkraft), Fluchtgeschwindigkeit 3,69 km/s.

**Atmosphäre:** 0,006 bar (weniger als 1/100 des Drucks auf der Erde)

95,32% Kohlenstoffdioxid 2,7% Stickstoff, 1,6% Argon, 1.300 ppm Sauerstoff, 800 ppm Kohlenstoffmonoxid, 210 ppm Wasserdampf. Farbe der Atmosphäre bei Auf- und Untergang der Sonne ist rötlich, in Sonnennähe ist sie dabei blau (umgekehrt wie auf der Erde).

**Temperatur:** -133° bis +27° (30° am Subsolanen Punkt), Durchschnitt -55°. Gleichgewichtstemperatur -50°. Winter im Norden sind warm und kurz (da Mars im Nordwinter das extrem sonnennähere Perihel erreicht), im Süden kalt und lang (da Mars im Südwinter das Aphel erreicht).

**Magnetfeld:** regional max. 220 Nanotesla (½ % Erdmagnetfeld); siehe auch Fußnote 6.

**Topologie:** Nullpunkthöhe: Die Höhe, auf welcher der durchschnittliche Luftdruck 6.105 Millibar beträgt (auf tieferen Höhenlagen kann flüssiges Wasser auftreten, auf höheren nicht);

Nullmeridian: *Sinus Meridiani* = Terra Meridiani; ein westlicher Teil davon ist das Planum Meridiani, wo Opportunity landete.

Genauer geht der Nullmeridian durch den Krater Airy, noch genauer durch den Krater *Airy-0*.

Südlich vom Äquator eher bergige Gegend, nördlich eher flach.

Jahreszeitlich variable Polkappen: im Norden Wassereis + 1 m Trockeneis; im Süden Wassereis + 8 m Trockeneis.

größter Berg Olympus. 22 Km. größte Tiefebene Hellas Planitia 9 km tief. nördlich davon die Syrtis Maior: größtes Dunkelgebiet, *Dunkelste Stelle*:<sup>35</sup> *Syrtis Maior* (1500 km), Christiaan Huygens entdeckte sie 1659 und bestimmte damit die Rotationsperiode von 24,5 h. Dies war die erste Entdeckung einer Albedo-Besonderheit („albedo feature“) auf einem anderen Planeten.

Arcadia Planitia	Mare Acidalium <sup>36</sup>	Arabia Terra <sup>37</sup>	Utopia Planitia
Amazonis Planitia	Chryse Planitia		Elysium Planitia
Olympus M. - Tharsis Montes <sup>38</sup> – Valles Marineris – Margaritifer Sinus – S. Meridiani – Syrtis Major – Isidis Planitia <sup>39</sup>			
= Nix Olympic	Mare Erythraeum S. Sabaeus Mare Tyrrhenum M. Cimmerium		
	Argyre Planitia	Noachis Terra	Hellas Planitia

**Kuriosa:** Marsgesicht/Pyramiden/Stadt in Cydonia Mensae zwischen M. Acidalium und Arabia (entdeckt 1976 von Orbiter Viking 1),

Marsgesicht in Nili Fossae, einem Grabensystem am Rand der Isidis Planitia (2015 zu sehen auf Bildern vom Orbiter Mars Express).

Marskanäle (Angelo Secchi 1858, Giovanni Schiaparelli, 1877: Canali=Rinnen; Percival Lowell & Camille Flammarion: Kanäle; 80a Forschungsthema); jahreszeitliche Verfärbungen = Vegetation (Rotfärbung als Vegetation: Camille Flammarion 1873).

<sup>34</sup> „Malacandra“ bei Clive Staples Lewis, „Barsoom“ bei Edgar Rice Burroughs.

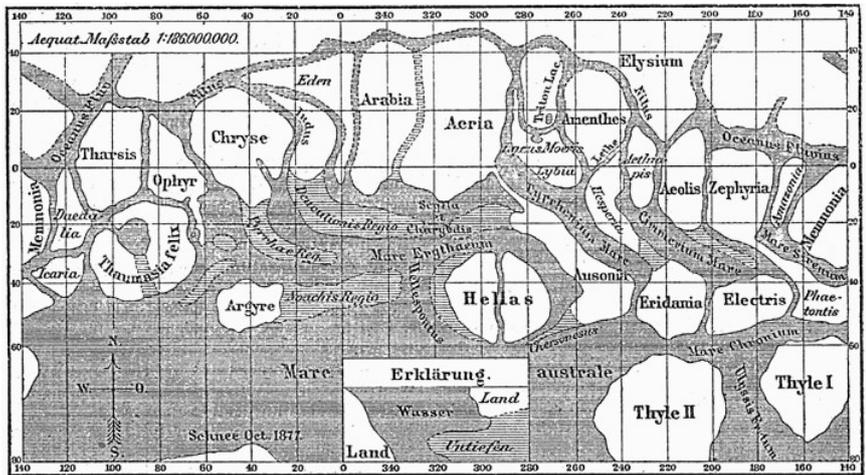
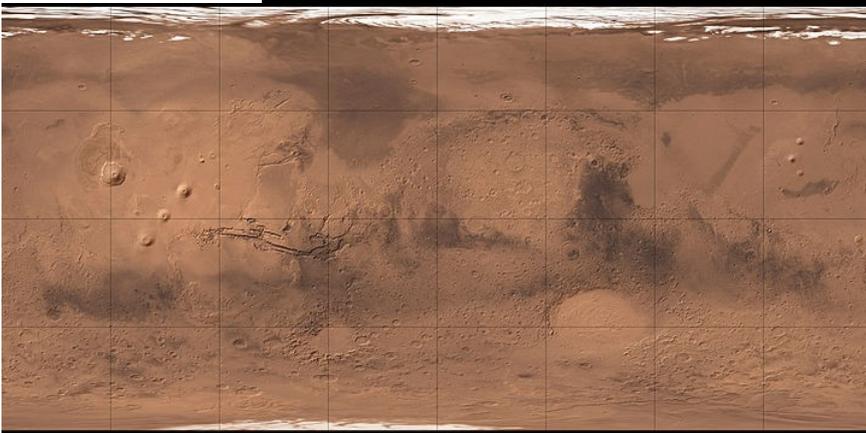
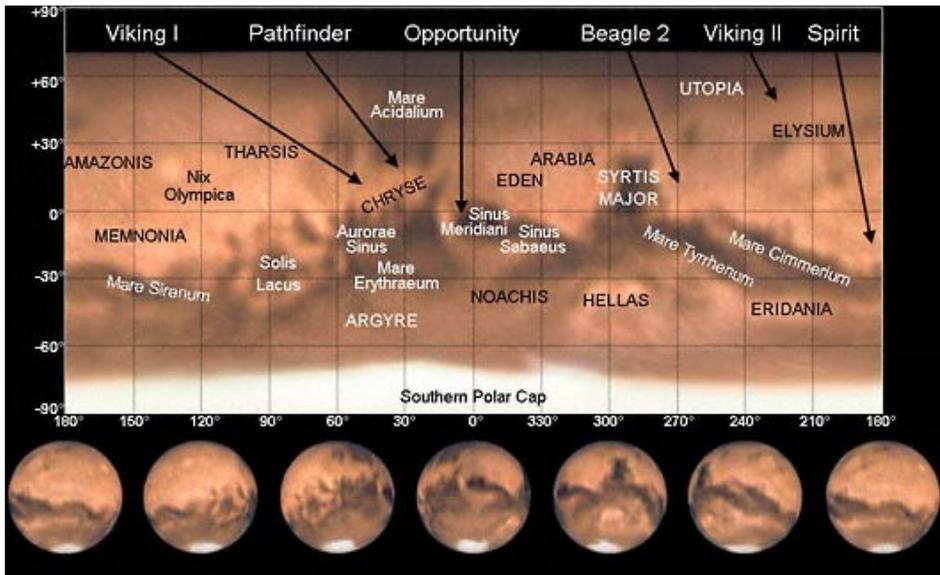
<sup>35</sup> Dunkle Oberflächenmerkmale wurden einst für Meere gehalten, sie bekamen Namen wie *Mare Erythraeum*, *Mare Sirenum* oder *Aurorae Sinus*, die heute unüblich sind.

<sup>36</sup> Dunkelgebiet im Norden, auch *Acidalia Planitia*; östlich von dieser Hochland und Kratergebiet *Cydonia Mensae* mit Marsgesicht und Marspyramiden (Inkastadt).

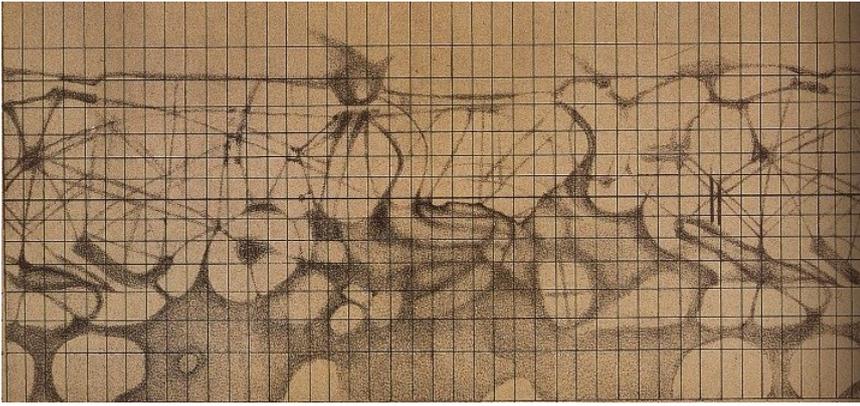
<sup>37</sup> 6000 km, helles Gebiet; über der Region sind erhöhte Gehalte an Wasserdampf nachgewiesen; es scheint sich unter der sandigen Oberfläche eine größere Mengen Wasser in Form von Eis zu befinden.

<sup>38</sup> Drei Schildvulkane plus das Valles marineris Grabensystem 7 km tief von Südwest nach Nordost.

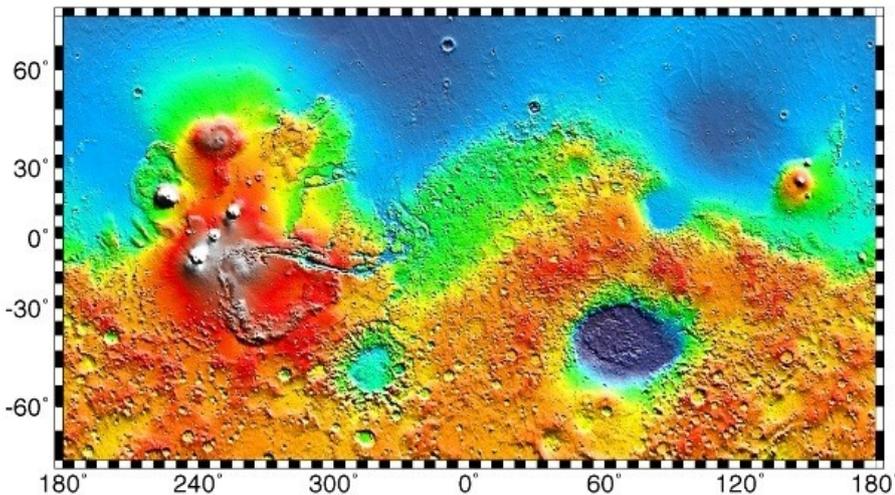
<sup>39</sup> Das Grabensystem *Nili Fossae* (Nilgraben) nordöstlich der Vulkanregion *Syrtis Major* und nordwestlich des *Isidis Planitia* - Impaktbeckens zeigt ein weiteres Marsgesicht und man fand Hinweise auf dort vorkommendes Methan.



Karte von Giovanni Schiaparelli mit Marskanälen



Karte der Marskanäle (Giovanni Schiaparelli 1877)



**Astronomie vom Mars aus:** *Erde & Mond* max. Elongation 47.4°; Entfernung voneinander 3,5-17'; -2.5 mag bzw. +0.9 mag; *Venus*: -3,2 mag; *Sonne*: 5/8 ihrer Größe; 40% ihres Lichts (wie an einem leicht bewölkten Nachmittag), -27,1 mag.

**Marsmonde (2):** Phobos + Deimos:<sup>40</sup>

**Phobos:** entdeckt am 18. August 1877 von Asaph Hall

**Gr. Halbachse** 9378 km (9236–9519), kreist < 6000 km über der Oberfläche (-1,8m/Jh: Absturz in 50 Mill J. oder Ringzerfall), Inklination 1,1°, nördlich und südlich von Breitengrad 70.4° nicht sichtbar.

**Umlaufzeit:** siderisch 7h 40m (< Marstag, daher Aufgang W, Untergang O), scheinbar 11h 6min (2–3 mal Aufgang / Tag); 2 km/s.

**Rotation:** gebunden, Achsenneigung 0°.

**Größe:** Ø 26,8×22,4×18,4 km (22,5), Oberfläche 6350 km<sup>2</sup> (2/3 Cyprien), von Erde aus 11,3 – 14,8 mag; H = 11,8; Albedo 0,07; vom Mars -9 mag & 1/3 Vollmond.; bewirkt partielle (50%), nie totale Sonnenfinsternisse; Mond- und Sonnenfinsternisse sehr häufig

**Masse:** 10<sup>16</sup> kg, Dichte 1887 kg/m<sup>3</sup>, Fallbeschleunigung 6 mm/s<sup>2</sup>, 1. Kosmische Geschw. 29 km/h, Fluchtgeschwindigkeit 40,4 km/h.

**Atmosphäre:** Gasausbrüche beobachtet: Ausscheidungen von Wasser-Dampf?

**Temperatur:** -110 – -5°

**Topologie:** Stickney-Krater (9km) Mitte Westrand auf marszugewandter Seite; Phobos-Monolith (Fels weiß haushoch langer Schatten)

**Mars vom Phobos aus:** 6.400 mal größer und 2.500 mal heller als der Vollmond von der Erde aus, 42°-Kugel (1/4 des Himmels)



**Deimos:** entdeckt am 12. August 1877 von Asaph Hall

**Gr. Halbachse** 23.459 km (23.451–23.467), Inklination 0,9°, nördlich/südlich von Breitengrad 82,7° nicht sichtbar.

**Umlaufzeit:** siderisch 30h, scheinbar 131h/5,44d (braucht von Aufgang im W bis Untergang im O 2,7d); 1,4 km/s.

**Rotation:** gebunden, Achsenneigung 0°.



<sup>40</sup> Der erste, der Monde um den Mars vermutete (und zwar zwei), war 1610 Johannes Kepler. Beim Versuch, das Anagramm von Galileo in Bezug auf Saturns Ringe zu lösen, dachte Kepler, daß Galileo statt dessen zwei Marsmonde entdeckt hatte. 1643 behauptete der Kapuzinermönch Anton Maria Shyrl, er habe Marsmonde gesehen. Mit damaligen Teleskopen ist das unmöglich – er sah wohl neben Mars Sterne. 1727 schrieb Jonathan Swift in „Gullivers Reisen“ über zwei Monde, die den Mars umkreisen, die den Lilliputanischen Astronomen bekannt seien. Ihre Umlaufzeiten seien 10 und 21,5 Stunden. Diese „Monde“ wurden 1750 von Voltaire in seinen Roman „Micromegas“ übernommen, der von der Geschichte eines Riesen vom Sirius handelt, der unser Sonnensystem besucht. 1747 behauptete der deutsche Hauptmann Kindermann, er haben einen Marsmond am 10. Juli 1744 gesehen mit einer Umlaufzeit von 59 Stunden 50 Minuten und sechs Sekunden (!) 1877 entdeckte schließlich Asaph Hall Phobos und Deimos, die beiden kleinen Monde des Mars. Ihrer Umlaufzeiten liegen bei 7 Stunden 39 Minuten und 30 Stunden 18 Minuten, ziemlich nahe an den Zeiten, die Jonathan Swift 150 Jahre vorher geraten hatte.

**Größe:** Ø 15 × 12,2 × 10,4 km (12,5), Oberfläche 495 km<sup>2</sup> (> Samos), von Erde aus 12,4 – 15,7 mag; H = 12,89; Albedo 0,07; vom Mars -5 mag & 2× Venus; sternartig 2, ; bewirkt Sonnentransits; diese und Mondfinsternisse sehr häufig.

**Masse:** 7•10<sup>15</sup> kg, Dichte 1471 kg/m<sup>3</sup>, Fallbeschleunigung 3 mm/s<sup>2</sup>, 1. kosische Geschw. 16 km/h, Fluchtgeschwindigkeit 22,2 km/h.

**Temperatur:** -40°

**Topologie:** Krater Swift und Voltaire (einzig benannte Oberflächenstrukturen)

**Mars vom Deimos aus:** 1.000 mal größer und 400 mal heller als der Vollmond von der Erde aus; 16,5° Kugel (1/11 des Himmels).

**Marstrojaner:** Als erster Mars-Trojaner wurde **(5261) Eureka** (2 km Durchmesser, größter Marstrojaner) am 20. Juni 1990 von David Levy und Henry Holt entdeckt. Er liegt in L5 (nachfolgender Trojaner). Im Januar 2015 hat das Minor Planet Center vier Mars-Trojaner gelistet, ein Vorseilender und drei Nachfolgende; anderswo liest man von 6 Nachfolgenden und einem siebten Kandidaten.

#### Marsmissionen:

**Mariner 4** (15. Juli 1965, USA): Vorbeiflug in 9846 km Entfernung mit ersten Bildern vom Mars aus der Nähe.

**Mariner 6** (31. Juli 1969, USA): Vorbeiflug in 3431 km Entfernung.

**Mariner 7** (5. August 1969, USA): Vorbeiflug in 3430 km Entfernung, erste Fotos von Phobos.

**Mars 2** (1971, UdSSR): Orbiter u. Lander; der Orbiter erreicht den Orbit, der Lander zerschellt.

**Mars 3** (2. Dezember 1971, UdSSR): erste weiche Landung, Lander verstummt aber 20 Sek nach der Landung.

**Mariner 9** (14. November 1971, USA): schwenkt in den Orbit ein; erster künstliche Satellit um Mars.

**Mars 4** (10. Februar 1974, UdSSR): Vorbeiflug in 2200 km Entfernung.

**Mars 5** (12. Februar 1974, UdSSR): schwenkt in den Orbit ein.

**Mars 6** (12. März 1974, UdSSR): harte Landung.

**Viking 1** (20. Juli 1976, USA): Orbiter & Lander. Weiche Landung. Orbiter arbeitet bis 7. August 1980, Lander bis Nov. 1982, dieser sandte die ersten Bilder von der Marsoberfläche zu Erde.

**Viking 2** (4. Sept. 1976, USA): Orbiter & Lander. Weiche Landung. Orbiter arbeitet bis 27. Juli 1978, Lander bis 11. April 1980.

**Fobos 2** (29. Januar 1989, UdSSR): schwenkt in Orbit ein, Bild von Phobos (letzte planetare Mission der UdSSR).

**Mars Global Surveyor** (1999-2006, USA): Erste Orbitermission mit Detailaufnahmen vom Mars.

**Mars Pathfinder** (4. Juli – 27. Sept. 1994, USA): erste Rovermission mit dem Marsrover **Sojourner**

**2001 Mars Odyssey** (seit 24. Okt. 2001, USA): Orbitermission

**Mars Express** mit Lander **Beagle 2** (seit 25. Dezember 2003, ESA): Orbitermission; zu Beagle 2 brach Kontakt vor der Landung ab.<sup>41</sup>

**Mars Exploration Rover A (Spirit)** (4. Januar 2004 – 22. März 2010): Rovermission.

**Mars Exploration Rover A (Opportunity)** (25. Januar 2004) – 10. Juni 2018): Rovermission.

**Rosetta** (25. Februar 2007, ESA): Vorbeiflug in 250 km Entfernung auf dem Weg zum Kometen Tschuri.

**Mars Reconnaissance Orbiter (MRO)** (seit 10. März 2006, USA): Orbitermission

**Phoenix** (25. Mai – 2. November 2008, USA): Lander in der Nähe des Nordpols.

**Dawn** (17. Februar 2009, USA): Vorbeiflug in 543 m Entfernung auf dem Weg zu den Asteroiden Vesta und Ceres.

**Curiosity** (seit 6. August 2012, USA): Rovermission.

**Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN)** (seit 22. Sep. 2014, USA): Tiefflüge durch die Atmosphäre.

**Mars Orbiter Mission (MOM)** (seit 24. Sept. 2014, Indien): Orbitermission

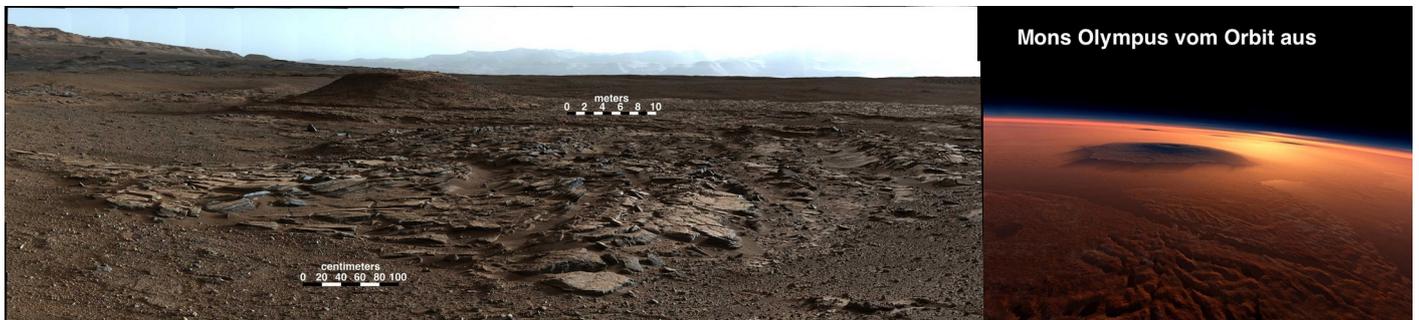
**ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO)** (seit 19. Okt. 2016, Europa): untersucht Mars-Atmosphäre, Schiaparelli-Lander geht verloren.

**InSight** (seit 26. Nov. 2018, USA): stationäre Untersuchung des Marsbodens (mit Bohrung).

**Al-Amal** („die Hoffnung“, Vereinigte Arabische Emirate, Start 19. Juli 2020, Orbit 9. Febr. 2021), Nahaufnahmen des Mondes Deimos.

**Mars 2020** (18. Februar 2021, USA): Rover *Perseverance*, Helikopter *Ingenuity*, 5. Rover- und 1. Helikopter-Mission (19.04.2021).

**Tianwen-1** („Himmelsfrage“, China: Start 23. Juli 2020, Orbit 10. Febr. 2021, Landung 14. Mai 2021): Rover Zhurong (Feuergott).



Marslandschaft, Aufgenommen von Curiosity 4. April 2014

Blick auf Mt. Sharp = Aeolis Mons im Gale Krater nördlich von Mare („Terra“) Kimmerium

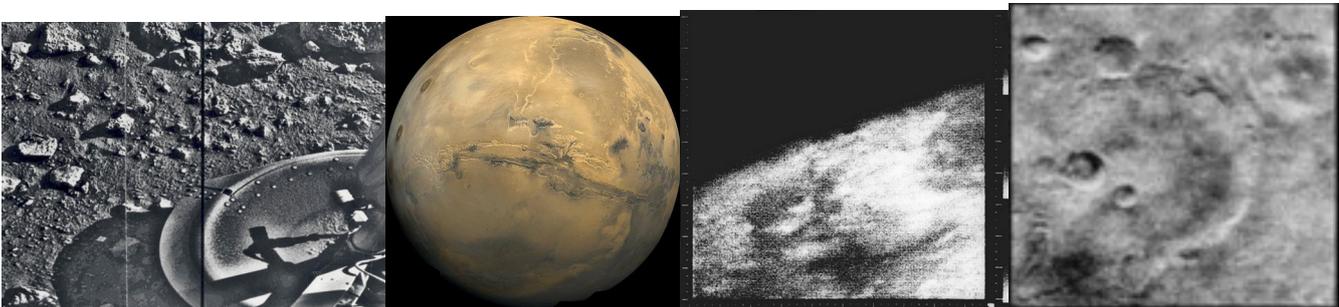
<sup>41</sup> Im Januar 2015 auf Aufnahmen des MRO vom 29. Juni 2014 die Landestelle von Beagle 2 schließlich an der Position 11,5° Nord und 90,4° Ost ausfindig gemacht werden.[1] Die Aufnahmen zeigen die offensichtlich weich gelandete Sonde, deren Solarpanele zumindest zum Teil geöffnet sind.[3][4] In der näheren Umgebung konnten auch der Fallschirm und eine abgeworfene Abdeckung identifiziert werden. Die Ursachen für den Kontaktverlust sind bis heute nicht eindeutig aufgeklärt.



Bild von Sojourner (Pathfinder) (1994)



Panoramabild von Viking 1

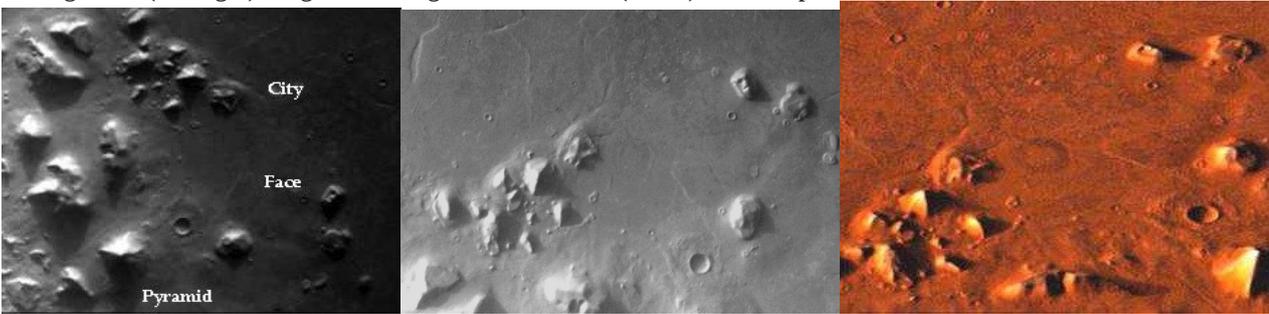


erstes Bild von Viking 1 (1976) Bild vom Viking 1 Orbiter Bilder von Mariner 4 (1965): erstes Bild + bestes Bild

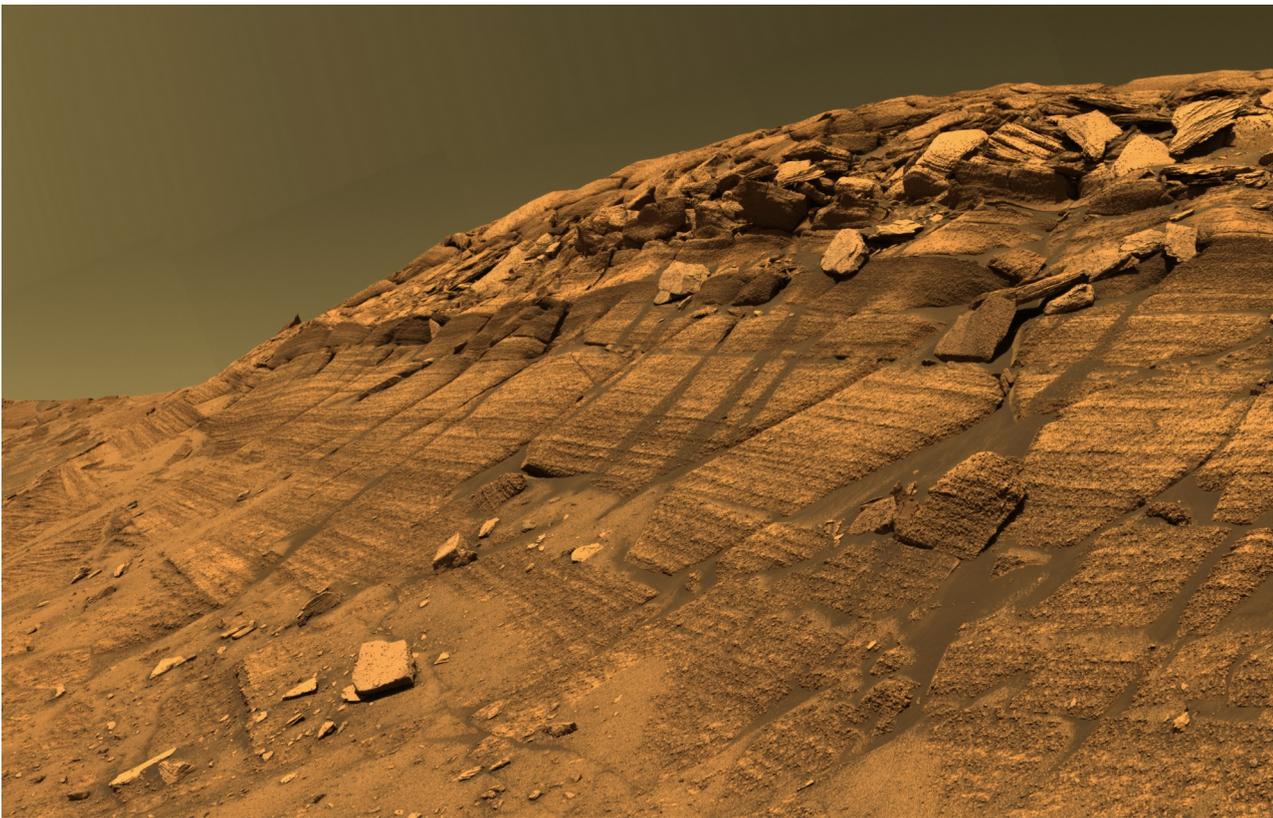
Moderne Pseudo-Wissenschaft:



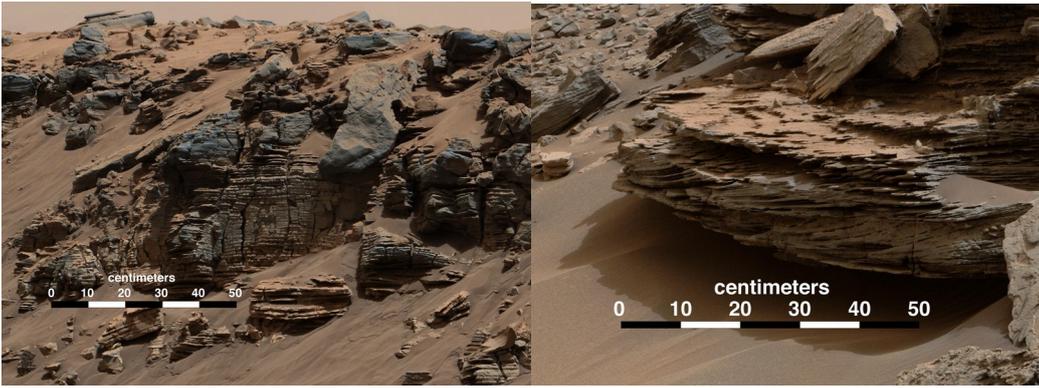
Marsgesicht (Viking 1) Vergleich Marsgesicht-Schwund (MRO) Marx Express 2014



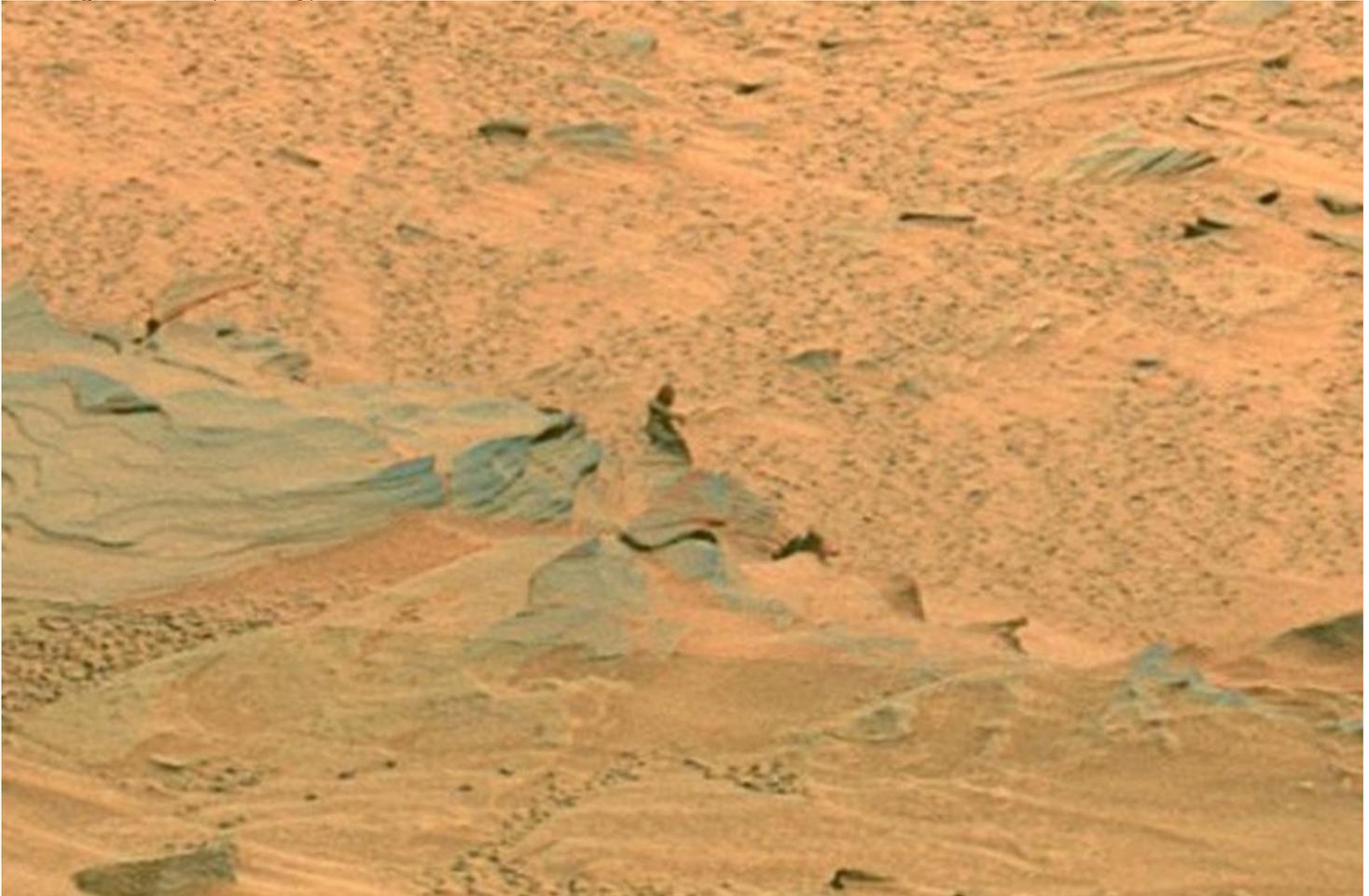
Umgebung des Marsgesichts in Cydonia: „Pyramiden“ und „Stadt“.



Aufnahme des Burns-Kliffs im Encurance-Krater im Meridiani Planum durch Rover Opportunity.



ehemaliger Marssee (Curiosity)



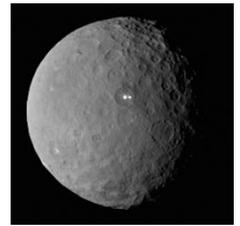
Die „Marsfrau“



Sonnenuntergang auf dem Mars mit anderer Farbe wie auf der Erde: Statt des irdischen Abendrots gibt es auf dem Mars ein Abendblau. Aufnahme vom Marsrover Curiosity am 15. April 2015.

## 1.9. Ceres und der Asteroiden-Hauptgürtel zwischen Mars und Jupiter

Zwergplanet (1)**Ceres** (Göttin des Ackerbaus, griech. Demeter). Aufgrund der Titius-Bodeschen Reihe (1766) wurde zwischen Mars und Jupiter die Existenz eines bislang unbekanntes Planeten vorhergesagt bei 419 million km (2.8 AU), als Name wurde *Phaeton* vorgeschlagen (siehe dort). Entdeckt wurde ein entsprechendes Objekt von Giuseppe Piazzi in Palermo/Sizilien in der Neujahrsnacht am 1. Januar 1801 als erster Kleinplanet, aber nicht Phaeton, sondern Ceres genannt; er ist der größte Körper im Asteroiden-(Haupt)gürtel zwischen Mars und Jupiter, wurde von 1801 bis ca. 1850 als achter Planet betrachtet,<sup>42</sup> dann als Kleinplanet (Planetoid, Asteroid), gilt seit dem 13. September 2006 als Zwergplanet.



Er hieß zunächst *Ceres Ferdinandea* (nach der Göttin Ceres, der Patronin Siziliens, und König Ferdinand IV von Neapel, der sich zur Zeit der Entdeckung in Palermo aufhielt), der Zusatz *Ferdinandea* wurde dann aber gestrichen. Das 1803 entdeckte Element *Cer* wurde nach Ceres benannt. Symbol ♁ (Sense).

**Gr. Halbachse** 414 Millionen km (2,767 AU; Perihel 2,546; Aphel 2.987, Exzentrizität 0,0796), Entfernung von der Erde bei Opposition 1,56 bis 2 AU, Inklination 10,6°.

**Umlaufzeit** siderisch 4,602 Jahre (1681.63d), synodisch: 1,278 Jahre (466,6 Tage, ca. 1 Jahr 3 Monate); 17,909 km/s.

**Rotation** 9h 4m 30s; Achsenneigung 3°.

**Größe** Ø 942 km (975 Äquator, 909 Pol), Fläche 2,85 Mill km<sup>2</sup> (vgl. Argentinien und Indien), 0.339"–0.854", 6,64–9,34 mag; H = 3,36; Albedo 0,09.

**Masse** 9•10<sup>20</sup> kg (1/3 der Masse des Asteroidengürtels; 4% Mondmasse), Dichte 2077 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,27 km/s<sup>2</sup> (9/35 Erdschwerkraft, 2,75%), Fluchtgeschwindigkeit 0,51 km/s.

**Atmosphäre** scheint eine Atmosphäre zu haben (Wasserdampf, es strömen von zwei Stellen aus 6 kg Wasser pro Sekunde ins All, wie 2014 entdeckt wurde – der erste Nachweis von Wasser im Asteroidengürtel).

**Temperatur** Durchschnitt -105°, maximal -38°; **Spektraltyp** C.

**Topologie:** dunkle kohlenstoffreiche Oberfläche, großer dunkler Fleck „Piazzi“ 250 km; weißer Fleck 400 km. Sog. **Ceres-Lichter** (extrem helle Flecken) z.B. im Okkator-Krater. Pyramidenartiger Berg mit Steifenmuster an den Abhängen.

**Wasser:** Ceres scheint eine große Menge Wasser (in Form von Wassereis und darunter vielleicht in Form eines flüssigen Ozeans) zu enthalten (100 km Eispanzer: ¼ der Masse und ½ des Volumens von Ceres): der Zwergplanet ist könnte neben der Erde das größte Wasserreservoir des inneren Sonnensystems sein und hat womöglich mehr Frischwasser als ie Erde. „Kleinplanet mit dem Wasserreservoir“ genannt, weil von zwei Stellen aus insgesamt 6 kg Wasser pro Sekunde ins All strömen, vielleicht durch Kryovulkane.

**Sonstiges:** Von Ceres ist im Gegensatz zu Vesta kein Meteorit auf die Erde gelangt, daher kamen die ersten genaueren Erkenntnisse über seine Oberfläche von der Raumsonde Dawn, die im März 2015 um einen Orbit um Ceres einschwenkte, diese entdeckte auf ihm die genannten mysteriösen sehr hellen weiße Flecken (ca. 130 „Ceres-Lichter“), wahrscheinlich Schichten von Wassereis mit Salz, die auch die Wasserdampf-Atmosphäre erklären könnten, die den Asteroiden kometen-ähnlich erscheinen lässt.

Hauptgürtel-Asteroid (2)**Pallas** (griech. „kräftige Jungfrau“, Beiname der Stadtgöttin Pallas Athene, Göttin der Weisheit und Kriegskunst, den sie sich beilegte, nachdem sie die Göttin Pallas, Tochter des Triton, im Zweikampf getötet hatte); entdeckt von Heinrich Wilhelm Olbers am 28. März 1802; größter Asteroid und zweitgrößter Himmelskörper im Asteroiden-Hauptgürtel nach Zwergplanet Ceres, wird aber an Masse und Helligkeit von Vesta übertroffen. Prototyp der Pallas-Familie im Asteroiden-Hauptgürtel mit über 10 Mitgliedern. Das 1803 entdeckte chemische Element Palladium wurde nach Pallas benannt. Symbol: ♁ (Handspiegel oder Schild der Athene).

**Gr. Halbachse** 415 Mill. km (2,772 AU; Perihel 2,123; Aphel 3,413, Exzentrizität 0,2310), Inklination 34,84°.

**Umlaufzeit** siderisch 4,62 Jahre (4 Jahre 225 Tage) mit 17,6 km/s (nahezu 1:1 - Orbitalresonanz mit Ceres).

**Rotation** 7.8h (0,326d) Achsenneigung 78 ± 13° oder 65±12°.

**Größe** 582×556×500 (geom Mittel: 544) km,<sup>43</sup> Fläche 936.559 km<sup>2</sup> (vgl. Ägypten 995.000 km<sup>2</sup>), min. Helligkeit 10,6 mag, mittlere Oppositions-Helligkeit 8 mag, maximale = 6,49 mag (nach Vesta zweithellster Asteroid), H = 4,1; Albedo 0,159.

**Masse** 2•10<sup>20</sup> kg (22% Ceres, 0,3% Mond), Dichte 2760 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,18 m/s<sup>2</sup> (1,8% Erdschwerkraft), Fluchtgeschwindigkeit 0,32 km/s.

**Atmosphäre** scheint eine Atmosphäre zu haben (Wasserdampf, es strömen von zwei Stellen aus 6 kg Wasser pro Sekunde ins All, wie 2014 entdeckt wurde – der erste Nachweis von Wasser im Asteroidengürtel).

**Temperatur** Durchschnitt -109°, maximal -8°; **Spektraltyp** B.

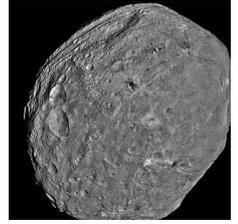
**Satellit?** Während der Okkultation am 29. Mai 1979 wurde über die Entdeckung eines 1 km großen Satelliten berichtet, was nicht bestätigt werden konnte. 1980 deutete Speckle Interferometrie die Existenz eines 175 km großen Satelliten an, was widerlegt wurde.

**Sonde:** Wegen der großen Exzentrizität ist Pallas nicht ohne großen Aufwand durch eine Sonde erreichbar.

<sup>42</sup> Zu den ursprünglich sechs Planeten (Erde + fünf Himmelskörper) kam 1781 der von Wilhelm Herschel entdeckte Uranus als siebter Planet hinzu. Mit der 1800 ge gründeten Himmelspolizey fahndete man nach dem vermuteten „achten“ Planeten zwischen Mars und Jupiter. Mit Ceres (entdeckt 1801) erhöhte sich die Zahl der Planeten in der Tat auf acht, dann mit Pallas (1802) auf neun (nach einem Vorschlag Herschels 1802 wurden die neuentdeckten Planeten auch „Asteroiden“ genannt), nach der Entdeckung von Juno (1804) und Vesta (1807) erhöhte sich die Zahl der „Planeten“ bis 1807 auf elf. Dabei blieb es bis 1845. Dann wurde mit (5) Astraea der fünfte Asteroid entdeckt, und auch dieser zunächst als Planet geführt. Nach der Entdeckung des „echten“ Planeten Neptun im Jahr 1846 galten sogar 13 Himmelskörper als Planeten. Da sich aber ab 1847 die Neuentdeckungen von Asteroiden häuften, wurden diese fortan von den „großen Planeten“ unterschieden, deren Zahl dadurch auf die acht heutigen sank. 1851 schlug Alexander von Humboldt für diese Himmelsobjekte den Namen „Asteroiden“ vor. Von 1930 an (nach Plutos Entdeckung) hatte man wieder (wie 1802) neun Planeten, nach dessen Zurückstufung zum Zwergplanet 2006 wieder acht.

<sup>43</sup> Die Zahl in Klammern ist hier nicht das arithmetische Mittel (546), sondern das geometrische der drei Längen: die Seitenlänge eines Würfels, der dasselbe Volumen hat wie der Quader mit den drei Längen als Seitenlängen.

Hauptgürtel-Asteroid (4)**Vesta** (griech. Hestia, Göttin des Herdfeuers); entdeckt von Heinrich Wilhelm Olbers am 29. März 1807; felsiger Protoplanet mit differenziertem Inneren (Eisen-Nickel-Kern, Mantel, Kruste), durch diese Ähnlichkeit mit den terrestrischen Planeten unterscheidet sich Vesta von allen anderen Asteroiden des Hauptgürtels; Vesta ist der zweitgrößte Asteroid im Asteroidengürtel (fast gleich groß wie Pallas, welcher der größte ist) und das drittgrößte Objekt im Asteroidengürtel (nach Zwergplanet Ceres und Asteroid Pallas), aber Vesta hat unter allen Asteroiden die größte Masse und (unter allen Objekten im Asteroidengürtel) die größte Helligkeit.



Prototyp der Vesta-Familie im Asteroiden-Hauptgürtel: der V-Typ Asteroiden<sup>44</sup> oder Vestoiden (6% aller Asteroiden des Hauptgürtels), vermutlich herausgeschlagen durch einen Impakt an Vestas Südpol (Rheasilvia-Krater 505 km, 90% Vesta-Durchmesser, einer der größten Krater des Sonnensystems).<sup>45</sup>

Viele Meteoriten (achondritische HED-Meteoriten)<sup>46</sup> auf der Erde stammen von Vesta. Die Sonde Dawn umkreiste Vesta von 16.07.2011 bis zum 05.09.2012.

Symbol: ♃ (brennender Herd).

**Gr. Halbachse** 2,3619 AU (Perihel 2,1526, Aphel 2,5712 AU, Exzentrizität 0,0886), Inklination 7,1°.

**Umlaufzeit** siderisch 3,36 Jahre (3a 230d) mit 19,34 km/s, synodisch 504 Tage.

**Rotation** 0,2226 d 5.342h.

**Größe** 573×557×446 (geom. Mittel 525) km, Fläche 876.001 km<sup>2</sup> (vgl. Pakistan 875.000 km<sup>2</sup>), 5,20–8,48 mag, H = 3,20, Albedo 0,42.

**Masse** 3 • 10<sup>20</sup> kg, (9% des Asteroiden-Hauptgürtels), Dichte 3456 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0.24 m/s<sup>2</sup>, Fluchtgeschwindigkeit 0,36 km/s.

**Temperatur:** -188 – -3°.

**Spektralklasse:** V Aus der großen Dichte wird auf einen Eisen-Nickel-Kern geschlossen.

**Topologie:** Der Meridian wurde von der Internationalen Astronomischen Union (IAU) 1997 auf der Basis von Fotos des Weltraumteleskops Hubble etabliert, wo der Meridian durch das Zentrum der Olbers Region geht (200 km große dunkle Albedo-Region). Aufgrund der Bildern der Raumsonde Dawn (2011/12) war die Olbers Region keine unterscheidbare Region mehr, und so wurde zur Definition das Zentrum des kleinen, aber scharf hervorstechenden Claudia Kraters (700 m) benutzt; dieser sollte auf 4° West liegen. Diese wurde aber von der IAU nicht anerkannt, diese setzte das Zentrum des Claudia-Kraters (nach der römischen Vestalin Claudia) auf 146° West, wodurch dann der Meridian weiterhin in der Olbers Region liegt.

Rheasilvia-Krater (nach der Vestalin Rhea Sylvia, Mutter der Rom-Gründer Romulus und Remus): 505 km, 90% Vesta-Durchmesser, einer der größten Krater des Sonnensystems; Dieser Krater hat eine Tiefe von 8 km, seine Wälle sind zusätzlich zwischen 8 km und 14 km hoch, und in seiner Mitte ragt ein Zentralberg 22 km hoch auf und ist der größte bekannte Berg des Sonnensystems.

Hauptgürtel-Asteroid (3)**Juno** (griech. Hera, höchste Göttin, Gattin des höchsten Gottes Zeus), entdeckt von Karl Ludwig Harding an der Sternwarte Linienthal / Bremen am 1. September 1804, zehntgrößter Asteroid, größter der kleinen Juno-Familie, möglicher

<sup>44</sup> moderat hell wie S-Typ, aber mit größerem Anteil an Pyroxenen.

<sup>45</sup> Dazu kommen J-Typ Asteroiden (vermutlich aus tieferen Schichten von Vesta), siehe Fußnote 46.

<sup>46</sup> **Chondriten** (86% aller Meteoriten) sind Steinmeteorite, die Chondren/Chondrulen (eingeschlossene Silikat Körnchen) enthalten, sie sind das älteste Material im Sonnensystem, es entsteht aus Vorgängermaterial durch Erhitzung auf 1900° innerhalb von Minuten, wodurch das Material schmilzt, und anschließender Abkühlung innerhalb von Stunden (als Energiequelle werden Akkretionsschocks bei der Bildung der Proto-Gasplaneten vermutet). Die sog. *Gewöhnlichen Chondriten* existieren in drei Haupttypen: *H-Chondriten* (H für High Iron Abundance, auch Bronziten, 40% aller Meteoriten), wahrscheinlich von (6)Hebe stammend; *L-Chondriten* (L für Low Iron Abundance, 38%), vielleicht von (433)Eros oder (7)Iris oder (8)Flora stammend, und *LL-Chondriten* (Low Iron, größte Chondrulen, ca. 1 mm; von dieser Art war der Tscheljabinsk-Meteor vom 15. Februar 2013), Herkunfts-Asteroid unbekannt, vielleicht (7)Iris. Den gewöhnlichen Chondriten stehen die *Kohligen Chondriten* gegenüber, die schwarz sind, bis zu 3% Kohlenstoff enthalten in Form von Graphit, Karbonaten und auch organischen Verbindungen, etwa Aminosäuren. Manche enthalten Aluminium/Calcium Einschüsse (ältestes Material im Sonnensystem), manche sogar präsolare Materie (etwa Siliziumkarbid und Nanodiamanten).

*Achondriten* sind steinige Meteorite, die keine (oder nicht viele) Chondren haben. Zwei Drittel der Achondriten stammen von Vesta, andere vom Mars oder vom Mond oder sind unbekannter Herkunft. Die von Vesta kommenden heißen *HED-Meteorite*, weil sie sich einteilen in *Howardite* (nach Chemiker und Meteoriten-Pionier Edward Howard, † 1816: Regolit vom Boden des Asteroiden, Mischung aus Chondriten, Eucriten und Diogeniten, ca. 200), *Eucrite* (griech. eukritos = gut unterscheidbar: entstehen durch Schmelze und Differenzierung von Chondriten aus der Vesta-Kruste, ca. 100 Funde) und *Diogenite* (nach Diogenes von Apollonia, um 425 v. Chr., der die Herkunft der Meteorite aus den Tiefen des Alls postulierte; entstehen in unterirdischen Magmakammern, aus der tiefen Kruste Vestas). Als *J-Typ-Asteroiden* bezeichnet man solche, die vom Spektrum her dem V-Typ ähnlich sind, aber ein besonderes 1 µm Absorptionsband haben, so dass sie besondere Diogenite sind. Zu den Achondriten gehören auch die Aubrige (nach dem Fundort Aubres, Frankreich), die das Mineral Enstatit enthalten; sie scheinen vom Asteroiden (44)Nysa zu kommen.

Zu den Chondriten und Achondriten kommen noch *Eisenmeteoriten* (5% aller Meteoriten), bestehend aus zu über 90% Eisen-Nickel-Legierungen, Benutzung schon vor der Eisenzeit, etwa Dolch Klinge von Pharao Tutanchamun, 1340 v. Chr.; Eisenperlen in einem ägyptischen Gräberfeld von Gerzeh vor 3000 v. Chr.); sie setzen sich vor allem aus dem kubisch raumzentrierten „Balkeneisen“ *Kamacit* mit einem Nickelgehalt von bis zu 7,5% und dem kubisch flächenzentrierten „Bandeisen“ *Taenit* mit einem Nickelgehalt von 27–65% zusammen. Der 1871 entdeckte Barringer-Krater in Arizona (1200 m Durchmesser, 180 m Tiefe, vor 50.000 Jahren) geht auf einen 50m großen 300.000 Tonnen schweren Eisenmeteoriten – da über 10m groß war, war es eigentlich ein Asteroid – zurück (in den Ebenen um den Krater fand man 30 Tonnen meteoritisches Eisen). Man teilt Eisenmeteorite ein in *Oktaedrite* (eine Verwachsung von Kamazit und Taenit, die der Struktur des Oktaeders folgt, poliert man die Oberfläche und ätzt mit Sapetersäure, entstehen sich kreuzende Balken und Bänder: Widmanstättenische Figuren), *Hexaderite* (bestehen vorwiegend aus nickelarmem Kamazit, beim Polieren entstehen parallele Linien: Neumann-Linien) und *Ataxite* (die seltenste Gruppe, ein Fall eines Ataxiten wurde noch nie beobachtet, aber der größte Meteorit der Erde, der 60 Tonnen – Meteorit Hoba aus Namibia, ist ein solcher; Ataxiten zeigen nach Polieren keinerlei Strukturen, bestehen vorwiegend aus Taenit, mit über 16% Nickelgehalt sehr nickelreich). Neben Eisen- und Nickel treten in Spuren andere Elemente auf (Germanium Ge, Gallium Ga, Arsen As, Wolfram W und Gold Au); nach dem Verhältnis dieser Spurenelemente zum Nickel werden die Eisenmeteorite in 13 chemische Gruppen eingeteilt IAB, IC, IIAB, IIC, IID, IIE, IIF, IIIAB, IIICD, IIIE, IVA, IVB, daneben gibt es 15%, die keiner dieser Gruppen angehören. Am optisch attraktivsten ist die IIE-Gruppe (von der Oberfläche von Hebe): breite bis mittlere Oktaedrite mit Silikateinschüssen in Form erstarrter, klarer Tropfen. Vgl. Siegfried Haberers Meteoriten-Internetseite.

Bekannte Einschläge in neuerer Zeit: (1) 10. Februar 1896 in Madrid um 1/210 Uhr morgens, als ein mit baulichem Licht daherziehender und die Sonne überstrahlender Meteor „mit einer Heftigkeit zerplatzte, dass Mauern einstürzten und Fensterscheiben zersprangen“ (Pohle, Die Sternwelten, S. 64/65, Fußnote 2). Die herabfallenden Stücke enthielten Silikate von Magnesium und Eisen mit Aluminium, Nickel und Calcium. (2) 30. Juni 1809 Tunguska-Ereignis; (3) 15.02.2013 Tscheljabinsk-Meteor. Feuerkugeln (Boliden, Aeroithen) können auch intensiv rot oder blauweiß sein; am 8. Februar 1894 beobachtete der irische Astronom Rambdaud eine „Feuerkugel von grünlich metallischer Farbe, ohne Geräusch zerplatzend“.

Ursprung der Chondriten-Meteoriten auf der Erde.

Symbol: ✨ (Pfaue: Symbol der Schönheit, schon in der Antike Begleiter Junos, oder Zepter mit Stern).

**Gr. Halbachse** 2,67 AU (Perihel 1,98, Aphel 3,36 AU, Exzentrizität mit 0,26 extrem, größer als bei Pluto), MOID 16.01.2018 1.0359 AU (154,97 km), Inklination 13,0°.

**Umlaufzeit** 4,36 Jahre (4a 133d) mit 17,9 km/s.

**Rotation** 7,2h, Achsenneigung 50°.

**Größe** von Schröter im Jahre 1811 auf 2290 km völlig überschätzt, in Wirklichkeit 320x267x200 (geom. Mittel 258) km, Fläche 172.021 km<sup>2</sup> (vgl. Großbritannien ohne Nordirland 216.005 km<sup>2</sup>), Oppositionshelligkeit 7,5–8,7 mag, H = 5,3, Albedo 0,24.

**Masse** 3•10<sup>19</sup> kg, (1% Masse des Asteroiden-Hauptgürtels 3% Ceres), Dichte 4200 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,12 m/s<sup>2</sup>, (1,2 % Erde), Fluchtgeschwindigkeit 0,18 km/s.

**Temperatur:** -110 – +28°. **Spektralklasse:** S (hohe Albedo für Steinmeteoriten).

**Besonderes:** Orbit änderte sich 1839 (wohl aufgrund eines Impakts, der nach Art eines Bisses einen 100 km großen Krater erzeugte).

Hauptgürtel-Asteroid (5)**Astraea** (= Dike, Göttin der Gerechtigkeit, verewigt im Sternbild Jungfrau), entdeckt vom Amateur-Astronomen Karl Ludwig Hencke am 8. Dezember 1845 in seinem Privatobservatorium in Driesen (heute Drezdenko, Polen), letzter noch kurzzeitig als Planet geltender Asteroid, vor Entdeckung des Neptun (1846), Namengeber der Astraea-Gruppe,

Symbol: ↑ Gr. Halbachse 2,57 AU (Perihel 2,08, Aphel 3,07, Exzentrizität 0,19), Inklination 5,4°, Umlaufzeit 4,13 Jahre, Rotation 16,8h, Größe 167x123x82 (119) km, 8,74–12,89 mag, H = 6,85, max. Winkeldurchmesser 0,15", Albedo 0,23, Masse 3•10<sup>18</sup> kg, Dichte 3300 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,023 m/s<sup>2</sup>, (0,2 % Erde), Fluchtgeschwindigkeit 0,062 km/s, Temperatur max. -10°, Spektralklasse S.

Hauptgürtel-Asteroid (6)**Hebe** (Göttin der Jugend, Mundschenk der Götter), entdeckt vom Amateur-Astronomen Karl Ludwig Hencke am 1. Juli 1847 in seinem Privatobservatorium in Driesen (heute Drezdenko, Polen), erster Asteroid, der von vornherein nicht als Planet galt. Quelle der H-Chondriten (siehe Fußnote 46) und ebenso der Eisenmeteoriten vom untypischen Typ IIE von der Oberfläche (nicht vom Kern) es Asteroiden; damit ist Hebe Quelle von 40% der Meteoriten. Symbol: ☪ (Becher). Gr. Halbachse 2,43 AU (Perihel 1,93, Aphel 2,92, Exzentrizität 0,21), Inklination 14,6°, Umlaufzeit 3,78 Jahre, Rotation 0,3d, Achenneigung 42°, Größe 195 km, 7,5–11,5 mag, H = 5,71, max. 0,26", Albedo 0,27, Masse 1•10<sup>19</sup> kg, Dichte 3810 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,087 m/s<sup>2</sup>, (0,9 % Erde), Fluchtgeschwindigkeit 0,13 km/s, Temperatur max. -4°, Spektralklasse S.

Die Entdeckung eines Hebe-Mondes („Jebe“) durch eine Okkultation am 5. März 1977 durch Paul D. Maley ist nicht bestätigt worden.

Hauptgürtel-Asteroid (7)**Iris** (Göttin des Regenbogens und Götterbotin, besonders Botin der Hera, Tochter des Meergottes und Poseidon-Vorgängers Taumas und der Wolkennympe Electra, Nympe der bernsteinfarbenen Wolken), entdeckt vom Astronomen John Russell Hind im Privatobservatorium von Goerge Bishop im Regents Park in London am 13. August 1847,

Symbol: ☄ Gr. Halbachse 2,368 AU (Perihel 1,8, Aphel 2,9, Exzentrizität 0,23), kommt Mars auf 0,4 AU nahe, Inklination 5,5°, Umlaufzeit 3a 250d, Rotation 7,1h, Achsenneigung 85°, Größe 209 km, 137.228km<sup>2</sup> (Bangla Desh 130.168), 6,7–11,4 mag, bei Opposition im Mittel 7,8 wie Neptun; in Extremfällen aber 6,7 wie am 21. Oktober 2017; H = 5,5, max. Winkeldurchmesser 0,32", Albedo 0,28, Masse 1•10<sup>19</sup> kg, Dichte 1800 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,109 m/s<sup>2</sup>, (1,1 % Erde), Fluchtgeschwindigkeit 147 m/s, Temperatur -102°, max. 2°, Spektralklasse S silikatreich, sehr helle Oberfläche, vielleicht Gemisch von Nickel-Eisen-Metallen und Magnesium- und Eisen-Silikaten, dürfte zu L- und LL-Chondriten beitragen (siehe Fußnote 46). Topologie: Nordhalbkugel heller.

Hauptgürtel-Asteroid (8)**Flora** (röm. Göttin der Blüte, der Gärten, und des Frühlings = griech. Frühlings-Nympe Chloris, Frau des Westwindes Zephyr), entdeckt vom Astronomen John Russell Hind im Privatobservatorium von Goerge Bishop im Regents Park in London am 18. Oktober 1847.

Symbol: ♀ Gr. Halbachse 2,202 AU (Perihel 1,857, Aphel 2,547, Exzentrizität 0,157), Inklination 5,9°, Umlaufzeit 3a 97d, Rotation 12h 52min, Achenneigung 78°, Größe 135 km, 57.556km<sup>2</sup> (Kroatien 55.974), 6,7–11,4 mag, bei Opposition im Mittel 7,8 wie Neptun; in Extremfällen aber 6,7 wie am 21. Oktober 2017; 7,9–11,6 mag, H = 6,49, max. Winkeldurchmesser 0,21", Albedo 0,24, Masse 4•10<sup>18</sup> kg, Dichte 3130 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,045 m/s<sup>2</sup>, (0,46 % Erde), Fluchtgeschwindigkeit 81 m/s, Temperatur -93°, max. 3°, Spektralklasse S, an der Oberfläche dürften Silikatfelsen (mit Pyroxen und Olivin) und Eisen-Nickel-Metall; dürfte zu den L-Chondriten (siehe Fußnote 46) beitragen; das gilt auch für die Asteroiden der Flora-Familie.

Die **Flora-Familie** ist eine große Asteroidenfamilie von S-Typ Asteroiden im inneren Hauptgürtel (4-5% der Hauptgürtel-Asteroiden gehören zu ihr; Flora ist größtes Mitglied, Quelle für L-Chondriten). Zur Flora-Familie gehört auch (951)**Gaspra** (Stadt auf der Krim, entdeckt 1916, Flyby von Galileo 199, 18x10,5x9, 525 km<sup>2</sup> wie Guam und halb Honk Kong).

Hauptgürtel-Asteroid (9)**Metis** (Göttin des Wissens, Okeanide = Tochter von Okeanos und Thetis und erste Geliebte des Zeus), entdeckt von Andrew Graham mit dem 1830 gebauten Markree Observatory in Irland (damals das größte Observatorium der Welt) am 25. April 1848.

Symbol: 👁 Gr. Halbachse 2,386 AU (Perihel 2,09, Aphel 2,68, Exzentrizität 0,12), Inklination 5,6°, Umlaufzeit 3a 251d mit 19,2 km/s, Rotation 5,1h, Achenneigung 72° oder 76°, Größe 190 km, 113.441km<sup>2</sup> (Nicaragua 119.990), 8,1–11,83 mag, H = 6,3, max. Winkeldurchmesser 0,23", Albedo 0,12, Masse 1•10<sup>19</sup> kg, Dichte 4120 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,07 m/s<sup>2</sup>, (0,7 % Erde), Fluchtgeschwindigkeit 0,1 km/s, Temperatur -100°, max. 9°, Spektralklasse S. Metallhaltiges Olivin-Silikat 30–40% und metallisches Nickel-Eisen 60–70%, könnte der Kern eines durch Kollision auseinandergebrochenen größeren Asteroiden sein; vom Mantel könnte

(113)Amalthea, 46 km, sein. Unregelmäßige Gestalt: langgestreckt mit einem breiten und einem spitzen Ende; es gibt es größeres flaches Areal. Durch Lichtkurven wurde ein Begleiter vermutet, was bisher nicht bestätigt werden konnte.

Hauptgürtel-Asteroid (10)**Hygieia** (Göttin des Gesundheit, Tochter des Asklepios), auch Hygeia, entdeckt von Annibale de Gasparis in Neapel am 12. April 1849. Drittgrößter Asteroid, größter Asteroid des C-Typs, Hauptasteroid der Hygieia-Familie, enthält über 90% von deren Masse, liegt am äußeren Rand des Hauptgürtels. Symbol: ♃ Gr. Halbachse 3,14 AU (Perihel 2,77, Aphel 3,51, Exzentrizität 0,12), Inklination 3,84°, Umlaufzeit 5,56a (2031d) mit 16,8 km/s, Rotation 27,6h (1,15d), Achenneigung 60°, Größe 530×407×370 (431) km, 837.081km<sup>2</sup> (Tansania 885.800), 9,0–11,97 mag, H = 5,43, max. Winkeldurchmesser 0.321", Albedo 0,07, Masse 9•10<sup>19</sup> kg, Dichte 2080 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,091 m/s<sup>2</sup>, (0,9 % Erde), Fluchtgeschwindigkeit 0,21 km/s, Temperatur -109°, max. -26°, Spektralklasse C, größter C-Typ-Asteroid.

Hauptgürtel-Asteroid (11)**Parthenope** (Sirene, gestorben in Neapel), entdeckt von Annibale de Gasparis in Neapel am 11. Mai 1850. Symbol: ♃ (stehender Fisch mit Stern). Gr. Halbachse 2,453 AU (Perihel 2,208, Aphel 2,697, Exzentrizität 0,1), Inklination 4,6°, Umlaufzeit 3,84a (1402,89d) mit 19,02 km/s, Rotation 13,7h, Größe 153,3 km, 73.830 km<sup>2</sup> (Tschechien 77.247), 8,68–12,16 mag, H = 6,55, max. Winkeldurchmesser 0.178", Albedo 0,18, Masse 6•10<sup>18</sup> kg, Dichte 3280 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,0578 m/s<sup>2</sup>, (0,6 % Erde), Fluchtgeschwindigkeit 0,0941 km/s, Temperatur -99, Spektralklasse S.

Hauptgürtel-Asteroid (15)**Eumonia** (Hore, Tochter von Jupiter und Themis), entdeckt am 29. Juli 1851 von Annibale de Gasparis in Neapel. Größter Vertreter der Eunomia-Familie; größter Asteroid der Spektralklasse S. Symbol: ♃ Halbachse 2.64 AU (Perihel 2,1, Aphel 3,1, Exzentrizität 0,19), Inklination 11,4°, Umlaufzeit 4a 108d mit 18,98 km/s, retrograde Rotation 6,98h, Achseneigung 165°. Größe 357×255×212 (268) km, 225.642 km<sup>2</sup> (Ghana 227,533), H = 5,28, Albedo 0,21, Masse 3•10<sup>19</sup> kg, Dichte 3140 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,08 m/s<sup>2</sup>, (0,8 % Erde), Fluchtgeschwindigkeit 0,16 km/s, Temperatur -107° (max. -13°), Spektralklasse S.

Hauptgürtel-Asteroid (16)**Psyche** (Gattin des Gottes Eros=Amor=Cupido), entdeckt am 17. April 1852 von Annibale De Gasparis in Neapel. Massivster metallischer M-Asteroid: reiner Eisen-Nickel-Asteroid! Symbol: ♃ (Stern über Halbkreis: Schmetterlingsflügel, Symbol der Psyche = der Seele). Halbachse 2.921 AU (Perihel 2,513, Aphel 3,328, Exzentrizität 0,140), Inklination 3,01°, Umlaufzeit 4,99a (4a 362d) mit 17,43 km/s, Rotation 4,2h, Größe 240 × 185 × 145 km (186) km, 108.686 km<sup>2</sup> (Südkorea 100.210), H = 5,9, Albedo 0,12, Masse 2,27•10<sup>19</sup> kg (1% der Masse des Hauptgürtels), Dichte 6730 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,06 m/s<sup>2</sup>, (0,6 % Erde), Fluchtgeschwindigkeit 0,13 km/s, Temperatur -113° (max. 7°), Spektralklasse M.

2867)**Šteins** (nach dem lettisch-sowjetischen Astronomen Kārlis Šteins), entdeckt am 04. November 1969 vom ukrainisch-sowjetischen Astronomen Nikolai Chernych, der sehr viele Asteroiden entdeckte. Am 5. September 2007 flog die europäische Raumsonde Rosetta im 800 km Entfernung am Asteroiden vorbei, von der Esa wurde Steins als „Diamant am Himmel“ beschrieben.

Gr. Halbachse 2,36 AU (Perihel 2,02, Aphel 2,71, Exzentrizität 0,146), Inklination 9,9°, Umlaufzeit 3,36a mit 19,27 km/s, Rotation 6h, Größe 6.67×5.81×4.47 (5,6) km, 98,5 km<sup>2</sup> (Montserrat 102), H = 12,9, Albedo 0,34, Temperatur -92°, Spektraltyp E;

Topologie: Wegen der diamantähnlichen Gestalt werden die Krater nach englischen Edelstein-Namen benannt, der größte als „Diamond“. Wie die Maria auf dem Mond und die Montes auf Merkur sind dies die einzigen Oberflächenstrukturen in Sonnensystem, die nicht nach Eigennamen bekannt wurden. Eine Region heißt Chernykh Regio nach dem Entdecker.

Hauptgürtel-Asteroid (21)**Lutetia** (alter Name für Paris), entdeckt am 15. November 1852 von Hermann Mayer Salomon Goldschmidt (Astronom und Kunstmaler) vom Balkon seiner Wohnung in Paris aus entdeckt. Spektralklasse M (für Metall, Zusammensetzung wie bei Nickel-Eisenmeteoriten). Am 10. Juli 2010 folgte die europäischen Raumsonde Rosetta in 3168 km am Asteroiden vorbei und machte Fotos von 50% größtenteils der Nordspähre. Die Dichte des Asteroiden ist für Asteroiden extrem groß.

Gr. Halbachse 2,4 AU (Perihel 2,0, Aphel 2,8, Exzentrizität 0,16), Inklination 3,1°, Umlaufzeit mit 3,8a mit 18,96 km/s, retrograde, fast auf dem Bauch liegende Rotation 0,34d (8.17h), Achseneigung 96°, Größe 121×101×75 (100) km, 31.415 km<sup>2</sup> (Belgien 30.278), 9,25–13,17 mag, H = 7,29, Albedo 0,19, Masse 2•10<sup>18</sup> kg, Dichte 3400 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,05 m/s<sup>2</sup>, (0,5 % Erde), Fluchtgeschwindigkeit 69 m/s, Temperatur -103 – -28°, Spektralklasse M.

Topologie: In der von Rosetta aufgenommenen Hemisphäre gibt es 350 Krater. von 600m bis 55 km Größe. Die Krater in der Achaia-Region sind 3,6 Milliarden Jahre alt. Oberflächenmerkmale wurden nach antiken Landschaften benannt. Es gibt sieben geologisch definierte Regionen: Baetica (Bt), Achaia (Ac), Etruria (Et), Narbonensis (Nb), Noricum (Nr), Pannonia (Pa), and Raetia (Ra). Baetica am Nordpol ist die jüngste Oberfläche die zwei ältesten sind Achaia and Noricum. Achaia hat bemerkenswert viele Krater. Narbonensis fällt mit dem größten Krater Massilia zusammen. Pannonia and Raetia sind ebenfalls große Impaktkrater. Noricum ist durch einen 10 km lange und 100m tiefen Graben durchzuogen. Im Süden vermutet man einen 45 km großen Krater namens Suspicio. Auch dieser Einschlag hat Lutetia nicht zerteilt, es handelt sich bei Lutetia nicht um ein lose zusammengehaltenes Geröll (ein „rubble pile“), sondern um ein bemerkenswert starkes priordiales Panetesimal in einem Stück.

Hauptgürtel-Asteroid (44)**Nysa** (mythisches Heimatland, wo die Regen-Nymphen, die Hyaden, den Gott Dionysios großzogen), entdeckt am 27. Mai 1857 von Hermann Mayer Salomon Goldschmidt. Er ist für seine Größe von 70 km auffallend hell (Albedo 0,55) und besitzt eine gelbliche Färbung, die man dem Mineral Enstatit (MgSiO<sub>3</sub>, hartes Kettensilikat aus der Gruppe der Pyroxene) zuschreibt; Nysa ist der größte Asteroid dieses E-Typs. Durch die scheibenartige, in 6½ Stunden rotierende Form des Himmelskörpers entsteht eine seltsame Lichtkurve, wie sie bis dahin erst an *einem* Kleinplaneten festgestellt worden war.

Nysa ist Quelle der Aubriten-Meteorite aus der Gruppe der Achondriten.

Gr. Halbachse 2,4 AU (Perihel 2,1, Aphel 2,8, Exzentrizität 0,14), Inklination 3,7°, Umlaufzeit 3,77a mit 19,13 km/s, Rotation 6h25min, Größe 113×67×65 (70) km, 15.393 km<sup>2</sup> (14.874 Ost-Timor), Winkeldurchmesser max. 0,09", 8,83 – 12,46 mag, H = 7,03, Albedo 0,55, Masse 4•10<sup>17</sup> kg, Dichte 2000 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,02 m/s<sup>2</sup>, (0,2 % Erde), Fluchtgeschwindigkeit 37 m/s, Temperatur -122°, Spektraltyp E (von Enstatit).

Hauptgürtel-Asteroid (253)**Mathilde** (Gattin des Astronomen Maurice Loewy?), entdeckt am 12. November 1885 vom österreichischen Astronomen Johann Palisa (dem erfolgreichsten Asteroiden-Entdecker, der 122 Asteroiden entdeckte) mit dem Refraktor im Observatorium in Wien, dem damals größten Fernrohr der Welt. Am 27. Juni 1997 passierte die Raumsonde NEAR Shoemaker im Abstand von 1.212 km mit 9,93 km/s und nahm über 500 Bilder von einer Hemisphäre des Asteroiden auf.

Gr. Halbachse 2,645 AU (Perihel 1,94, Aphel 3,35, Exzentrizität 0,266), Inklination 6,7°, Umlaufzeit 4,3a (1571,3d) mit 17,98 km/s, Rotation 17d 9h 45min (417,7h), Größe 66×48×(52,8) km, 8.758 km<sup>2</sup> (Puerto Rico 8870), H = 10,2, Albedo 0,04, Masse 1•10<sup>17</sup> kg, Dichte 1300 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,001 m/s<sup>2</sup>, (0,01 % Erde), Fluchtgeschwindigkeit 22,9 m/s, Temperatur -99°, Spektralklasse C.

Dunkler Asteroid, schwärzer als Kohle, wie frischer Asphalt; extrem große Krater, die sich über den ganzen Asteroiden ziehen, nach Kohlenfeldern auf der Erde benannt (riesiger Einschlagkrater von 10km Tiefe!), extrem langsame Rotation (die langsamste überhaupt unter allen bekannten Asteroiden), wegen geringer Dichte nicht-kompakte Ansammlung von Trümmerstücken (rubble pile).

Hauptgürtel-Asteroid (279)**Thule** (nach dem von den Germanen angenommenen mythischen Land im äußersten Norden), entdeckt am 25. Oktober 1888 von Johann Palisa, befindlich am äußersten Rand des Hauptgürtels in 4:3-Resonanz mit Jupiter, erstes Mitglied der Thule-Gruppe. Gr. Halbachse 4,27 AU (Perihel 4,23, Aphel 4,31, Exzentrizität 0,009), Inklination 2,3°, Umlaufzeit 8,8a mit 12,43 km/s, Rotation 16h, Größe 126,6 km, 50.352 km<sup>2</sup> (Costa Rica 51.060), H = 8,57, Albedo 0,04, Temperatur -140°, Spektraltyp D.

Asteroid (944)**Hidalgo** (nach dem 1810 für Mexikos Unabhängigkeit kämpfenden katholischen Priester und Nationalhelden Miguel Hidalgo y Costilla), Jupiter- und Saturnbahnkreuzer, Zentaur, entdeckt am 31. Oktober 1920 von Water Baade in Bergedorf bei Hamburg, damals entferntestes Objekt des Sonnensystems.

Gr. Halbachse 5,75 AU (Perihel 1,95, Aphel 9,54, Exzentrizität 0,66), Inklination 42,567°, Umlaufzeit 13,77a mit 12,43 km/s, Rotation 0,4d, Größe 38 km, 4.536 km<sup>2</sup> (Trinidad & Tobago 4.128), H = 10,77, Albedo 0,06, Temperatur -157°, Spektraltyp D (sehr niedrige Albedo, rot, Silikate mit organischen Verbindungen und Kohlenstoff; Eis).

Asteroid (2060)**Chiron** (nach dem Zentrauren Cheiron der griech. Mythologie), am 18. Oktober 1977 von Charles Kowal auf dem Mount Palomar entdeckt, Zentaur zwischen Saturn und Uranos, 1991 wurde eine Gashölle (Koma) um Chiron entdeckt, weshalb Chiron auch als Komet gilt, und zwar ist es der größte. Chiron wurde 1988, in 12 AU Entfernung von der Sonne, um 75% heller.

Symbol:  $\mathcal{C}$  (stilisierte Gestalt des Zentrauren: Kreis=Pferdehälfte, K= Menschenhälfte).

Gr. Halbachse 13,69 AU (Perihel 8,47, Aphel 18,92, Exzentrizität 0,38), Inklination 6,9°, Umlaufzeit 50,5a mit 8,05 km/s, Rotation 5,9d, Größe 200 km, 125.664 km<sup>2</sup> (Griechenland 130,647), Winkeldurchmesser max. 0,035", 18,7–15,6 mag, H = 6,2, Albedo 0,075, Masse 3•10<sup>18</sup> kg, Dichte 2000 kg/m<sup>3</sup>, Temperatur -198°, Spektralklasse B und Cb.

Asteroid (10199)**Chariklo** (Nympe, Frau Chirons), Zentaur, entdeckt von James V. Scotti im Rahmen von Spacewatch (Observatorium Kitt Peak / Arizona) am 15.02.1997), größter Zentaur, erster Asteroid mit Ringen (zwei Wassereis-Ringe: innerer Eisring 7km Breite, Radius 391 km; äußerer Ring 3 km Breite, Radius 405 km; dazwischen 9 km Lücke), entdeckt wurden die Ringe bei einer Sternbedeckung am 3. Juni 2013, 4:3-Resonanz mit Uranus.

Gr. Halbachse 15,87 AU (Perihel 13,08, Aphel 18,66, Exzentrizität 0,17), Inklination 23,4°, Umlaufzeit 62,4a mit 7,5 km/s, Rotation 5,9d, Größe 248 km, 193.221 km<sup>2</sup> (Senegal 192,530), 18,3 (max 17,7) mag, H = 6,6, Albedo 0,05, Spektralklasse B und Cb.

Asteroid (8405)**Asbolus** („Rußiger“, Zentaur & Prophet, von Herakles gekreuzigt), entdeckt von James V. Scotti and Robert Jedicke im Rahmen von Spacewatch (Observatorium Kitt Peak / Arizona) am 5. April 1995. SN (Saturn-Neptun) Zentaur, Saturnbahnkreuzer; instabiler Orbit. Gr. Halbachse 17,94 AU (Perihel 6,84, Aphel 29,05, Exzentrizität 0,62), Inklination 17,6°, Umlaufzeit 74a 364d mit 7,03 km/s, Rotation 8h 52min, Größe 84km, 22.167 km<sup>2</sup> (Montenegro 13,812; Belize 22,966), 21,1 mag, H = 9,0, Albedo 0,05: Dunkle Albedo, doch auf Oberfläche ein heller Fleck (junger Einschlag, weniger als 10 Millionen Jahre alt)

**Bemerkenswerte Hauptgürtel-Asteroiden** (in eckigen Klammern Zwergplanet Ceres und erdnahe Asteroiden):

**Entdeckungsreihenfolge:** [(1)Ceres 1801], (2)Pallas 1802, (3)Juno 1804, (4)Vesta 1807, (5)Astraea 1845, (6)Hebe 1847, (7)Iris 1847, (8)Flora 1847, (9)Metis 1848, (10)Hygie(i)a 1849, (11)Parthenope (1850) usw.

**Größe** in km: [(1)Ceres 942], (2)Pallas 544, (4)Vesta 525, (10)Hygie(i)a 431, (704)Inerammia 326, (52)Europa 315, (511)Davida 289, (87)Sylvia 286 (65)Cybele 273, 15(Eunomia) 268, (3)Juno 258 usw.

**Masse** in 10<sup>18</sup> kg: [(1)Ceres 947], (4)Vesta 259, (2)Pallas 201, (10)Hygie(i)a 87, (31)Euphrosyne 58, (704)Interammia 39, (511)Davida 38, (532)Herculina 33, (15)Eunomia 32, (3)Juno 29, (16)Psyche 23 usw.

**Max. Helligkeit** von der Erde in mag: [(99942)Aphophis 3,3], (4)Vesta 5,20, (2)Pallas 6,49, [(1)Ceres 6,5], (7)Iris 6,73, [(433)Eros

6,8], (6)Hebe 7,5, (3)Juno 7,5, (18)Melpomene 7,5, (15)Eunomia 7,9, (8)Flora 7,9, (324)Bamberga 8,0, (1036)Ganymed 8,1 usw.

**Asteroiden mit Begleitern** (2011 waren über 200 Asteroiden mit Monden bekannt. 213 kannte man 230 Monde)

(243) Ida (entdeckt 1884, 15,7 km), erster bekannter Asteroid mit einem Mond Dactyl (entdeckt von der Galileo-Sonde 1994, 1,3 km).

(45) Eugenia (entdeckt 1857, 107 km), zweiter bekannter Asteroid mit einem Mond (Petit Prince, entdeckt 1998, 13 km), ein zweiter Mond, näher am Asteroiden als Petit Prince, wurde 2007 entdeckt (vorläufige Bezeichnung S/2004 (45) 1, 6 km).

(87)Sylvia (entdeckt 1866, 286 km), erster Asteroid, von dem bekannt wurde, dass er mehr als zwei Monde hat: Romulus (außen, entdeckt 2001, 18 km) und Remus (innen, entdeckt 2004, 7 km),

(90)Antiope (entdeckt 1966); 2009 wurde entdeckt, dass es ein Doppelasteroid ist mit Komponenten 88 km und 84 km.

(816)Kleopatra (entdeckt 1880, 217×94×81 km), hundeknochenähnliche Gestalt, hat zwei 2008 entdeckte Monde: Alexhelios (außen, 5 km) und Cleoselene (innen, 3 km).

(93) Minerva (entdeckt 1867, 156 km) hat zwei 2009 entdeckte Monde: Aegis (außen, 4 km) und Gorgoneion (innen, 3 km).

## 1.10. Jupiter

**Jupiter** (griech. *Zeus*; germ. *Thor/Donar*, kelt. *Taranis*, für den Opfer verbrannt werden, indisch *Indra*, *Brihaspati*, *Brahmanaspati*, Gott der rel. Unterweisung; auch „Guru“ genannt, bab. *Marduk*, assyr. *Schul-pa-Ud-Du-a* oder *Sag-me-gar* oder mit unbekannter Bedeutung oder *Mul Babar* weißer Stern; sumerisch *Enlil*, äg. *Osiris*, *Hor-wepesch-tau* / *Hor-tasch-tau*, chin. 木星 (*Mùxīng*) Holzstern = jap. *Mokusei* = veit. *Sao Moc*, altchin. *Sui-xing* = jap. *Saisei* = viet. *Tue tinh*; Taoismus: der *Fu*-Stern (Wohlstands-Stern) in den sich Ratgeber Ynang Cheng verwandelte); vgl. Donnerstag,

Symbol<sup>24</sup> (Jupiters Adler oder Donnerkeil oder Anfangsbuchstabe Z von „Zeus“ mit vertikalem Strich als Abkürzungszeichen)

**Gr. Halbachse** 778,36 Mio. km (5,203 AU; Perihel 4,95; Aphel 5,46, Exzentrizität 0,0484), Inklination 1,3°.

**Umlaufzeit** siderisch 11,86a, synodisch: 398,88d (1 Jahr 1 Monat) 13,07 km/s; Erdabstand 3,934-6,471 AU.

**Rotation** 9h 55min 30s, Achsenneigung 3,13°.

**Größe:** Ø 139.822 km (11× Erde),<sup>47</sup> Oberfläche 61,4 Mrd km<sup>2</sup> (120 × Erde); 29,8" bis 50,1" ; -1,6 bis -2,94 mag, Albedo 0,52.

**Masse:** 1.9 × 10<sup>27</sup> kg (318 × Erde; 1/1000 ☉), Dichte 1363 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft: 24,79 m/s<sup>2</sup> (2,5g), Fluchtgeschwindigkeit 59,5 km/s.

**Atmosphäre:** Druck 20-200 kPa in Wolkenhöhe (= 0,2-2 × Erde)

ca. 90% ± 2.0% Wasserstoff, 10% ± 2.0% Helium; 0.026% Ammoniak, 0,003% Deuterium, 0,0006% Ethan, 0,0004% Wasser.

Eisarten: Ammoniak Wasser, und NH<sub>4</sub>SH-Eis.

**Temperatur:** (bei 1 bar) -108°

**Innerer Aufbau:** vermutlich fester metallischer Kern, dann Schicht von flüssig-metallischem Wasserstoff, der in weiterer Entfernung vom Zentrum stetig in die gasförmige Atmosphäre übergeht.

**Magnetfeld:** Jupiter besitzt das größte Magnetfeld aller Planeten des Sonnensystems; siehe auch Fußnote 6. An der Oberfläche beträgt die Stärke des Feldes äquatorial circa 400 Mikrottesla und an den Polen zwischen 1040 und 1400 Mikrottesla.[13] Es ist somit 10- bis 20-mal so stark wie das Erdmagnetfeld (ca. 30 µT am Äquator und ca. 60 µT an den Polen). Es umgibt Jupiter auf der sonnenzugewandten Seite 5-7 Mio. km und auf der sonnenabgewandten Seite recht es fast bis zur Saturnbahn. In einem Umkreis von etwa 300.000 km um Jupiter herum (in dem sich die Ringe befinden; siehe unten) eine große Gefahr für die Elektronik von Raumsonden dar; für Menschen wäre die Strahlung in dieser Region bereits nach kurzer Einwirkungsdauer tödlich. Auf dem innersten der großen Monde (dem Mond Io) wäre man noch einer Strahlung von 3600 men pro Tag ausgesetzt, auf dem Mond Europa wären es immerhin noch 540 rem. Ist man ca. 75 rem über eine Periode von wenigen Tagen ausgesetzt, kann dies eine Strahlungsvergiftung hervorrufen. Auf Gany-med hat man nur noch 8 rem pro Tag, auf Callisto 0,01 rem (zum Vergleich: auf der Erde bekommt man durchschnittlich 0,07 pro Tag).

**Topologie:** farbige Wolkenbänder parallel zum Äquator; abwechselnd dunklere und hellere Streifen; Windgeschwindigkeiten über 700 km/h.; großer Roter Fleck (Wirbelsturm auf 22° südlicher Breite, Oval von 24–40,000 km × 12–14,000 km, erstmals 1664 von Robert Hooke beobachtet). Für den Nullmeridian gibt es drei Systeme:

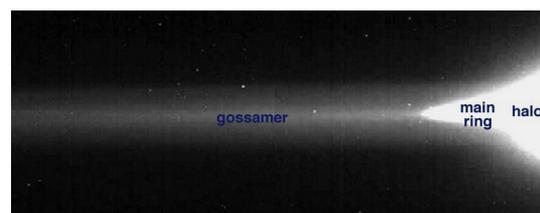
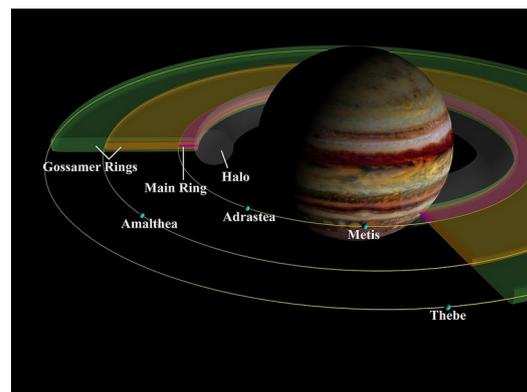
System I: Bezugnahme auf mittlere atmosphärische Rotation am Äquator;

System II: Bezugnahme auf die mittlere atmosphärische Rotation nördlich der südlichen Komponente des nördlichen Äquatorbandes, und zugleich südlich der nördlichen Komponente des südlichen Äquatorbandes.

System III: Bezugnahme auf die Rotation des Magnetfeldes.

**Ring:** bestehend aus Staubkörnchen, die zum Großteil um die 15 µm groß sind, d.h. nicht größer als die Partikel des Rauches einer Zigarette, fast schwarz (Albedo nur 0,05); die Teilchen des Halo-Ringes könnten sub-mikrometer-groß sein; entdeckt 1979 durch Raumsonde Voyager 1 mit schwacher Albedo 0,05. Sie werden von Staubpartikeln der kleinen Monde Adrastea, Amalthea, Metis und Thebe gespeist. Von innen nach außen:

1. Halo Ring, gespeist von Metis und Adrastea (Radius 92.000 – 122.500 km vom Jupiterzentrum, 12.500 km dick)
2. heller dünner Hauptring, gespeist von Metis und Adrastea (Radius 122.500 – 129.000 km vom Jupiterzentrum, 30-300 km dick)
3. „Amalthea Gossamer Ring“, gespeist von Alalthea, (Radius 129.000 – 182.000 km vom Jupiterzentrum, 2000 km dick)
4. „Thebe Gossamer Ring“, schwächer als der Amalthea G.R., gespeist von Thebe (Radius 129.000 – 226.000 km vom Jupiterzentrum, 8400 km dick),<sup>48</sup> hinter Thebe gibt es eine schwache Fortsetzung („Thebe Extension“) mit 280.000 km = 3,75 Jupiterradien)



<sup>47</sup> Dies ist der mittlere Durchmesser; Äquatordurchmesser 142.984 km, Podurchmesser 133.708 km (Differenz 9276 km, also Abplattung 6 %). Als Oberfläche gilt das Niveau mit 1 Bar Atmosphärendruck.

<sup>48</sup> Es gibt noch einen extrem dünnen Ring in einer äußeren Umlaufbahn, der einen Radius von über 320.000 km hat und dessen Teilchenbahnebenen bis zu 20° zur Äquatorebene des Jupiters geneigt ist, in einer retrograden Umlaufbahn. Außerdem scheint es noch viel weiter draußen im Orbit von Himalia (mit Radius 12 Mill. km) noch einen weiteren Ring zu geben (siehe zu Himalia).

Der Halo-Ring ist blau, die anderen sind rötlich. 2002–2003 tauchte die Galileo-Sonde zweimal in die Gossamer-Ringe ein und detektierte Staubpartikel im Bereich zwischen 0.2 und 5 Mikrometern, außerdem registrierte sie kleine diskrete Körper (< 1 km) in der Nähe von Amalthea.

**Monde:** Anfang 2015 waren 67 Monde bekannt, von diesen 16 größer als 10 km (die alle bis einschließlich 1979 entdeckt wurden); die weiteren 51 wurden erst in den Jahren ab 2000 entdeckt (mit Ausnahme des 9 km großen Themisto, der schon 1975 entdeckt wurde, dann verloren ging und 2000 wiederentdeckt wurde). – Die wichtigsten sind die „inneren vier“ und die „vier Hauptmonde“:



Hauptmonde der Größe nach: Ganymed, Kallisto, Io, Europa



Jupiter und seine Hauptmonde im Teleskop



Die inneren Monde und die Hauptmonde der Reihenfolge nach (im korrekten Abstandsverhältnis)

**I. Die vier innersten Monde und Spender des Ringmaterials („Schäfermonde“) bilden die Amalthea-Gruppe.**

Da ihre Dichte kleiner als die von Wasser ist, dürften sie aus Wassereis bestehen und porös sein.

**Metis** (Jupiter XVI, Göttin des Wissens, Okeanide = Tochter von Okeanos und Thetis und erste Geliebte des Zeus, entdeckt am 4. März 1979 von Stephen Synnott auf Aufnahmen von Voyager 1), Gr. Halbachse 128.000 km (1,79 Jupiterradien; innerster Mond; liegt in einer Kerbe des Hauptrings, den er speist; mitten im Gebiet tödlicher Strahlung; Jupiter nimmt von ihm aus gesehen 67,9° des Himmels ein, und man erkennt zugleich immer nur 31% seiner Oberfläche), Exzentrizität 0,0002, Inklination 0,06°, Umlaufzeit 7h 4,45min (wie Adrastea schneller als die Jupiterrotation, geht also im W auf und im O unter) mit 31,5 km/s (schnellster Jupitermond), gebundene Rotation (zeigt mit der Spitze auf Jupiter), Achsenneigung 0°, Durchmesser 42 km (60 × 40 × 34 km), Fläche 8700 km<sup>2</sup> (Abchasien 8660), 17,5 mag, Albedo 0,061, Masse 3 × 10<sup>16</sup> kg, Dichte 860 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,005 m/s<sup>2</sup> (0,05 % Erde), Fluchtgeschwindigkeit 12 m/s, Temperatur -150°.

**Adrastea** (Jupiter XV, Bergnymphe Adrasteia „die Unentrinnbare“, Beschützerin des jungen Zeus, entdeckt am 8. Juli 1979 von David Jewitt und Edward Danielson auf Aufnahmen von Voyager 2), Gr. Halbachse 129.000 km (zweit-innerster Mond nach Metis; liegt an der Grenze zwischen Hauptring und Gossamer Ring; wichtigster Spender von Ringpartikeln; mitten im Gebiet tödlicher Strahlung), Exzentrizität 0,0015, Inklination 0,03°, Umlaufzeit 7h 9,5min (wie Metis schneller als die Jupiterrotation, geht also im W auf und im O unter) mit 31,378 km/s, gebundene Rotation, Achsenneigung 0°, Durchmesser 16,4 km (20 × 16 × 14 km, kleinster der vier innersten Monde), Fläche 845 km<sup>2</sup> (Kiribati 811) 18,7 mag, Albedo 0,1, Masse 2 × 10<sup>15</sup> kg, Dichte 860 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,002 m/s<sup>2</sup> (0,02 % Erde), Fluchtgeschwindigkeit 8 m/s, Temperatur -151°.

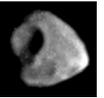
**Amalthea** (Jupiter V, Nymphe, die Zeus mit Ziegenmilch großzog; entdeckt am 9. September 1892 von Edward Barnard am 91-cm-Refraktor des Lick-Observatoriums/Kalifornien; es war der fünfte entdeckte Jupitermond nach dem vier Galiläischen Monden 1610, und der letzte, der durch visuelle Teleskopbeobachtung entdeckt wurde); Gr. Halbachse 181.400 km (2,54 Jupiterradien; dritt-innerster Mond, an der Grenze der beiden Gossamer Ringe; mitten im Gebiet tödlicher Strahlung), Exzentrizität 0,0003, Inklination 0,374°, Umlaufzeit 11h 57min 3s mit 26,57 km/s, gebundene Rotation (mit langer Achse auf Jupiter zeigend), Achsenneigung 0°, Durchmesser 167 km (250 × 146 × 128 km, größter der vier innersten Monde), Fläche 130.000 km<sup>2</sup> (Griechenland 131.000), 14,1 mag, Albedo 0,09, Masse 2 × 10<sup>18</sup> kg, Dichte 857 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,02 m/s<sup>2</sup> (0,2 % Erde), Fluchtgeschwindigkeit 58 m/s, Temperatur -153° (maximal -108°), sehr rote Farbe.

Topologie: Der größte Krater Pan ist 100 km breit und min. 8 km tief; ein anderer Krater Gaea ist 80 km breit und wahrscheinlich doppelt so tief als Pan. Amalthea hat einige hervorstechende helle Flecken; zwei sind benannt und heißen Lyctos Facula and Ida Facula mit einer Breite bis zu 25 km.



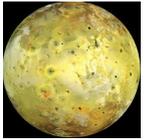
**Thebe** (Jupiter XIV, Nymphe, Tochter des Flussgottes Asopos und Geliebte des Zeus, nach er die Stadt Theben in Böotien benannt ist; entdeckt am 5. März 1979 von Stephen Synnott auf Aufnahmen von Voyager 1), Gr. Halbachse 221889 km (am Außenbereich der

Ringe; viert-innerster Mond, noch im Gebiet lebensgefährlicher Strahlung), Exzentrizität 0,02, Inklination 1.1°, Umlaufzeit 16h 11,3min, gebundene Rotation, Achsenneigung 0°, Durchmesser 98,6 km (116 × 98 × 84), Fläche 45.000 km<sup>2</sup> (Estland), 17,5 mag, Albedo 0,05. Masse 4·10<sup>17</sup> kg, Dichte 860 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,013 m/s<sup>2</sup> (0,1 % Erde), Fluchtgeschwindigkeit 20-30 m/s, Temperatur -149°. Farbe dunkelrot. Topologie: Drei bis vier große Impaktkrater, von vergleichbarer Größe wie Thebe selbst. Der größte (40 km) liegt auf der Jupiter abgewandten Seite und heißt Zethus (Mann der Nymphe Thebe).



## II. Die vier Galiläischen (1610 von Galileo Galilei entdeckten) Monde bilden die Hauptgruppe:

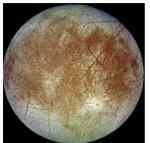
**Io** (Jupiter I; Geliebte des Zeus aus Argos; entdeckt 1610 von Galileo Galilei), Gr. Halbachse 421.500 km (fünfter Mond, innerster der Galiläischen Monde), Exzentrizität 0,004, Inklination 2,213°, Umlaufzeit 1d 18h 27,6min mit 17,3 km/s; gebundene Rotation, Achsenneigung 0°, Durchmesser 3643 km (etwas größer als Erdmond), Fläche 42 Mill. km<sup>2</sup> (Amerika), 5 mag (in Opposition), Albedo 0,63. Masse 9·10<sup>22</sup> kg (0,015 Erde), Dichte 3528 kg/m<sup>3</sup> (größte Dichte aller Monde; trockenste Welt des Sonnensystems), Schwerkraft 1,796 m/s<sup>2</sup> (3,35 % Erde), Fluchtgeschwindigkeit 2,558 km/s, Temperatur min. -183°, mittel -163°, max -143°, Spuren einer Atmosphäre mit 90% Schwefeldioxid. Einziger bekannter außerirdischer Ort im Universum mit derzeit aktiven Vulkanen. Io wirkt als Generator und verstärkt das Magnetfeld des Jupiter um das Doppelte. Io wird durch Gezeitenkräfte des Jupiter aufgeheizt.



Io bewegt sich auf ihrer Bahn durch das starke Magnetfeld des Jupiters, wodurch elektrische Ströme induziert werden. Dabei werden rund 1000 Gigawatt mit einem Spannungspotential von 400.000 Volt erzeugt. Unter diesen Bedingungen werden Atome in der oberen Atmosphäre ionisiert und in den Weltraum geschleudert. Io erleidet durch diesen Partikelstrom einen Masseverlust von mehreren Tonnen pro Sekunde. Die Ionen bilden längs Ios Bahn einen Torus um Jupiter, der im infraroten Licht intensiv leuchtet. Die stark beschleunigten Ionen können die Elektronik einer Raumsonde lahmlegen. Die Position von Io beeinflusst sehr stark die Aussendung der vom Jupitersystem abgestrahlten Radiowellen (Jupiter-Bursts). Wenn Io von der Erde aus sichtbar ist, steigt die Intensität der Radiostrahlung deutlich an.

**Europa** (Jupiter II; Geliebte des Zeus aus Phönizien; entdeckt am 7. Januar 1610 von Galileo Galilei), Gr. Halbachse 671.100 km (sechster Mond), Exzentrizität 0,009, Inklination 0,468°, Umlaufzeit 3,55d; gebundene Rotation, Achsenneigung 0°, Durchmesser 3121 km (kleinster der galiläischen Monde, etwas kleiner als Erdmond), Fläche 30,6 Mill. km<sup>2</sup> (Afrika 30,2), 5,3 mag (in Opposition), Albedo 0,67.

Masse 5·10<sup>22</sup> kg, Dichte 3013 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 1,314 m/s<sup>2</sup> (0,134 g), Fluchtgeschwindigkeit 2,025 km/s, Temperatur min. -223°, mittel -171°, max -148°, dünne Atmosphäre (Druck an der Oberfläche: 0,1 Mikropascal: ein Milliardstel des Atmosphärendrucks an der Erdoberfläche) mit Hauptbestandteil Sauerstoff. Die Oberfläche ist ungewöhnlich glatt (fast ohne Krater und Berge; die glatteste Oberfläche im Sonnensystem), durchzogen von Rissen und Streifen, bestehen aus Silikatgestein und Wassereis.



Darunter (in 2 bis 18 km Tiefe) wird ein bis zu 100 km tiefer Ozean vermutet mit mehr Wasser als auf der Erde. Hinweise darauf gibt ein schwaches Magnetfeld (1/4 so stark wie Magnetfeld von Ganymed, siehe Fußnote 49).

**Ganymed** (Jupiter III; Geliebter des Zeus; entdeckt am 7. Januar 1610 von Galileo Galilei), Gr. Halbachse 1.070.400 km (siebter Mond), Exzentrizität 0,0013, Inklination 0,2° (zur Jupiter-Äquatorebene; 2,2° zur Ekliptik), Umlaufzeit 7,15d; gebundene Rotation, Achsenneigung 0-0,33°, Durchmesser 5268 km (größter Mond des Sonnensystems, größer als Merkur mit 4879 km: 110% Merkur), Fläche 87 Mill. km<sup>2</sup> (Eurasien plus Afrika 85), 4,61 mag (in Opposition), Albedo 0,43.

Masse 1,5·10<sup>23</sup> kg, Dichte 1936 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 1,428 m/s<sup>2</sup> (0,146 g), Fluchtgeschwindigkeit 2,741 km/s, Temperatur min. -203°, mittel -162°, max -121°, dünne Atmosphäre mit Hauptbestandteil Sauerstoff (hauptsächlich O, aber auch O<sub>2</sub>, and möglicherweise O<sub>3</sub> = Ozon). Internes Magnetfeld dreimal so stark wie das des Merkur.<sup>49</sup> Hinweise auf Kryovulkanismus und frühere Plattentektonik, die aber zum Erliegen kam. Die größte zusammenhängende Struktur ist die dunkle Ebene Galileo Regio.P



Ganymed könnte es einen gewaltigen unter dem Eis liegenden Satzwasserozean haben mit mehr Wasser, als es auf der Erde gibt; er liegt mehrere hundert km unter der Oberfläche.

**Callisto** (Jupiter IV; Geliebte Nymphe des Zeus, an den Himmel als Große Bäarin versetzt; entdeckt am 7. Januar 1610 von Galileo Galilei), Gr. Halbachse 1.882.700 km (achter Mond), Exzentrizität 0,0074, Inklination gegen Äquatorebene 0,2-0,6° (monemtan 0,5°), Umlaufzeit 16,7d mit 8,2 km/s; gebundene Rotation, Achsenneigung 0°, Größe Ø 4821 km (drittgrößter Mond des Sonnensystems, zweitgrößter Jupitermond, fast gleich groß wie Merkur: 99%), Fläche 73 Mill. km<sup>2</sup> (Amerika plus Afrika 72), 5,7 mag (in Opposition), Albedo 0,22.

Masse 1×10<sup>23</sup> kg, Dichte 1830 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 1,253 m/s<sup>2</sup> (0,126 g), Fluchtgeschwindigkeit 2,440 km/s, Temperatur min. -193°, mittel -139°, max -108°, sehr dünne Atmosphäre 7,5 Milliardstel Bar mit Hauptbestandteilen Kohlendioxid und Sauerstoff; und die Atmosphäre zu halten, muss ständig das in den Weltraum entweichende Kohlendioxid nachgeliefert werden. Oberfläche hat höchste Impaktkrater-Dichte im Sonnensystem; lauter kleine kreisförmige Einschläge, eine Gebirgszüge, so dass die Oberfläche vorwiegend aus Wassereis besteht.



<sup>49</sup> Stärke am Äquator 719 nT (das des Jupiter hat hier 120 nT, und ist dem eigenen Magnetfeld des Ganymed entgegen gerichtet), am dem Polen doppelt so stark 1440 nT. Zum Vergleich hat die Merkur Oberfläche 450 nT = 1% der Stärke des Erdmagnetfeldes an der Erdoberfläche.

Größte Krater sind Valhalla (600 km mit heller Zentralregion und Ringen, die sich über 3000 km ausdehnen) und Asgard (dehnt sich über 1600 km aus). Wie bei Europa und Ganymed wird ein Salzwasserozean unter der Oberfläche vermutet, denn ein schwaches, in der Stärke variierendes Magnetfeld, während sich Mond durch die extrem starke Magnetosphäre des Jupiter bewegt, deutet auf das Vorhandensein einer elektrisch leitenden Flüssigkeit, wie Salzwasser, unterhalb Kallistos Eiskruste hin. Der Ozean liegt möglicherweise in 200 km Tiefe und ist selbst 10 km dick. Größter undifferenzierter Körper im Sonnensystem (d.h. ohne vollständige Aufteilung in Schichten wie Kern und Mantel, im Gegensatz zu Ganymed keinen Plattentektonik).

**III: Die übrigen 59 Monde kreisen außerhalb der Callisto-Bahn und heißen irreguläre Monde** (kleine Monde in größerer Entfernung vom Jupiter mit exzentrischen Orbits):

Exakt von innen nach außen geordnet sind es: Themisto, Leda, Himalia, Lysithea, Elara, Dia, Carpo, S/2003 J 12, Euporie, S/2003 J 3, S/2003 J 18, S/2011 J 1, S/2010 J 2 (= Jupiter LII), Thelxinoe, Euanthe, Helike, Orthosie, Iocaste, S/2003 J 16, Praxidike, Harpalyke, Mneme, Hermippe, Thyone, Ananke, Herse, Aitne, Kale, Taygete, S/2003 J 19, Chaldene, S/2003 J 15, S/2003 J 10, S/2003 J 23, Erinome, Aoede, Kallichore, Kalyke, Carme, Callirrhoe, Eurydome, S/2011 J 2, Pasithee, S/2010 J 1 (= Jupiter LI), Kore, Cyllene, Eukelade, S/2003 J 4, Pasiphae, Hegemone, Arche, Isonoe, S/2003 J 9, S/2003 J 5, Sinope, Sponde, Autonoe, Megaclite & S/2003 J 2.

In Gruppen, die in etwa von innen nach außen geordnet sind, sind es:

- Prograd-Einzelmond (1): *Themisto*
- Prograd-Himalia-Gruppe (5): *Leda, Himalia, Lysithea, Elara, Dia*,
- Prograd-Einzelmond (1) *Carpo*,
- Retrograd-Einzelmond (1) *S/2003 J12*,
- Retrograd-Einzelmond (1) *S/2011 J1*,<sup>50</sup>
- Retrograd-Ananke-Gruppe (17):<sup>51</sup> *Euporie, S/2003 J3, S/2003 J18, S/2010 J2 (=Jupiter LII), Thelxinoe, Euanthe, Helike, Orthosie, Iocaste, S/2003 J16, Praxidike, Harpalyke, Mneme, Hermippe, Thyone, Ananke, S/2003 J15*,<sup>52</sup>
- Retrograd-Carme-Gruppe (17): *Herse, Aitne, Kale, Taygete, S/2003 J19, Chaldene, S/2003 J10, Erinome, Kallichore, Kalyke, Carme, Pasithee, Eukelade, Arche, Isonoe, S/2003 J9, S/2003 J5*,
- Retrograd-Pasiphae-Gruppe (15):<sup>53</sup> *S/2003 J23, Aoede, Callirrhoe, Eurydome, S/2011 J2, S/2010 J1 (= Jupiter LI), Kore, Cyllene, S/2003 J4, Pasiphae, Hegemone, Sinope („Hades“), Sponde, Autonoe, Megaclite*,
- Retrograd-Einzelmond (1) *S/2003 J2*.

Genauerer zu den Untergruppen (Monde hier der Größe nach geordnet):

(A) prograder Orbit:

(A1) die *Himalia-Gruppe* (Inklination ca. 28°,  $\delta V \approx 150$  m/s, neutrale Farben wie C-Typ Asteroiden, Name auf -a): Himalia (160 km), Elara (78), Lysithea (39), Leda (18), Dia (4 km).

(A2): isolierte Satelliten: Themisto (9 km), Carpo (3 km)

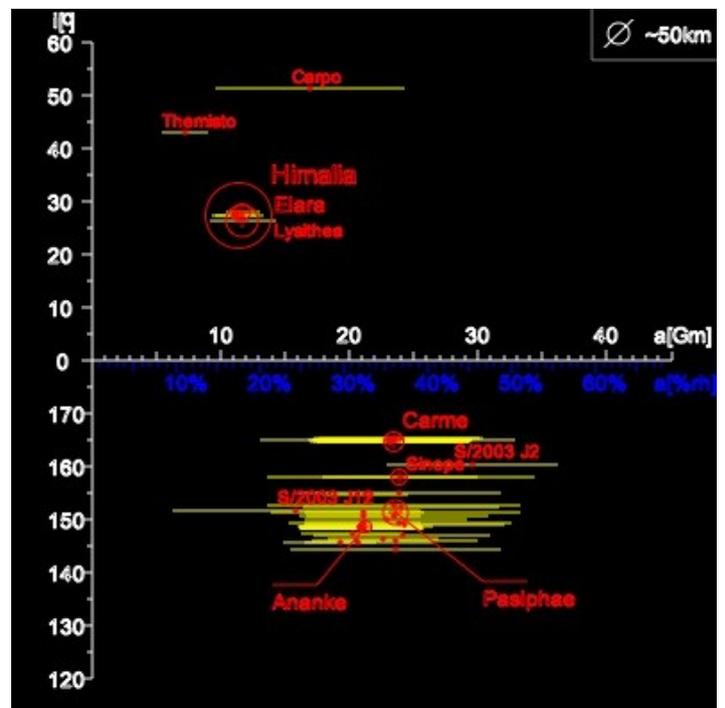
(B) retrograder Orbit (Name auf -e):

(B1) *Ananke-Gruppe* (Inklination 148°,  $15 < \delta V < 80$  m/s) Ananke ist leicht rötlich, die übrigen sind grau: Ananke (28 km), Praxidike (7), Iocaste (5), Harpalyke (4), Thyone (4), Hermippe (4), Helike (4), Euanthe (3), Euporie (2), Orthosie (2), Mneme (2), Thelxinoe (2), S/2003 J3 (2), S/2003 J 15 (2), S/2003 J16 (2), S/2003 J18 (2), S/2010 J2 (Jupiter LII) (1 km).

(B2) *Carme-Gruppe* (Inklination ca. 165°,  $5 < \delta V < 50$  m/s leicht rötlich, wie D-Typ Asteroiden): Carme (46 km), Taygete (5), Kalyke (5) (röter als die anderen!), Chaldene (4), Isonoe (4), Eukelade (4), S/2003 J5 (3), Erinome (3), Aitne (3), Arche (3), Kale (2), Pasithee (2), Kallichore (2), Herse (2), S/2003 J10 (2), S/2003 J19 (2), S/2003 J9 (1 km).

(B3) *Pasiphae-Gruppe*, sehr disparat, Pasiphae selbst ist grau, andere (Callirrhoe, Megaclite) leicht rötlich: Pasiphae (56 km), Sinope („Hades“, rot) (38 km) könnte zur Gruppe gehören, aber auch unabhängig sein, Callirrhoe (9), Megaclite (6), Autonoe (4), Aoede (4), Eurydome (3), Hegemone (3), Sponde (2), Cyllene (2), Kore (2), S/2003 J4 (2), S/2003 J23 (2), S/2010 J1 (Jupiter LI) (1), S/2011 J2 (1).

(B4): isolierte retrograde Satelliten: S/2003 J2 (entferntester Mond) (2 km), S/2011 J1 (1 km), S/2003 J12 (mit Ø 1 km wohl kleinster Mond, innerster der retrograden Monde 17,99 Mill. km),



<sup>50</sup> S/2011 J1 steht enternungsmäßig zwischen S/2003 J 18 und S/2010 J 2 (= Jupiter LII) der folgenden Gruppe.

<sup>51</sup> Die unterstrichenen Monde gehören zum „Kern“, die anderen zur „Peripherie“ der Gruppe.

<sup>52</sup> S/2003 J15 steht enternungsmäßig zwischen Chaldene und S/2003 J10 der folgenden Gruppe.

<sup>53</sup> Die Pasiphae-Gruppe überlappt sich großräumig mit der vorhergehenden Carme-Gruppe.

**Himalia** (Jupiter VI; Geliebte zyprische Nymphe des Zeus, die er in Form eines Regengusses befruchtete; Namengeberin der Himalia-Gruppe, entdeckt am 3. Dezember 1904 Charles Dillon Perrine durch Fotos am Lick Observatorium), Gr. Halbachse 11.461.000 km (elfter Mond), Exzentrizität 0,16, Inklination gegen Äquatorebene 29,6°, Umlaufzeit 250,56d mit 3,3 km/s; siderische Rotation 7,8 h, Achsenneigung 0°, Durchmesser 170 km (größter irregulärer Jupitermond), Fläche 91.000 km<sup>2</sup> (Portugal 92.000), 14,6 mag (in Opposition), Albedo 0,04. Masse  $17 \times 10^{18}$  kg, Dichte 1630 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,062 m/s<sup>2</sup> (0,006 g), Fluchtgeschwindigkeit 102 m/s, Temperatur min. -149°. Graue Farbe, wie bei Asteroiden vom C-Typ. Vorhandensein von Wasser. Es scheint einen schwachen Himalia-Ring zu geben, entdeckt von der New Horizons - Sonde.

**S/2003 J 2**, entdeckt am 4. März 2003, Durchmesser 2 km, ist von den bisher bekannten 67 Monden der äußerste, er umkreist Jupiter retrograd in 29,5 Mill. km Entfernung, geht zu keiner Gruppe; er entfernt sich maximal 36 Mill km vom Planeten. In 40-50 Mill km Entfernung (1/3 AU) vom Jupiter dürfte das Jupitersystem definitiv enden.

**Jupitertrojaner:** Es gibt schätzungsweise 160.000 bis 240.000 Jupitertrojaner mit ca. 2 km Durchmesser, und 600.000 mit Durchmesser von ca. 1km. Bis Januar 2015 sind 6.178 von ihnen entdeckt worden, der erste von ihnen (**588 Achilles** an Jupiters L4-Punkt, im „Griechischen Camp“, 135 km groß: der sechstgrößte Jupitertrojaner) bereits am 22. Februar 1906 vom deutschen Astronomen Max Wolf. Der größte ist **624 Hektor** mit 225 km Durchmesser (370 × 200 km, liegt auch in L4) und wurde am 10. Februar 1907 vom deutschen Astronomen August Kopff entdeckt; er hat selbst einen 15 km großen Mond, **S/2006 (624) 1**, der ihn in 634 km Entfernung in 2,9 Tagen umkreist und im November 2011 entdeckt wurde. August Kopff entdeckte noch im selben Jahr am 17. Oktober 1907 im L5-Punkt (dem Trojanischen Camp) den fünftgrößten Trojaner **617 Patroklus** (141 km), 2001 stellte sich heraus, dass es ein Doppel-Planetoid ist, da 617 Patroklus und ein fast genauso großer Planetoid, **617 Patroclus I Menoitus** (112 km) in 4,3 Tagen retrograd um ihren 680 km entfernten gemeinsamen Schwerpunkt kreisen. Die beiden Trojaner haben geringe Dichte und sind daher vielleicht inaktiv gewordene Kometenkerne.

#### Weltraum-Missionen:

**Pioneer 10** (3. Dez. 1973): Vorbeiflug in 130.000 km Entfernung an obersten Wolkenschichten – Entdeckung der Strahlungszone.<sup>54</sup>

**Pioneer 11** (2. Dez. 1974): Vorbeiflug in 43.000 km Entfernung an obersten Wolkenschichten.<sup>55</sup>

**Voyager 1** (5. März 1979): Aufnahmen der großen Jupitermonde und Entdeckung drei neuer Monde.<sup>56</sup>

**Voyager 2** (9. Juli 1979): Vorbeiflug in 570.000 km Entfernung – Entdeckung des aktiven Vulkanismus auf Io.<sup>57</sup>

**Ulysses** (8. Februar 1992): Swingby um die Ekliptik zu verlassen und über die Sonnenpole zu fliegen.

**Galileo** (7. Dez 1995): die Sonde schwenkt in den Orbit ein; und eine abgekoppelte Tochtersonde dringt in die Jupiteratmosphäre ein und sendet bis zur Tiefe von 200 km Daten, aber keine Bilder; Galileo umkreist Jupiter bis zum gezielten Absturz (21. Sept. 2003).

**Cassini** (1. Okt. 2000) Swingby für den Weiterflug zum Saturn.

**New Horizons** (28. Februar 2007) Swingby für den Weiterflug zum Pluto.

**Juno** alias **Jupiter Polar Orbiter** (seit 4. Juli 2016): in einer polaren Umlaufbahn.

**Lucy** gestartet 16. Okt. 2021, soll an zwei Asteroiden und dann an Jupiter-Trojanern vorbeifliegen

**Juice** gestartet 14. April 2023, soll Kallisto und Europa vorbeifliegen und in eine Umlaufbahn um Ganymed einschwenken

<sup>54</sup> Pioneer 10 war am 2. März 1972 gestartet; lange nach dem Vorbeiflug an Jupiter (3. Dez. 1973) wurde am 22. Januar 2003 das letzte Signal der Sonde empfangen, in einer Entfernung von ca. 81 AU (≈12 Mrd. km) nach 31 Jahren, obwohl nur eine Mission von 21 Monaten geplant war. In 2 Millionen Jahren wird die Sonde nahe am Fixstern Aldebaran (67 Lichtjahre von uns entfernt) vorbeiziehen.

<sup>55</sup> Pioneer 11 war am 6. April 1973 gestartet; nach dem Vorbeiflug an Jupiter (2. Dez. 1974) flog die Sonde weiter zum Saturn, an den sie am 1. September 1979 in 21.000 km Entfernung passierte, am 30. November 1990 traf das letzte Signal ein, in einer Entfernung von 43,4 AU (≈ 6,5 Milliarden km). In 4 Millionen Jahren wird sie an Lambda Aquilae (Kopfstern des Adlers, 124 Lichtjahre von uns entfernt) vorbeifliegen.

<sup>56</sup> Voyager 1 war am 5. September 1977 gestartet; nach dem Vorbeiflug an Jupiter (5. März 1979) flog die Sonde zum Saturn weiter, den sie 11.11.1980 passierte; sie ist momentan noch immer aktiv und die am weitesten von der Erde entfernte Sonde. Am 14. Februar 1990 machte die Sonde aus 6 Mrd. km Entfernung ein Bild von der Erde, genannt „Pale Blue Dot“, welches von allen Erdbildern die aus der größten Entfernung gemachte Aufnahme ist. Zugleich wurden Bilder von den anderen Planeten (außer Mars und Merkur) gemacht, alle vom Standpunkt der Sonde oberhalb der Ekliptik. Momentan (März 2015) ist die Sonde ca. 130,656 AU (19,546 Milliarden km, ca 18 Lichtstunden) von der Erde entfernt und wird im Jahre 40.000 n. Chr. am Stern Gliese 445 (= AC+793888, einem roten Zwerg, momentan 17,6 Lichtjahre entfernt) im Sternbild Giraffe/Kleiner Bär im Abstand von 1,6 Lichtjahren vorbeifliegen.

<sup>57</sup> Voyager 2 wurde am 20. August 1977 (16 Tage vor Voyager1) gestartet, nach dem Vorbeiflug am Jupiter (9. Juli 1979) besuchte die Sonde hintereinander Saturn (25.08.1981) Uranus (24.01.1986) und Neptun (25.08.1989). Momentan (März 2015) ist die Sonde 109 AU (16 Mrd. km, ca. 15 Lichtstunden) von der Erde entfernt; sie fliegt auf keinen bestimmten Stern zu, passiert aber in 40.000 Jahren Ross 248 (momentan 10,3 Lichtjahre entfernt) im Sternbild Andromeda in einer Distanz von 1,7 Lichtjahren.

## 1.11. Saturn

**Saturn** (griech. *Kronos*; indisch *Shani*, bab. *Ninib/Ninurta*, spät/neubab. *Genna*, assyr. *Sag-Usch*, akkad. *Kajjamanu* „der Beständige/Regelmäßige“, persisch *Kayvan / Kewan*, äg. *Hor-ka-pet*, Stern des Horus, der Himmelsstier, chin. 土星 (*Tǔxīng*) Holzstern = jap. *Dosei* = viet. *Sao Tho*, altchin. *Zhenxing* = jap. *Chinsei* = viet. *Tran tinh*): vgl. Samstag, Saturday. Symbol ♄ (Sichel des Saturn)  
**Gr. Halbachse** 1,433 Mrd. km (9,582 AU; Perihel 9,048; Aphel 10,116, Exzentrizität 0,0557); Inklination 2,5°.



**Umlaufzeit** siderisch 29,5a, synodisch: 378d; 9,7 km/s; Erdabstand 7,97-11,08 AU.

**Rotation** 10h 47min, Achsenneigung 26,73°.

**Größe:** Ø 114.632 km (9 × Erde),<sup>58</sup> Oberfläche 42,7 Mrd km<sup>2</sup> (83,7 × Erde); 14,5" bis 20,1" ; 1,47 bis -0,24 mag, Albedo 0,47.

**Masse:** 5.7 × 10<sup>26</sup> kg (95 × Erde), Dichte 687 kg/m<sup>3</sup> (kleinste Planetendichte!) Schwerkraft: 10,44 m/s<sup>2</sup> (1,065g), Fluchtgeschwindigkeit 35,5 km/s.

**Atmosphäre:** Druck 20-200 kPa in Wolkenhöhe (= 0,2-2 × Erde)

ca. 96% Wasserstoff (H<sub>2</sub>), 3% Helium 0,4% Methan, 0,01% Ammoniak, 0,01% Wasserstoff-Deuterium (HD); 0,0007 Ethan, Aerosole: Ammoniak, Wassereis, und Ammonium-Hydrosulphit (NH<sub>4</sub>SH) - Eis.

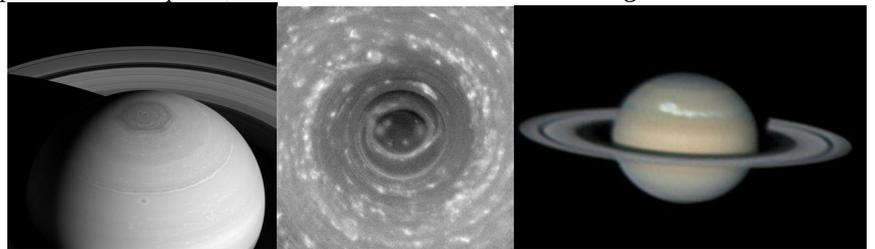
**Temperatur:** (bei 1 bar) -139°

**Innerer Aufbau:** ähnlich wie Jupiter (kleiner felsiger Kern wie bei der Erde, nur dichter, ca. 25.000 km, umgeben von einer dicken Schicht von metallisch-flüssigem Wasserstoff, es folgt eine Helium-gesättigte Schicht flüssigen molekularen Wasserstoffs, welcher mit zunehmender Höhe in gasförmigen Zustand übergeht, die letzten 1000 km sind reines Gas).

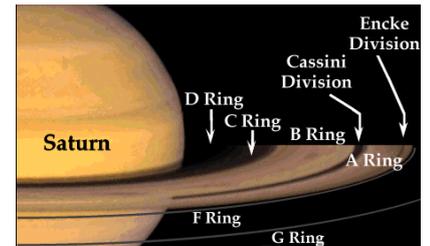
**Magnetfeld:** Saturns Magnetfeld ist schwächer als das des Jupiter: Am Äquator 20 Mikrotesla (vgl. Jupiter 400; Erde 30) und wie das der Erde ein Dipol. Einzigartig ist, dass das Magnetfeld perfekt symmetrisch ist, d.h. die Rotationsachse ist auch die magnetische Achse. Das magnetische Dipolmoment ist allerdings 600 × so groß wie auf der Erde; das des Jupiter ist allerdings wieder 40 × so groß wie das des Saturn; auch erzeugt Saturn Radiowellen, die für einen Empfang auf der Erde zu schwach sind. Der Mond Titan kreist im äußeren Bereich des Magnetfeldes und beliefert dieses mit Plasma von ionisierten Teilchen in Titans Atmosphäre; siehe auch Fußnote 6.

**Topologie:** Wie beim Jupiter farbige Wolkenbänder parallel zum Äquator, abwechselnde hellere und dunklere gelbe streifen.

Der Nullmeridian wird durch Rotation des Magnetfeldes festgelegt. Am Nordpol befindet sich ein nahezu regelmäßiges Wolken-Sechseck mit einem Durchmesser von fast 25.000 km; am Südpol ein permanenter Wirbelsturm mit einem „Auge“, der schon Milliarden Jahre alt sein kann; in der Nordhälfte ist zeitweise ein „weißer Fleck“ zu sehen, ähnlich dem „roten Fleck“ auf Jupiter.



**Ringe:** Ausgedehntestes planetares Ringsystem des Sonnensystems, entdeckt 1610 durch Galileo Galilei (der den Ring als „Ohren“ des Saturn beschreibt) und 1655 durch Christian Huygens (der den Ring richtig als „Ring“ erkennt), bestehend aus Partikeln von Mikrometer- bis Metergröße, fast ausschließlich aus Wassereis, mit Spuren felsigen Materials (im Gegensatz zu den Staubringen des Jupiter). Es gibt über 100.000 einzelne Ringe, die sich durch ihre Lage, Zusammensetzung und Farbe unterscheiden und oft durch Lücken voneinander getrennt; es gibt radiale speichenartige Strukturen. Der *Phoebe-Ring* ist um 27° gegenüber dem Hauptringsystem geneigt und rotiert wie der Saturnmond Phoebe retrograd.



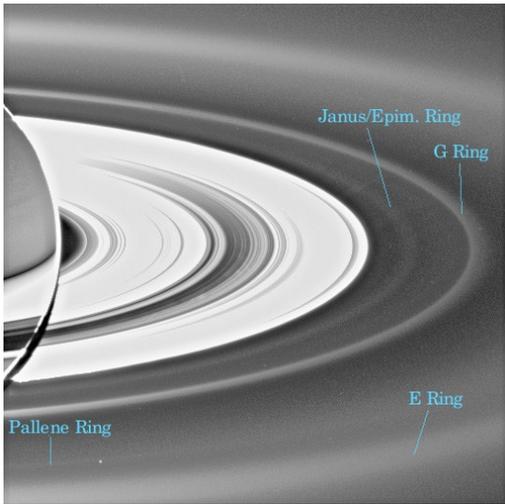
<sup>58</sup> Dies ist der mittlere Durchmesser; Äquatordurchmesser 120.536 km, Podurchmesser 108.728 km (Differenz 11808 km, also Abplattung 10 %). Als Oberfläche gilt das Niveau mit 1 Bar Atmosphärendruck. Bei 2,5 mal schnellerer Rotation würde die Zentrifugalkraft am Äquator die Gravitation ausgleichen!



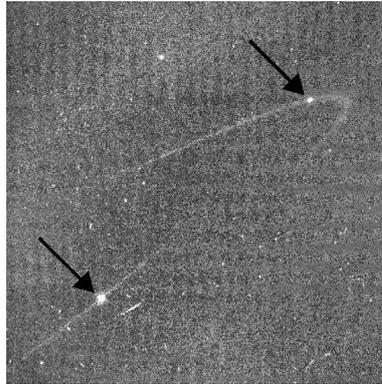
Die Höhe der Ringe ist sehr klein (10-15 Meter; maximal 4 km), aber ihr Durchmesser kann über Hunderttausende km betragen; sie sind daher vergleichbar mit einem Blatt Papier, das 10 Km lang ist. Die gewöhnlichen Ringe sind rechtläufig und liegen in etwa in der Äquatorebene des Saturn. Sieben Ringe werden nach der Reihenfolge ihrer Entdeckung mit großen Buchstaben bezeichnet, von innen nach außen sind es: D,C,B,A,F,G,E.

- oberste Wolkendecke befindet sich 60.330 km vom Zentrum des Saturn
- innerster Ring (*D-Ring*, 1969 von Pierre Guerin postuliert, und 1980 von Voyager 1 eindeutig gefunden) beginnt ca. 7000 km über der Wolkendecke und umfasst einen Kreisring in Äquatorebene mit Radien 67.000-74.700 km (7700 km dick),
- *C-Ring* (durchsichtiger „*Florring*“, dunkler „*Kreppring*“, „*Crêpe-Ring*“ entdeckt 1850 von William und George Bond; nur 5m dick) reicht von 74.700-92.000 km (17.300 km breit), er enthält bei 77.883 km die *Colombo-Lücke* (150 km) und in ihr das *Titan-Ringlet* (in Orbitalresonanz mit dem Mond Titan) und bei 87.500 km die *Maxwell-Lücke* (270 km) und in ihr das *Maxwell Ringlet*.
- *B-Ring* (massivster und hellster, „brightest“ Ring, enthält keinerlei Lücken) von 92.000-117.500 km (25.000 km breit), in ihm läuft bei 117.100 km (ca. 1,943 Saturnradien) der innerste Saturnmond *S/2009 S 1* (Ø 300-400 m, Umlaufzeit 11h 20min 23s)
- *Cassini-Teilung* (1675 durch Giovanni Cassini entdeckt) zwischen A/B von 117.500-122.300 km,
- *A-Ring* 122.300–136.800 km (14.500 breit, 10-30m dick); darin die am 7 Januar 1888 von Keeler entdeckte *Encke-Teilung* von 133.400-133.700 km (300 km breit) und *Keeler-Teilung* (42 km) bei 136.5050 km; in der Mitte der Encke-Teilung bei 133.583 km läuft ein Ringlet und darauf Mond *Pan* (Ø 28 km, Umlaufzeit 0,575d); in der Keeler-Teilung läuft der Mond *Daphis* (Ø 8km, Umlaufzeit 0,594d)
- *Roche-Teilung* zwischen A/F-Ring, 136.800 -140.300 km; darin die Monde *Atlas* (137.640 km), in dessen Spur ein Atlas-Ringlet liegt, und *Prometheus* (139.350 km)
- *F-Ring* (1979 von Pioneer 11 entdeckt) 140.300-140.400 km (100 km breit), umgeben von Prometheus und *Pandorra* (141.700 km),
- Zwischen *F- und G-Ring* die Monde *Epimetheus* (151.422 km) und *Janus* (151.472 km) mit dem *Janus-Epimetheus-Ring*
- *G-Ring* (1980/81 von Voyager 1-2 entdeckt) 165.800-173.800 (8000 km breit), bei 167.500 *Aegaeon* (Ø 600m, Umlaufzeit 0,8d)
- *Methone-Ringbögen* (194.440 km) und *Anthe-Ringbögen* (197.700 km) und *Pallene-Ring* (212.280 km)
- *E-Ring* (1967 von Walter Feibelman auf einer 1966 gemachten Foto entdeckt, breitester Ring) 180.000-480.000 km (300.000 km breit!) mit Ausläufern bis 1.040.000 km (kurz vor der Titanbahn) der äußerste Ring hat einen Durchmesser von 960.000 km.

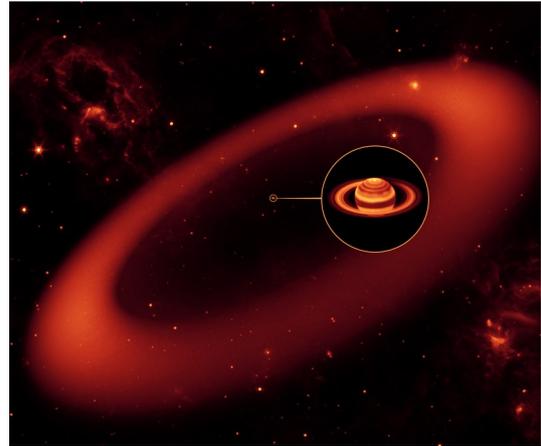
Später wurden weitere Ringe entdeckt, welche aber nicht mit Buchstaben, sondern nach den Monden benannt wurden, welche die gleiche Umlaufbahn haben: *Janus-Epimetheus*, *Pallene* und *Phoebe*. Neben den Ringen gibt es noch dünnere „Ringlets“ und zusätzlich zwei Bögen als unvollständige Ringe, die aus Staub aus den Monden *Anthe* und *Methone* entstanden sind.

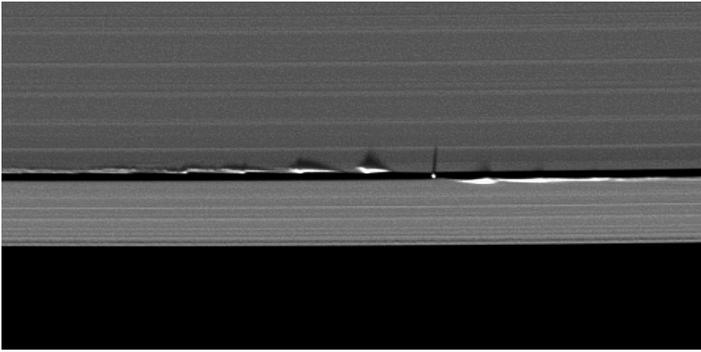


Methone- und Anthe-Ringbögen

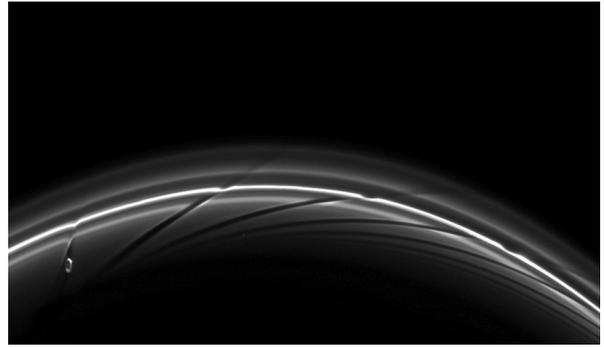


Phoebe-Ring (nur infrarot sichtbar)





Schäfermond Daphnis erzeugte Wellen im A-Ring



Schäfermond Prometheus erzeugt Kanäle im F-Ring

Saturnringe in hoher Auflösung: Voyager 2 am 22. 08. 1981 aus 4 Mill. km; B-Ring mit „Speichen“)

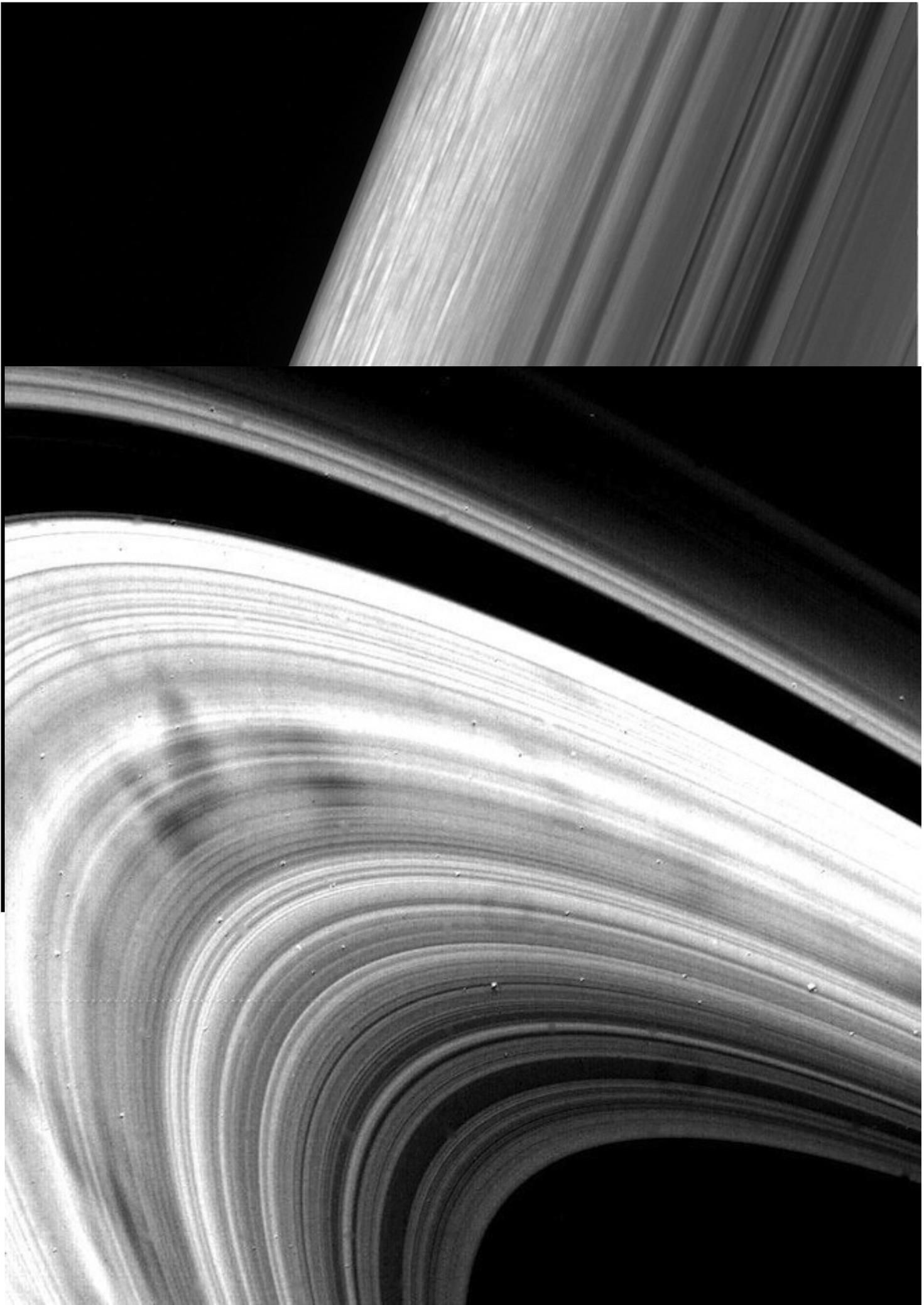


Bild von der Außenkante des B-Rings des Saturn, aufgenommen von der Raumsonde Cassini am 18. Dezember 2016 (bis dato detailreichstes Bild hiervon).

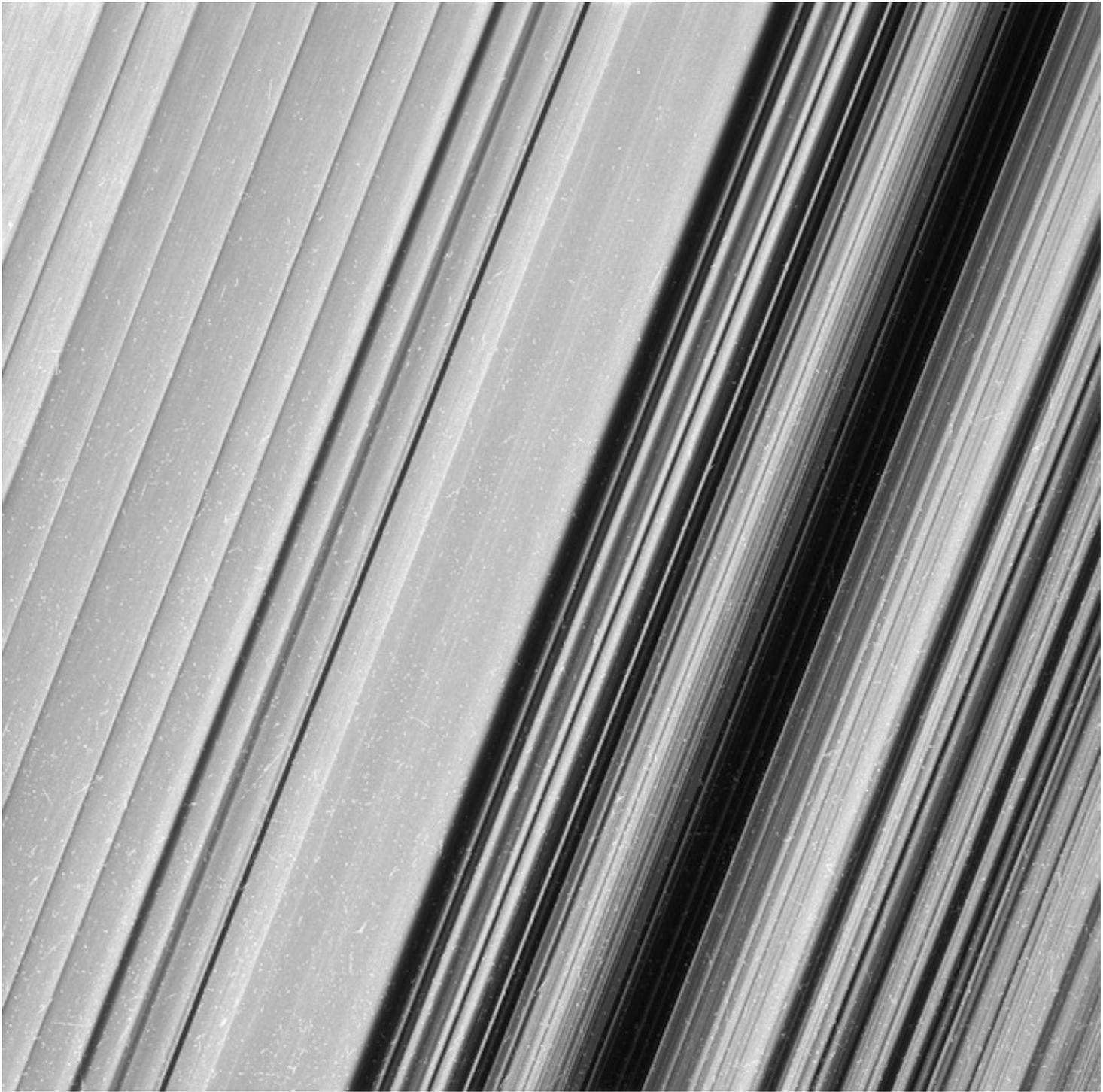
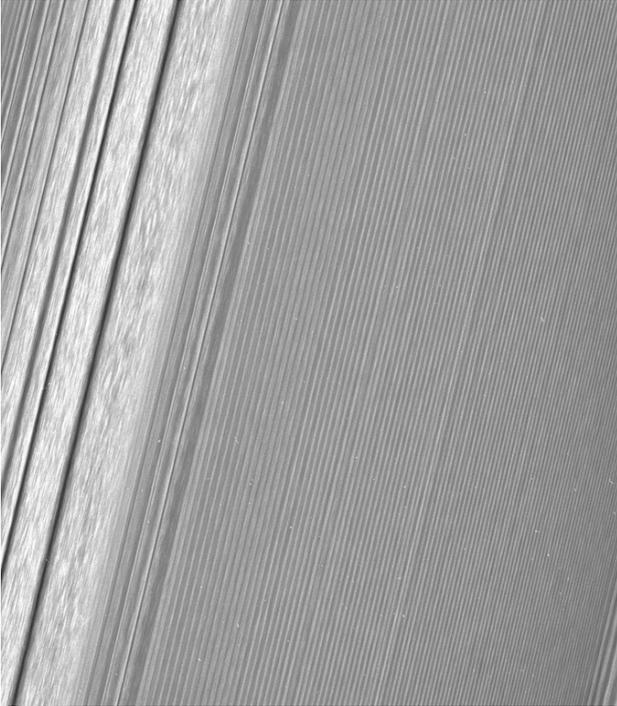
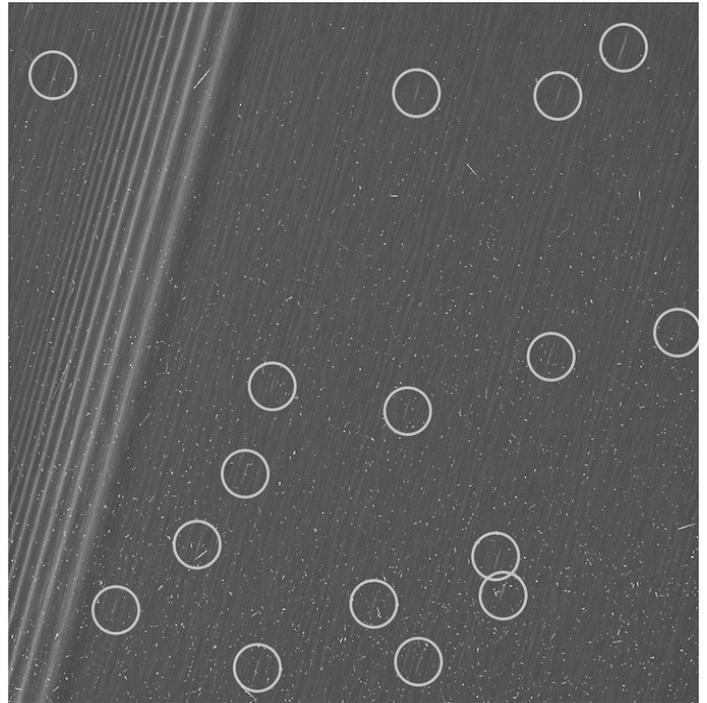


Bild des äußeren B-Ringes, doppelt so detailreich wie bisher (sichtbar sind Strukturen bis 550 Meter)



A-Ring mit Dichtewelle zur Linken



A-Ring mit zahlreichen „Moonlets“

**Monde:** Der Saturn hat 62 Monde mit bestätigtem Orbit (und über 150 kleinere „Moonlets“), von den 62 Monden haben 53 einen Namen, und 13 haben einen Durchmesser größer als 50 km, nur 7 sind groß genug um ellipsoide Form zu haben, und nur zwei von ihnen, Titan und Rhea, sind im hydrostatischen Gleichgewicht (haben runde Gestalt). Die Monde teilt man in „Kleine innere Monde“, „Hauptmonde“ und „äußere Monde“ ein:

### I. 12 KLEINE INNERE MONDE:

**S/2009 S 1** (vom Cassini Imaging Science Team am 26. Juli 2009 entdeckt; Gr. Halbachse 117.100 km (ca. 1,943 Saturnradien); Größe Ø 30-40 km;<sup>59</sup> Umlaufzeit 11h 20min 23s; kleinster nummerierter Mond im Sonnensystem.

**Pan** (Saturn XVIII, in der Encke-Teilung des A-Rings, „Schäfermond“, entdeckt am 16. Juli 1990 von Mark Showalter auf Aufnahmen von Voyager 2 vom 22. August 1981, Gr. Halbackse 133.584 km, Größe Ø 28 km, Umlauf 0,575d.

**Daphnis** (Saturn XXXVI, in der Keeler-Teilung des A-Rings, „Schäfermond“, entdeckt am 6. Mai 2005 vom Cassini Imaging Science Team), Gr. Halbackse 136.505 km, Größe Ø 8 km, Umlauf 0,594d.

**Atlas** (Saturn XV, in der Roche-Teilung zwischen A- und F-Ring, von Richard Terrile am 12. November 1980 auf Voyager-Fotos entdeckt; zwischen 1980 und 2004 verloren, im Juni 2004 von Cassini wiederentdeckt; Gr. Halbachse 137.670 km; Größe Ø 30 km; glatter Mond); Umlaufzeit 0,6d.

**Prometheus** (Saturn XVI, „innerer Schäfermond“ des F-Rings in der Roche-Teilung, entdeckt Oktober 1980 von S. Collins und D. Carlson bei der Auswertung von Voyager 1 – Bildern kurz vor dem Vorbeiflug an Saturn am 31. Okt. bekannt gemacht), Gr. Halbachse 139.380 km, Größe Ø 86 km, Fläche 23.300 km<sup>2</sup> (> Israel) Umlaufzeit 0,61d.

**Pandorra** (Saturn XVII, „äußerer Schäfermond“ des F-Rings, entdeckt Oktober 1980 von S. Collins und D. Carlson bei der Auswertung von Voyager 1 – Bildern kurz vor dem Vorbeiflug an Saturn am 31. Okt. bekannt gemacht), Gr. Halbachse 141.720 km, Größe Ø 80,6 km, Fläche 21.000 km<sup>2</sup> (> Israel) Umlauf 0,63d.

**Epimetheus** bzw. **Janus** (Saturn XI bzw. X, Monde des Janus-Epimetheus-Rings zwischen F- und G-Ring, entdeckt am 18. bzw. 15. Dezember 1966 von Walker/Larson/Fountain bzw. Audouin Dollfus), Gr. Halbachse 151.410 bzw. 151.460 km, Größe Ø 113 bzw. 179 km, Fläche 40.400 bzw. 100.400 km<sup>2</sup>, Umlaufzeit 0,61 bzw. 0,69d. Es findet regelmäßig ein Bahntausch der beiden koorbitalen Monde aus, so dass sie abwechselnd die größere Entfernung vom Saturn haben.

**Aegaeon** (Saturn LIII, am 3. März 2009 entdeckt vom Cassini Imaging Science Team), Gr. Halbachse 167,500 km, Größe Ø 600 m, Umlaufzeit 0,8d, verläuft im G-Ring.

Die **Alkyoniden-Gruppe** (Anthe, Methone, Pallene sind Töchter des Riesen Alkyoneus): im E-Ring (nahe dem Innenrand):

**Methone** (Saturn XXXII, entdeckt am 16. August 2004 von Sébastien Charnoz auf Fotos von Cassini vom 1. Juni 2004); Gr. Halbachse 194.440 km, Größe Ø 3 km, Umlaufzeit 1,01d; auf ihrer Bahn liegt der *Metone-Ringbogen*.

**Anthe** (auch Saturn XLIX, entdeckt am 20. Mai 2007 vom Cassini Imaging Science Team), Gr. Halbachse 197.700 km, Größe Ø 2 km, Umlaufzeit 1,03d; auf ihrer Bahne liegt der *Anthe-Ringbogen*

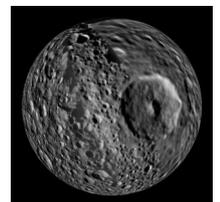
**Pallene** (Saturn XXXIII, entdeckt am 16. August 2004 von Sébastien Charnoz auf Fotos von Cassini vom 1. Juni 2004); Gr. Halbachse 212.280 km, Größe Ø 5 km, Umlaufzeit 1,15d; auf ihrer Bahn liegt der *Pallene-Ring*.

### II. 8 HAUPTMONDE (und 4 weitere: je 2 co-orbitale Begleiter zweiter Hauptmonde; also 12 Monde)

**Mimas** (Saturn I, benannt nach dem von Herakles erschlagenen Giganten Mimas, entdeckt am 17. September 1789 durch Wilhelm Herschel), Gr. Halbachse 185.520 km (3 Saturnradien, 125.252 km über Wolkenobergrenze; am inneren Rand des E-Rings, hält die Cassini-Teilung zwischen A/B-Ring materiefrei, Periapsis 181.770, Apoapsis 189.270), Exzentrizität 0,02, Inklination 1,566°, Umlaufzeit 0,94d mit 14,332 km/s, gebundene Rotation; Achsenneigung 0.005°, Größe Ø 396,6 km (siebtgrößter Saturnmond, kleinster unter den runden), Fläche 495.000 km<sup>2</sup> (Spanien 505,992), 12,8 mag, Albedo 0,969 (Eisoberfläche !), Masse 1,7 10<sup>20</sup> kg, Dichte 1608 kg/m<sup>3</sup>; Schwerkraft 0,0636 m/s<sup>2</sup> (0,6 % Erde) Fluchtgeschwindigkeit 159 m/s, Temperatur -209°.

Er gilt als der kleinste bekannte astronomische Körper, der durch seine eigene Schwerkraft eine runde Form besitzt, sich also im hydrostatischen Gleichgewicht befindet. Stark verkratert, größter Krater ist Herschel (mit Durchmesser 130 km, der ein Drittel des Monddurchmessers ausmacht). Sein Kraterwall ist fast 5 km hoch, sein Boden liegt teilweise 10 km unter dem umgebenden Gelände, und sein Zentralberg erhebt sich 11 km über den Boden. Damit ist er einer der höchsten Zentralberge im Sonnensystem.

**Enceladus** (Saturn II, benannt nach dem von Aphrodite getöteten Giganten Enceladus, entdeckt am 28. August 1789 durch Wilhelm Herschel), Gr. Halbachse 237.948 km (4 Saturnradien, d.h. Orbit im dichtesten Bereich des E-Ringes, des äußersten Saturnringes), Exzentrizität 0,005, Inklination 0,02°, Umlaufzeit 1,3d mit 12,6 km/s, gebundene Rotation;

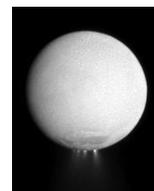


<sup>59</sup> Dies wurde daraus erschlossen, dass er 150-200 m über die Ringebene hinausragte.

Achsenneigung  $0^\circ$ , Größe  $\varnothing$  220 km (sechstgrößter Saturnmond),  $800.000\text{km}^2$  (Mosambik 801,590; ebenso ca. Frankreich plus GB ohne Außengebiete), 11,7 mag, Albedo 0,99 (größte Albedo im Sonnensystem, da der Mond großflächig mit reinem Wassereis belegt ist!), Masse  $10^{20}$  kg, Dichte  $1608\text{ kg/m}^3$ ; Schwerkraft  $0,114\text{ m/s}^2$ , Fluchtgeschwindigkeit  $239\text{ m/s}$ , Temperatur  $-240^\circ$  (min),  $-198^\circ$  (mittel),  $-128^\circ$  (max), Enceladus hat im Vergleich zu anderen Monden (außer Titan) eine bedeutsame Atmosphäre (Druck örtlich signifikant verschieden; 91% Wasserdampf, 4% Stickstoff, 3,2% Kohlendioxid, 1,7% Methan), ihre Quellen sind Vulkanismus, Geysire und von der Oberfläche oder dem Inneren entströmende Gase sein.



Er ist ein Eismond und zeigt kryovulkanische Aktivitäten, deren sehr hohe Fontänen aus Wassereispartikeln auf der südlichen Hemisphäre zur Atmosphäre beitragen eine dünne Atmosphäre erzeugen. Diese Fontänen speisen wahrscheinlich auch den E-Ring des Saturn. Im Untergrund von Enceladus befindet sich ein ausgedehnter Ozean, welcher die Quelle für einen dort erfolgenden Kryovulkanismus bildet. Auf dem Grund dieses Ozeans spielen sich hydrothermale Aktivitäten ab, die dazu führen, dass das Wasser auf dem Ozean-Grund eine Temperatur von min.  $90^\circ$  Grad Celsius erreicht. Der Mond ist einer der erfolgversprechendsten Orte für die Suche nach außerirdischen Leben.

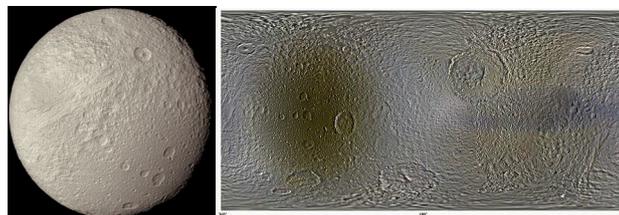


Am 12. März 2008 passierte Cassini Enceladus in einer Distanz von nur 23 Kilometern (geringster Abstand beim Vorbeiflug einer Raumsonde in der Geschichte der Raumfahrt).



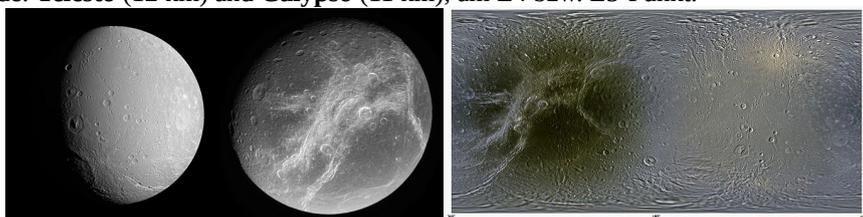
Enceladus (vorn) und Tethys (hinten) in einer Linie, aufgenommen von Cassini (2015)

**Tethys** (Saturn III, Titanin, Fraudes Okeanos. entdeckt am 21. März 1684 von Giovanni Cassini), Gr. Halbachse  $294.619\text{ km}$ , Exzentrizität  $0,0001$ , Inklination  $1.12^\circ$  (zum Saturnäquator), Umlaufzeit  $1,9\text{d}$  mit  $11,35\text{ km/s}$ ; gebundene Rotation; Achsenneigung  $0,034^\circ$ , Größe  $\varnothing$   $1062,2\text{ km}$  (fünftgrößter Saturnmond),  $3,5\text{ Mill. km}^2$  (Indien  $3,2$ ),  $10,2\text{ mag}$ , Albedo  $0,8$  (die „führende“ = vorangehende Hemisphäre ist um 10-15% heller als die nachfolgende);



Masse  $6 \cdot 10^{20}\text{ kg}$  (größer als die Masse alle kleineren Monde zusammen), Dichte  $984\text{ kg/m}^3$  (etwas kleiner als Wasser: folglich scheint der Mond fast ausschließlich aus Wassereis zu bestehen), Schwerkraft  $0,147\text{ m/s}^2$  (1,5% Erde), Fluchtgeschwindigkeit  $394\text{ m/s}$ , Temperatur  $-187^\circ$ . Tethys hat zwei co-orbitale Monde: **Telesto** ( $12\text{ km}$ ) and **Calypso** ( $11\text{ km}$ ), am L4 bzw. L5-Punkt.

**Dione** (Saturn IV, Titanin, Mutter der Aphrodite, entdeckt am 21. März 1684 von Giovanni Cassini), Gr. Halbachse  $377.396\text{ km}$ , Exzentrizität  $0,002$ , Inklination  $0.02^\circ$  (zum Saturnäquator), Umlaufzeit  $2,7\text{d}$  mit  $10,03\text{ km/s}$ ; gebundene Rotation; Achsenneigung  $0,006^\circ$ , Größe  $\varnothing$   $1123,4\text{ km}$  (viertgrößter Saturnmond), Fläche  $3,93\text{ Mill.}$

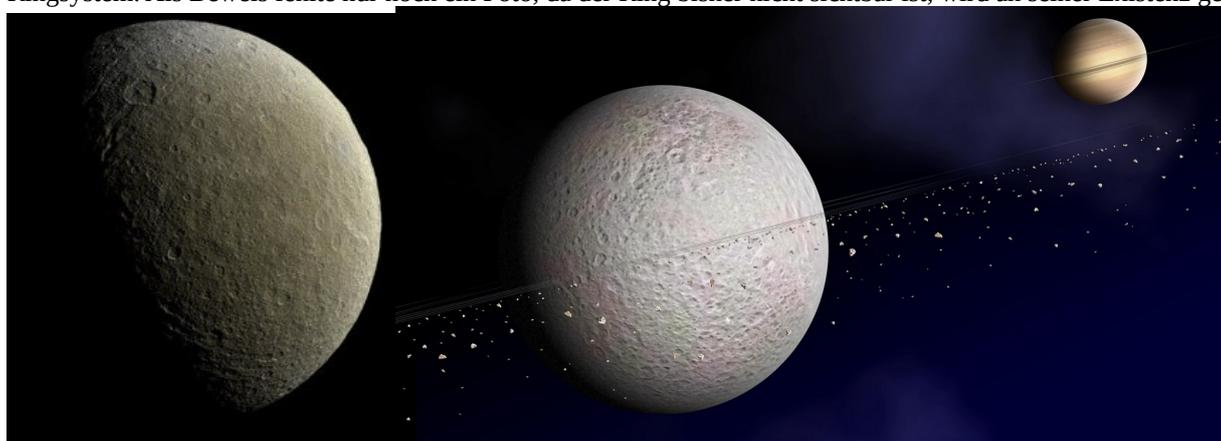


km<sup>2</sup> (Indien + Pakistan 4,05), 10,4 mag (sehr hell) Albedo 0,55 (dunkel); Atmosphäre aus ionisiertem Sauerstoff (90.000 Ionen / m<sup>3</sup>, so wie Erdatmosphäre in 480 km Höhe. Masse 10<sup>21</sup> kg (größer als die Masse alle kleineren Monde zusammen), Dichte 1476 kg/m<sup>3</sup> (drittgrößte Dichte nach Titan und Enceladus), Schwerkraft 0,22 m/s<sup>2</sup> (2,2% Erde), Fluchtgeschwindigkeit 512 m/s, Temperatur -186°. Hat flüssiges Material unter der Oberfläche. Auffällige helle Streifen auf der nachfolgenden (dunkleren) Hemisphäre. Dione hat zwei co-orbitale Monde: **Helene** (= Saturn XII, 18 km) and **Polydeuces** (2-3 km), am L4 bzw. L5-Punkt.

**Rhea** (Saturn V, Frau des Kronos=Saturn, entdeckt am 23. Dezember 1672 von Giovanni Domenico Cassini), Gr. Halbachse 527.108 km, Exzentrizität 0,001, Inklination 0.345° (zum Saturnäquator), Umlaufzeit 4,5d mit 8,48 km/s; gebundene Rotation; Achsenneigung 0°, Durchmesser 1528,6 km (zweitgrößter Saturnmond; zweitgrößter Mond im Sonnensystem), Fläche 7,3 Mill. km<sup>2</sup> (7,7 Mill. Australien), 9,6 mag, Albedo 0,65; Masse 2,3 × 10<sup>21</sup> kg, Dichte 1233 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,26 m/s<sup>2</sup> (2,7 % Erde), Fluchtgeschwindigkeit 636 m/s, Temperatur -200°; extrem dünne Atmosphäre aus Sauerstoff und Kohlendioxid



Rhea hat möglicherweise einen eigenen Ring. In Messergebnissen der Raumsonde Cassini aus dem Jahr 2005 hat eine Astronomengruppe Hinweise auf ein Ringsystem aus Staub und bis zu einem Meter großen Gesteinsbrocken um den Saturnmond gefunden. Die Messgeräte der Sonde haben in bestimmten Nahbereichen von ihm eine Konzentration von Staubpartikeln und dafür eine starke Verringerung der Elektronen von Saturns Magnetosphäre registriert. Rhea wäre damit der erste Mond mit einem Ringsystem. Als Beweis fehlte nur noch ein Foto, da der Ring bisher nicht sichtbar ist, wird an seiner Existenz gezweifelt.



hochauflösendes Cassini-Bild

künstlerische Darstellung des hypothetischen Rhea-Rings

**Titan** (Saturn VI, oranger Mond, Titanen = Göttergeschlecht, das vor den olympischen Göttern herrschte, entdeckt am 25. März 1655 von Christiaan Huygens), Gr. Halbachse 1.221.870 km, Exzentrizität 0,0288, Inklination 0.35° (zum Saturnäquator), Umlaufzeit 15,9d mit 5,57 km/s (Die Umlaufbahn von Titan liegt innerhalb eines ca. 1 Mio. km breiten Ringes aus ungeladenem Wasserstoff, in dem auch Sauerstoff vorkommt; der Wasserstoff stammt wohl aus der Titanatmosphäre, der mit 1 kg/s ausströmt); gebundene Rotation; Achsenneigung 0°, Durchmesser 5152 km (0,4% Erde; 0,8% Mars; 149% Mond; 106% Merkur, aber nur 40% so massiv wie Merkur); größter Saturnmond; und zweitgrößter Mond im Sonnensystem nach Jupitermonde Ganymed mit 5268 km; zunächst dachte man: Titan ist der größter Mond mit 5550 km,



aber nach Entdeckung der hohen Atmosphäre durch Voyager 1 im Jahre 1980 erkannte man, dass Titan kleiner ist als gedacht; Fläche 83 Mill. km<sup>2</sup> (Afro-Eurasien 85 Mill.), 8,4 mag, Albedo 0,22, Masse 1,3×10<sup>23</sup> kg (über 95% der Masse aller Saturnmonde); Dichte 1880 kg/m<sup>3</sup> (höchste Dichte aller Saturnmonde); Schwerkraft 1,35 m/s<sup>2</sup> (13,8 % Erde), Fluchtgeschwindigkeit 2,6 km/s, Temperatur -179°; Atmosphäre (einziger Mond mit einer dichten Atmosphäre): auf der Oberfläche ist die Titan-Atmosphäre, etwa fünfmal dichter und der Druck etwa 50 % höher als auf der Erde (1,467 bar), mit 95% Stickstoff, 5% Methan (al. 98,4% Stickstoff, 1,6 % Methan und Argon, Spuren organischer Verbindungen). Titans Atmosphäre reicht 10× wo weit in den Weltraum wie die irdische und die Troposphäre reicht bis 44 km hinauf. Es gibt Wolken, die überwiegend aus Methan, aber auch aus Ethan und anderen Kohlenwasserstoffen zusammengesetzt sind und auf die Oberfläche abregnen.

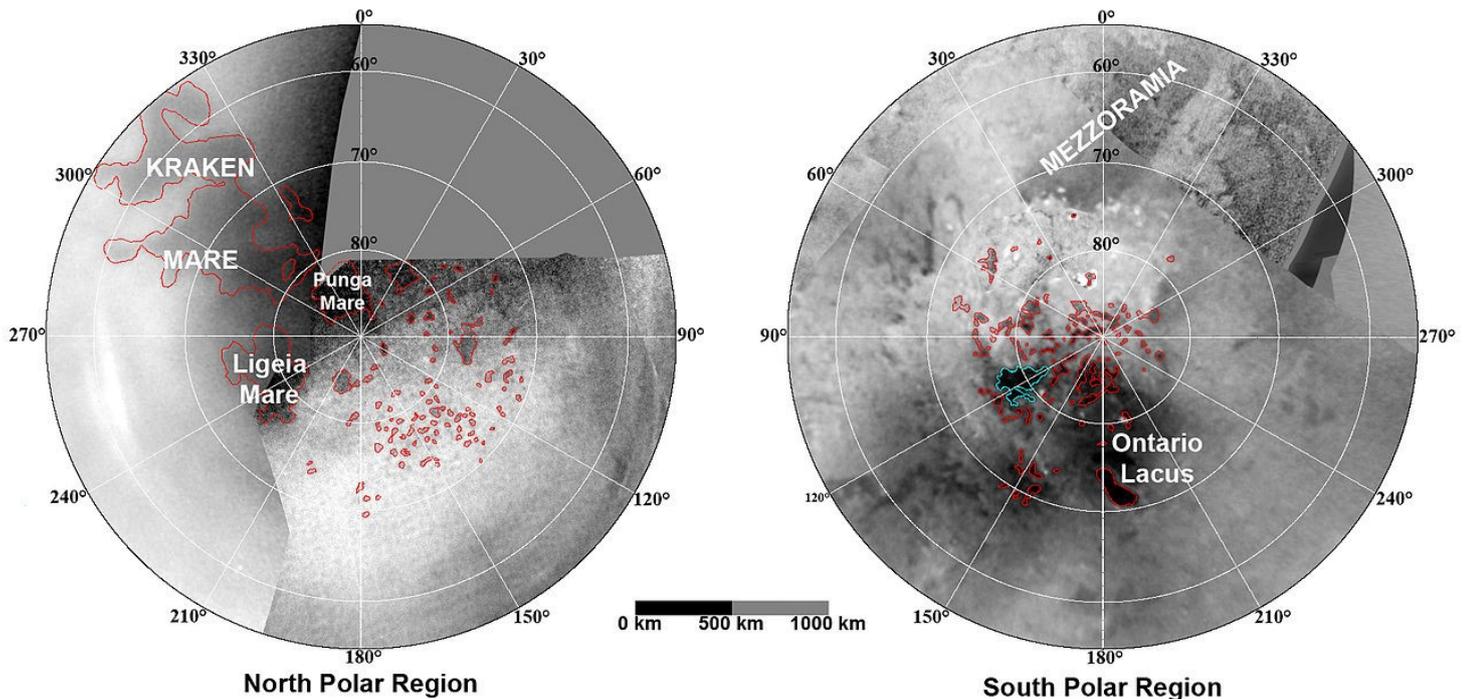
Topologie: Die Zusammensetzung der Oberfläche ist komplex. Cassinis Radar hat auf Titan viel weniger Einschlagkrater gefunden, als (auf gleiche Fläche bezogen) auf anderen Monden und Planeten im Sonnensystem. In der dichten Atmosphäre zerbersten und verglühen viele Objekte, so dass die Anzahl der einschlagenden Objekte von vornherein in etwa halbiert wird. Auch werden frische Einschlagkrater sehr bald von dem beständigen Wind mit Partikeln zugeweht, die durch Zusammenlagerung von aus der Atmosphäre ausgefallenen Tholinen (organische Moleküle, die als Vorläufer der Bausteine des Lebens gelten, die an einem typischen Spektrum erkannt werden, deren Aufbau aber noch unklar ist) entstanden sind.<sup>60</sup> Dieser Effekt und der Methanregen formen die Oberfläche

<sup>60</sup> Carl Sagan entdeckte in der Atmosphäre des Saturnmonds Titan das von ihm so genannte „Tholin“: eine Substanz, die er als rötlichen organischen Bestandteil von Pla-

vergleichsweise schnell und führen zu einer geologisch jungen Oberfläche. Die Oberfläche ist allgemein sehr flach. Höhenunterschiede von mehr als 150 m und gebirgsähnliche Züge kommen selten vor. Im Gegensatz zur Plattentektonik auf der Erde entstanden die Gebirge Titans vermutlich durch Schrumpfung des Mondes, welche durch Auffaltung und Verkürzung der Kruste Gebirgszüge entstehen lässt.<sup>61</sup> Cassini-Huygens hat Wassereis entdeckt, das bei den niedrigen Temperaturen die Konsistenz von Silikatgestein hat und teilweise von Tümpeln oder Seen aus flüssigem Methan bedeckt ist. Es wird angenommen, dass auf der Oberfläche Kohlenwasserstoffe existieren, die bisher noch nicht im Labor hergestellt werden konnten.

Entlang des Äquators erstreckt sich über 4500 Kilometer (flächenmäßig so groß wie Australien) die helle Region *Xanadu*, die eine äußerlich einer durch Wind und Wasser geprägten irdischen Landschaft gleicht. Sie wird von bis zu 2000 m hohen Bergrücken aus porösem Wassereis (mit Höhensystemen), das von Methanregen durch Auswaschung gebildet wurde.

In den dunklen äquatorialen Gebieten, wo zunächst Kohlenwasserstoff-Ozeane vermutet wurden, existieren große Wüstengebiete mit 150 m hohen und hunderte Kilometer langen „Dünen“, wofür der stetige Wind auf Titan verantwortlich ist. Die Dünen bestehen aus bis zu 0,3 mm großen Partikeln, deren Zusammensetzung noch nicht geklärt ist. In Frage kommt Wassereis oder organische Feststoffe.<sup>62</sup>



In den beiden Polarregionen finden sich auf den Radaraufnahmen größere Methanseen, die von Flüssen gespeist werden. Die drei größten Seen Kraken Mare, Ligeia Mare und Punga Mare werden als „Mare“ bezeichnet und erreichen mit Flächen bis über 100.000 Quadratkilometer die Dimensionen großer irdischer Binnenseen und -meere (zum Vergleich: Lake Superior 82.100 Quadratkilometer). Am Südpol liegt der größte „See“ Ontario Lacus als bislang einziger Methansee auf der südlichen Hemisphäre; in ihm wurde Ethan nachgewiesen und er enthält vermutlich weitere Alkane. Der Anteil der Seeflächen beträgt in der südlichen Hemisphäre nur 0,4 % in der nördlichen etwa 10 %.

Auswertungen von Radarmessungen zeigten 2009, dass der Ontario Lacus spiegelglatt zu sein scheint. Die Variationen in der Höhe betragen zum Zeitpunkt der Messung weniger als 3 mm. Das erhärtet den Verdacht, dass der Ontario Lacus tatsächlich aus flüssigen Kohlenwasserstoffen und nicht aus getrocknetem Schlamm besteht. Es zeigte sich damit auch, dass es an der Oberfläche relativ windstill war. Die Tiefe des zum größten Teil mit Methan gefüllten „Ligeia Mare“ wurde mit Hilfe von Cassinis Radar zu 170 m bestimmt. Zu den kleineren Seen zählen der Feia Lacus, der Kivu Lacus, der Koitere Lacus und der Neagh Lacus.

Die Flüssigkeiten in den seeähnlichen Gebilden sind relativ durchsichtig, so dass ein Mensch – würde er an einem solchen Ufer stehen – in diese „Gewässer“ wie in einen klaren irdischen See hineinblicken könnte. Nach Berechnungen der NASA übertrifft der Vorrat an

netenoberflächen beschrieb und für die orange-rote Farbe von Titans Atmosphäre verantwortlich ist. Tholin wurde auch auf dem Neptunmond Triton, dem Pluto Ixion und auf Kometen, Centauren und Eismonden nachgewiesen, jedoch nicht auf der Erde. Außerhalb unseres Sonnensystems wurde der Stoff im Jahr 2007 in der Staubscheibe um den Stern HR 4796A (8 Millionen Jahre alt, 220 Lichtjahre von der Erde entfernt) gefunden.

Eine Reihe von Bakterien sind in der Lage, Tholine als Kohlenstoffquelle zu nutzen. Daher vermutet man, dass sie in der Frühgeschichte der Erde eine Rolle bei der Entstehung und dem Stoffwechsel der ersten Mikroorganismen spielten.

<sup>61</sup> Ein Forscherteam um Giuseppe Mitri am Caltech kam durch Computersimulationen zum Schluss, dass der Titan seit seiner Entstehung vor 4,5 Milliarden Jahren kontinuierlich schrumpfte. Dabei gingen sie davon aus, dass der Kern von Titan nie sehr heiß war und daher eine relativ homogene Mischung aus Eis und Gestein darstellt. Die langsame Abkühlung des Mondes sorgt dafür, dass Teile des unter der Eiskruste liegenden Ozeans allmählich gefrieren und dabei die Dicke der äußeren Eiskruste ebenso wächst wie der Mantel eines unter dem Ozean liegenden Hochdruckeises. Dadurch kommt es zum Volumenschwund des Ozeans und die Oberfläche der Eiskruste legt sich in Falten. Laut der Simulation des Teams um Mitri müsste sich der Radius des Mondes innerhalb von 4,5 Milliarden Jahren um sieben Kilometer verringert haben; das sind, bei dem heutigen Radius von 2575 Kilometern, etwa 0,3 Prozent.

<sup>62</sup> Nach einer Hypothese von Donald Hunten an der Universität von Arizona könnten sie aus Ethan bestehen, das an feinste Staubpartikel gebunden ist. Das würde auch erklären, warum sich hier keine Kohlenwasserstoff-Ozeane gebildet haben.

flüssigen Kohlenwasserstoffen auf Titan den der Erde um das Hundertfache. Der atmosphärische Kreislauf, das Herabregnen, Sammeln und Fließen von Kohlenwasserstoffen prägte die eisige Oberfläche in überraschend ähnlicher Weise, wie auf der Erde Wasser die Silikatgesteine formt (flüssiges Methan etwa schneidet sich erosiv in die Eisoberfläche ein und bildet ein hügelig-bergiges Relief; auf der Erde würde das eine (tektonische) Hebung der erodierten Gebiete über die durchschnittliche Oberflächenhöhe hinaus implizieren; das dürfte auf Titan nicht anders sein).

Ein Rätsel gibt den Wissenschaftlern eine Insel im Ligeia Mare, *Magic Island* genannt, auf. Das etwa 260 km<sup>2</sup> große Objekt erschien erstmals auf Cassini Aufnahmen im Juli 2013, war dann aber auf späteren Aufnahmen wieder verschwunden. Während einer Cassini-Passage am 21. August 2014 erschien das Objekt jedoch wieder. Mögliche Erklärungen wären etwa aufsteigende Blasen, Schwebstoffe oder Wellen auf der Oberfläche von Ligeia Mare. Es wird ein Zusammenhang mit dem derzeit stattfindenden Jahreszeitenwechsel auf Titan vermutet.

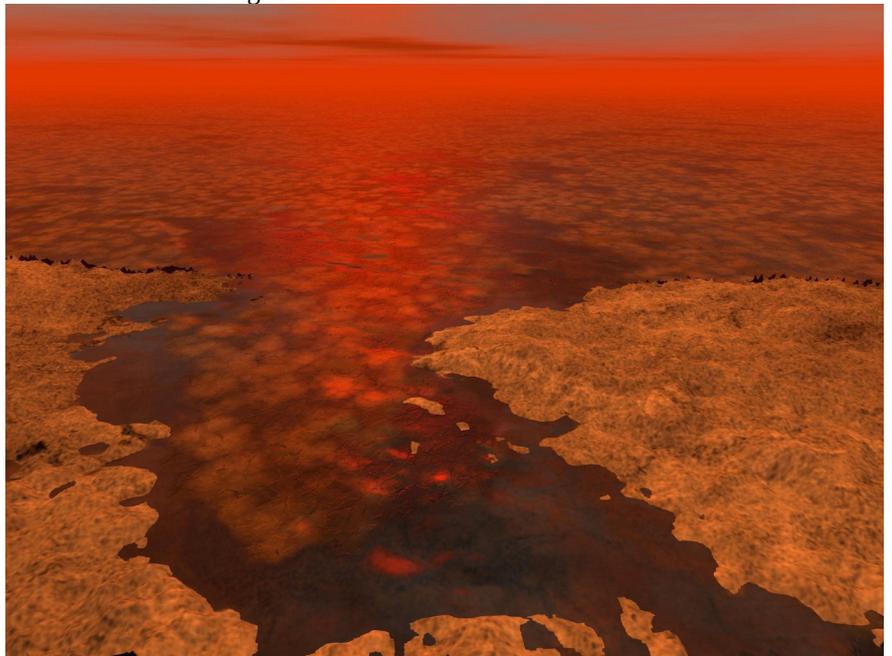
Von den Forschern wird vermutet, dass sich die Seen hauptsächlich während des 7,5 Jahre dauernden Titan-Winters bilden und im Sommer größtenteils wieder austrocknen. Diese Entdeckung passte gut zu der des riesigen nordpolaren Wolkenwirbels wenige Wochen später. Beides bestätigt die Vermutung eines Niederschlagkreislaufs von Methan, ähnlich dem Wasserkreislauf auf der Erde – mit Verdunstung, Wolkenbildung und erneutem Niederschlag (Methan ist nur im Temperaturbereich von -182 °C bis -162 °C flüssig, bei höheren Temperaturen gasförmig).

Radarmessungen der Cassini-Sonde deuten darauf hin, dass unter der Eiskruste ein Ozean aus flüssigem Wasser existiert. Die Dicke der Eiskruste wird auf etwa 80 Kilometer geschätzt. Die Wärmeentwicklung kann durch Gezeitenreibung auch unter seiner Eiskruste zu der Bildung dieser aufgeschmolzenen Schicht geführt haben. Im Wasser zu etwa 10 % enthaltenes Ammoniak würde als Frostschutzmittel (siehe Gefrierpunktniedrigung) wirken, so dass sich trotz der in dieser Tiefe zu erwartenden Temperatur von -20 °C ein flüssiger Ozean gebildet haben könnte – zumal in Verbindung mit dem dortigen hohen Druck.

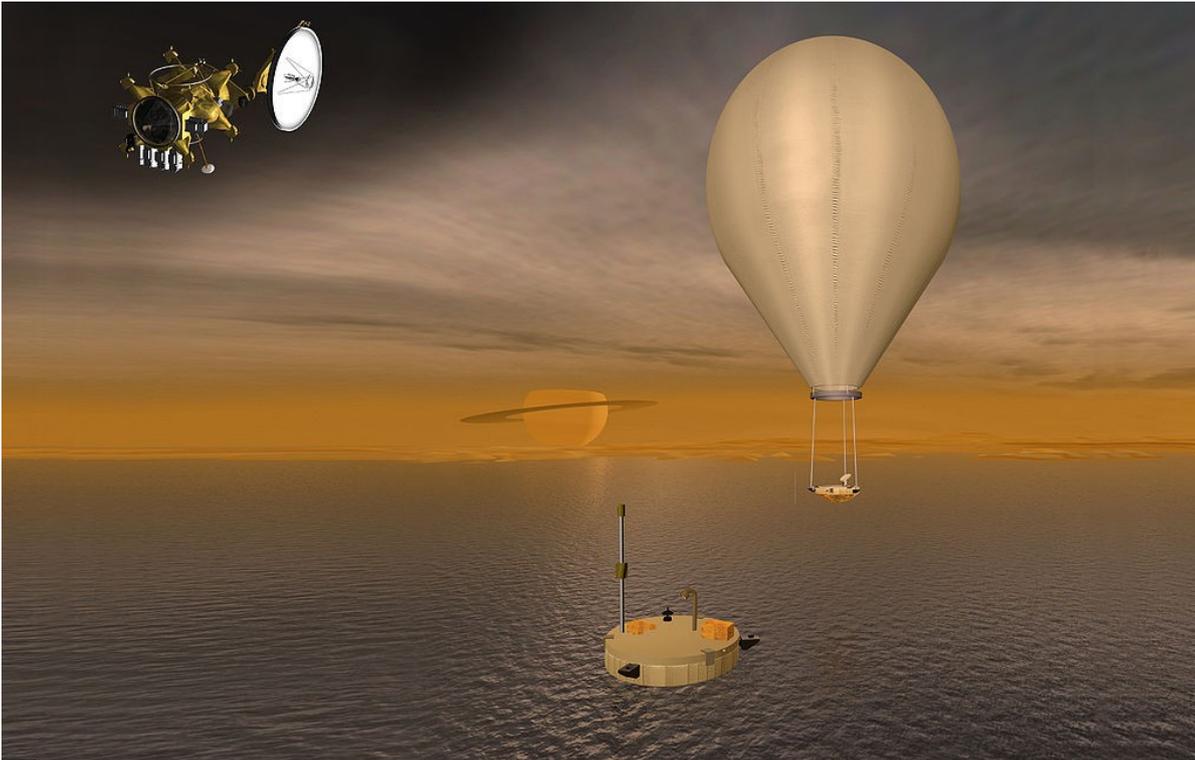
Die Existenz eines Ozeans in der Tiefe bedeutet geologisch gesehen, dass die darüber liegende Kruste wesentlich beweglicher sein kann als auf Himmelskörpern, die durchgehend fest sind, wie beispielsweise der Erdmond. Die Krustenbeweglichkeit führt zu den beobachteten tektonischen Großstrukturen und ebenso zum Kryovulkanismus, wobei vermutet werden kann, dass auch Wasser aus dem untergründigen Ozean direkt am Eisvulkanismus beteiligt ist, wie es bei der Erde mit Magma aus dem Mantel der Fall ist. Wie auf Enceladus bereits nachgewiesen wurde, können die Krustenbewegungen allein lokal so viel Wärme erzeugen, dass bedeutende Mengen an Eis in den Bewegungszonen verflüssigt werden und Kryovulkanismus erzeugen.

Cassini entdeckte, dass über Titanbergen die Anziehung schwächer ist als über flachen Gegenden. Die Forscher vermuten daher, dass das Eis unter Bergen tiefer in den Ozean hineinreicht als unter Ebenen[69]. Die Auswertung von Schwerefeldmessungen von Cassini ergab, dass der vermutete Ozean sehr salzhaltig sein muss. Er ist dabei einzufrieren, weshalb die äußerste Eisschicht über ihm sehr starr sein dürfte. Es könnte auch Eis auf den Methanseen geben: Die Existenz von Eisbergen auf der Oberfläche der Seen ist grundsätzlich möglich, aber bisher nicht nachgewiesen. Weil Mischungen aus festem Methan und Ethan schwerer sind als flüssige Mischungen, kann nur Eis schwimmen, das Einschlüsse von mindestens 5 % Stickstoff aus der Atmosphäre enthält, die sein Volumen vergrößern. Wenn die Temperatur nur geringfügig sinkt, zieht sich der Stickstoff so weit zusammen, dass das Eis zum Grund hinabsinkt. Wenn die Temperatur wieder steigt, kann auch das Grundeis zur Seeoberfläche aufsteigen.

Auf Titan finden sich deutliche Anzeichen vulkanischer Aktivität. Auch wenn die erkannten Vulkane in ihrer Form und Größe denen auf der Erde ähneln, handelt es sich nicht um silikatischen Vulkanismus wie auf den erdähnlichen Planeten Mars oder Venus, sondern vielmehr um sogenannte Kryovulkane, also Eisvulkane. Die zähflüssige Masse, die bei diesem Kryovulkanismus an die Titanoberfläche tritt, könnte aus Wasser und z. B. Ammoniak oder aus Wasser mit anderen kohlenwasserstoffhaltigen Gemischen bestehen, deren Gefrierpunkte weit unter dem von Wasser liegen und die somit kurzzeitig an der Oberfläche fließen könnten. Diese Gebiete mit höheren Temperaturen werden auch „Hotbeds“ genannt. Es wird vermutet, dass der Vulkanismus auf Titan, ähnlich wie auf der Erde, durch die Energiefreisetzung beim Zerfall von radioaktiven Elementen im Mantel von Titan angetrieben wird. Mit Hilfe von Cassini wurden bei einem vermuteten Kryovulkan Methanemissionen entdeckt. Es wird angenommen, dass Kryovulkanismus eine bedeutende Quelle für den Nachschub von Methan in der Atmosphäre ist.



So würden Eisberge auf Methanseen aussehen.



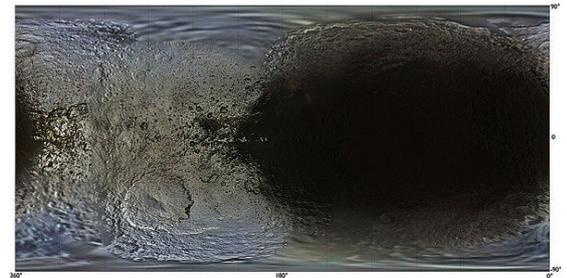
Künstlerische Darstellung einer Landung im Kraken-Mare (Mission TandEM, 2030).

**Hyperion** (Saturn VII, Titan des Osterns, Vater des Atlas, entdeckt am 16. September 1848 von William Cranch & seinem Sohn George Phillips Bond sowie unabhängig davon William Lassell), Gr. Halbachse 1,481 Mill. km, Exzentrizität 0,123, Inklination 0,43°, Umlaufzeit 21,3d mit 5 km/s, chaotische (!) Rotation; Achsenneigung variabel (!), Größe Ø 266 km (drittgrößter Saturnmond), Fläche 222.000. km (Guyana 215.000), 14,2 mag, Albedo 0,3, Masse  $5,6 \times 10^{18}$  kg, Dichte  $544 \text{ kg/m}^3$ , Schwerkraft  $1,7\text{-}2,8 \text{ cm/s}^2$  (abhängig vom Ort), Fluchtgeschwindigkeit 45-49 m/s (abhängig vom Ort), Temperatur  $-180^\circ$ . Hochgradig irreguläre Gestalt (einer der größten Körper mit einer solchen, d.h. der nicht im hydrostatischen Gleichgewicht ist). Besteht aus Wassereis mit einer dunkelroten Hülle.



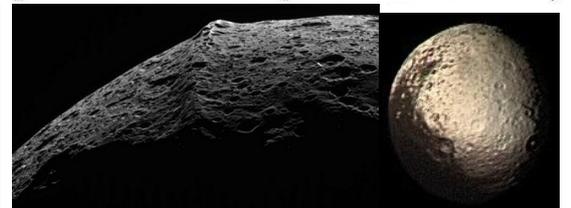
Tiefe scharfkantige Krater geben ihm das Aussehen eines Schammes, bestehend aus „dreieckigem porösem Wassereis“.

**Japetus** (Saturn VIII, Titan des Westens, Vater des Atlas, entdeckt am 25. Oktober 1671 von Giovanni Cassini), Gr. Halbachse 3,561 Mill. km (Periapsis 3,461 Mill. Apoapsis 3,662 Mill.), Exzentrizität 0,03, Inklination 7,52°, Umlaufzeit 79,33d mit 3,26 km/s, gebundene Rotation; Achsenneigung 14,8°, Größe Ø 1436 km (drittgrößter Saturnmond), Fläche 6,7 Mill. km ( $6,3 = 2x$  Indien), 10,2-11,9 mag, Albedo 0,04-0,5 (hat eine sehr helle und eine sehr dunkle Hälfte!), Masse  $1,6 \times 10^{21}$  kg, Dichte  $1270 \text{ kg/m}^3$ , Schwerkraft  $0,255 \text{ m/s}^2$  (2,6% Erde), Fluchtgeschwindigkeit 606 m/s, Temperatur  $-183^\circ$  bis  $-143^\circ$ ; Form einer Walnuss, Dunkle Region = Cassini Regio, Helle Region =



Roncevaux Terra, Größter Krater darin (in der hellen Region): Thurgis mit Ø 580 km. Fast genau auf den Äquator erstreckt sich ein Bergrücken.

In Arthur C. Clarkes Roman „2001: Odyssee im Weltraum“ ist Iapetus ein von Außerirdischen konstruiertes Sterntor (Wurmloch), wegen der ungewöhnlichen Eigenschaften des Mondes.



### III. 38 ÄUßERE MONDE:

**Phoebe** (Saturn IX, benannt nach der Titanin Phoibe, Gattin des Nordpol-Titanen Koios, entdeckt am 16. August 1898 von William Henry Pickering, erster durch Fotoplatten entdeckter Mond), Gr. Halbachse 12.952.000 km (Periapsis 10.841.000 Apoapsis 15.063.000, äußerster der großen Saturnmonde), Exzentrizität 0,163, Inklination 175.3° (4,7° retrograde Umlaufbahn), Umlaufzeit 550,5d mit 1,7 km/s, siderische Rotation 9h 30min; Achsenneigung 26,183°, Größe Ø 220 km, Albedo 0,081 (sehr dunkel im Vergleich mit den meist hellen großen Saturnmonden), Masse  $4 \times 10^{18}$  kg, Dichte 1630 kg/m<sup>3</sup> (zweitgrößte Dichte unter den bekannten Saturnmonden nach Titan), Schwerkraft 0,039 m/s<sup>2</sup> (0,5% Erde), Fluchtgeschwindigkeit 93,4 m/s, Temperatur -198° bis -161°, Topologie: stark verkratert (höchste Kraterdichte des Sonnensystems), einer der Krater hat einen Ringwall von 16 km Höhe.



Phoebe ist der größte Mond der 29 Monde der „**Nordischen Gruppe**“, zu der außer Phoebe (benannt nach der Gattin des Nordpol-Titanen) Monde gehören, welche Namen aus der nordischen Mythologie und ähnliche Bahndaten wie Phoebe haben: irreguläre retrograde Monde mit großen Halbachsen zwischen 12,9 und 25,1 Millionen km. Von innen nach außen sind es Phoebe, Skathi, S/2007 S2, Skoll, Greip, Hyrrokkin, S/2004 S13, Jarnsaxa, S/2004 S17, Mundilfari, S/2006 S1, Narvi, Bergelmir, Suttungr (Bruchstück von Phoebe?), S/2004 S12, S/2004 S7, Hati, Bestla, Farbauti, Thrymir, S/2007 S3, Aegir, S/2006 S3, Kari, Fenrir, Surtur, Ymir, Longe, Fornjot. Hierbei unterscheidet man die **Phoebe-Untergruppe** (19) (Inklination ca. 174°: Phoebe, S/2007 S 2, Greip, S/2004 S 13, Jarnsaxa, S/2004 S 17, Mundilfari, Suttungr, S/2004 S 12, S/2004 S 7, Hati, Thrymr, S/2007 S3, Aegir, Fenrir, Surtur, Ymir, Loge, Fornjot), **Skathi-Untergruppe** (8) (Skathi, Skoll, Hyrrokkin, S/2006 S1, Bergelmir, Farbauti, S/2006 S3 und Kari) und **Narvi-Untergruppe** (2) mit Narvi und Bestla.

Zu den äußeren Saturnmonden gehören außer denen der Nordischen Gruppe noch prograde Monde, nämlich einerseits die 5 Monde der **Inuit-Gruppe**: Inuit Gruppe (Inklination ca. 46°, disparater Orbit,  $\delta V \approx 350$  m/s, leicht rötlich): von innen nach außen Kiviuq, Ijiraq (kleinere Halbachse als Phoebe) sowie Paaliaq, Siarnaq, Tarqeq, und andererseits die 4 Monde der **Gallischen Gruppe** (Inklination ca. 34°, disparater Orbit,  $\delta V \approx 50$  m/s, leicht rötlich, homogen im sichtbaren und infrarotem Licht), von innen nach außen (mit größerer Halbachse als Skathi): Abiorix, Bebhionn, Erriapus und Tarvos. Der Größe nach geordnet sind es also:

(A) prograd

(A1) Inuit-Gruppe:

Siarnaq (40 km), Paaliaq (22), Kiviuq (16), Ijiraq (12), Tarqeq (7).

(A2) Gallische Gruppe:

Abiorix (32 km), Tarvos (15), Erriapus (10), Bebhionn (6 km).

(B) retrograd = Nordische Gruppe

(B1) Phoebe-Untergruppe:

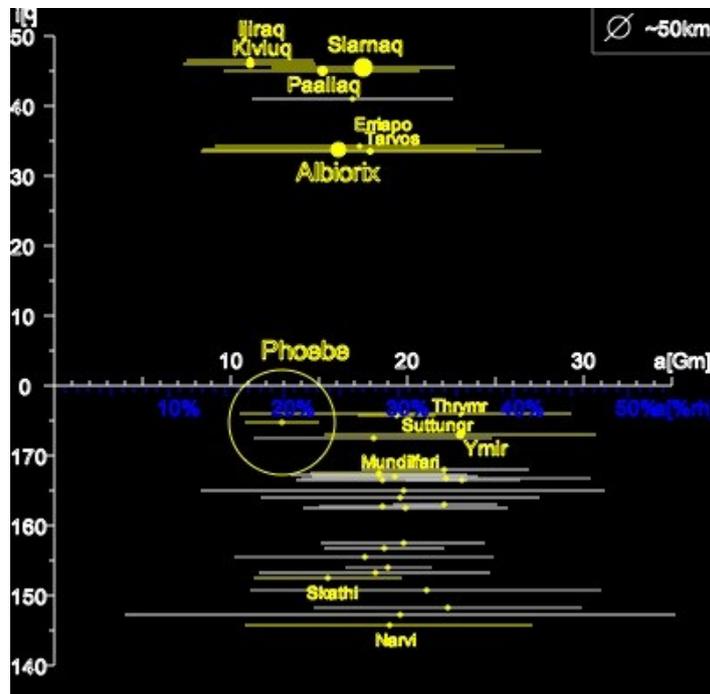
Phoebe (240 km), Ymir (18), Mundilfari (7), Suttungr (7), Thrymr (7), S/2007 S2 (6), Greip (6), S/2004 S13(6), Jarnsaxa (6), S/2004 S7 (6), Hati (6), Aegir (6), Surtur (6), Loge (6), Fornjot (6), S/2004 S12 (5), S/2007 S3 (5), S/2004 S17 (4), Fenrir (4 km).

(B2) Skathi-Untergruppe:

Skathi (8 km), Hyrrokkin (8), Kari (7), Skoll (6), S/2006 S1 (6), Bergelmir (6), S/2006 S3 (6), Farbauti (5 km).

(B2) Narvi-Untergruppe:

Narvi (7 km), Bestla (7 km).



**Fenrir** (mit den größten Teleskopen durch Beobachtungen zwischen 13. Dezember 2004 und 4. März 2005 von Sheppard/Jewitt/Kleyna entdeckt, benannt nach dem Riesenwolf Fenrisulfr der nordischen Mythologie) ist mit mag 25,0 einer der lichtschwächsten Monde des Sonnensystems. Gr. Halbachse 22,454 Mill. km, Exzentrizität 0,13, Inklination 165°, Umlaufzeit 3,45a, Ø 4 km.

**Fornjot** (durch Beobachtungen zwischen 12. Dezember 2004 und 11. März 2005 von Sheppard/Jewitt/Kleyna/Marsden entdeckter äußerster Saturnmond, benannt nach dem Riesen Fornjot, des Königs von Finnland, Kvenland und Gotland), Gr. Halbachse 25.108.000

km, Periapsis 19.936.000 km, Apoapsis 30.280.000 km, Exzentrizität 0,2, Inklination 170,4°, Umlaufzeit 4a, Ø 6 km.

Noch weiter hinaus kommen mit kleinerer Halbachse, aber größerer Exzentrizität die Monde

- Surtur: Gr. Halbachse 22,707 Mill. km, Exzentrizität 0,45, Apoapsis 32,948 Mill. km, dieser Mond entfernt sich am weitesten.
- Kari: Gr. Halbachse 22,118 Mill. km, Exzentrizität 0,48, Apoapsis 32,690 Mill. km,
- S/2004 S7: Gr. Halbachse 20,999 Mill. km, Exzentrizität 0,53 (größte E. unter den Saturnmonden), Apoapsis 32,126 Mill. km,
- S/2006 S3: Gr. Halbachse 22,069 Mill. km, Exzentrizität 0,4, Apoapsis 30,888 Mill. km,
- Ymir: Gr. Halbachse 23,130 Mill. km, Exzentrizität 0,334, Apoapsis 30,760 Mill. km,
- Bestla (Gr. Halbachse 20,129, Exzentrizität 0,42, Apopasis 30,616 Mill. km).

**Moonlets:** 2006 wurden vier „Moonlets“ im A-Ring gefunden (von der Größenordnung 100 m), nicht direkt sichtbar, sondern durch „propellerartige“ Störungen im Ring erkennbar, die sich über einige Kilometer erstrecken. 2007 wurden acht weitere Moonlets entdeckt, alle in einem 3000 km – Band 130,000 km vom Zentrum des Planeten entfernt. Um 2008 waren schon über 150 „Propeller-Moonlets“ entdeckt. Auf im F-Ring fand man solche. Ein über mehrere Jahre verfolgtes Moonlet erhielt den Namen *Bleriot*.

#### **Missionen:**

**Pioneer 11** (1. Sept. 1979): Vorbeiflug in 21.000 km Abstand zur Oberfläche (siehe Fußnote 55)

**Voyager 1** (12. November 1980): Vorbeiflug in 124.000 km Abstand zu den höchsten Wolken (siehe Fußnote 56)

**Voyager 2** (26. August 1981): Vorbeiflug und Weiterflug zum Uranus und Neptun (siehe Fußnote 57)

**Cassini / Huygens** (gestartet 15.10.1997, Jupiter-Flyby 30.12.2000, seit 12. Juni 2004 im Saturnsystem: Vorbeiflug an Phoebe, seit 30. Juni 2004 im Saturnorbit; 14.01.2005: Huygens landet auf Titan; Ende der Mission 2017).

## 1.12. Uranus

**Uranus** (griech. *Ouranos*, chin. 天王星 (*Tiānwángxīng*) König des Himmels = jap. *Tennoosei* = viet. Sao Thiên Vương, entdeckt am 13. März 1781 von Wilhelm Herschel)<sup>63</sup>

Symbol  $\text{♅}$  (Kombination Sonne und Mars – Himmelsgott Uranus herrscht über die Himmel wie die Sonne, kraftvoll wie Mars)

**Gr. Halbachse:** 19,189 AU = 2,87 Mrd. km (Perihel 18,283, Aphel 20,095, Exzentrizität 0,05, Inklination 0,8°), Erdabstand 17,259 – 21,105 AU.

**Umlaufzeit:** siderisch 84,01a; synodisch 369,66d, mit 6,81 km/s.<sup>64</sup>

**Rotation** 17 h 14 min 24 s (am Äquator 2,59 km/s = 9320 km/h) mit Achsenneigung 97,77° (retrograd, wälzt sich auf dem Bauch), bei 60° Süd Atmosphärenrotation in nur 14h.

**Größe:** Ø 50.532 km (4 x Erde)<sup>65</sup> Oberfläche 8 Mrd. km<sup>2</sup>, Land 150 Mio. km<sup>2</sup> (16 × Erde); 3.3" to 4.1" 5,9 bis 5,32 mag, Albedo 0,51.

Farbe: blasse-cyanblau-lauchgrüne Farbe.

**Masse:**  $8.6 \times 10^{25}$  kg (14,5 x Erde; Neptun ist kleiner aber schwerer!), Dichte 1270 kg/m<sup>3</sup> (zweitkleinste Dichte nach Saturn), Schwerkraft: 8,69 m/s<sup>2</sup> (0,886g!), Fluchtgeschwindigkeit 21,3 km/s.

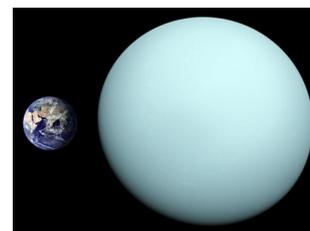
**Atmosphäre** (unter 1,3 Bar): 83% Wasserstoff (H<sub>2</sub>), 15% Helium 2,3% Methan, 0,01%. Aerosole: Ammoniakeis, Wassereis, Ammonium-Hydrosulphit (NH<sub>4</sub>SH)- und Methan-Eis.<sup>66</sup>

**Temperatur:** (bei 1 bar) -197.2°.

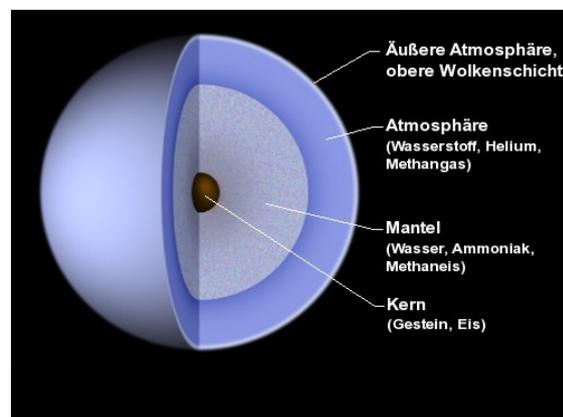
**Innerer Aufbau:** wie Neptun wird Uranus ein „Eisriese“ genannt (aufgrund von Eisvorkommen im Inneren); im Zentrum wird ein kleiner Kern (0,54 Erdmassen von höchstens Erdgröße) aus Gestein und Metallen (Silikat und Eisen-Nickel) angenommen (mit 8 Mill. bar und 5000°), darüber liegt der Eismantel (13,4 Erdmassen), wo nicht metallischer Wasserstoff dominiert wie bei den Gasgiganten Saturn und Jupiter, sondern Ammoniak, Metan und Wasser-„Eis“ (sog. Ammoniak-Wasser-Ozean), wobei hier kein Eis im irdischen Sinn gemeint ist, sondern eine heiße, elektrisch leitende Flüssigkeit unter extremem Druck, die unten ein „flüssiger Diamant“ ist, in dem exotische Gebilde wie „Diamantenberge“ schwimmen bzw. wie Hagelsteine herunterregnen.<sup>67</sup> In größerer Höhe geht die Flüssigkeit ohne Phasenübergang allmählich in die gasförmige Atmosphäre über (0,5 Erdmassen).<sup>68</sup>

**Magnetfeld:** Im Gegensatz zu Erde, Jupiter und Saturn besitzt Uranus kein Dipolfeld, sondern eine Quadrupolfeld (mit zwei Nord- und Südpolen). Die Stärke variiert zwischen 10 Mikrottesla auf der nördlichen und 110 Mikrottesla auf der südlichen Halbkugel; Durchschnitt 23 Mikrottesla; siehe auch Fußnote 6.

Das magnetische Dipolmoment des Uranus ist  $50 \times$  größer als das der Erde; der Partikelfluss ist stark genug, um auf der Oberfläche von Monden Erosion zu bewirken und sie (ebenso wie die Ringe) zu verdunkeln. Voyager 2 konnte Auroras (Polarlichter) um die magnetischen Pole herum beobachten.



Uranus in echten Farben; Größenvergleich



<sup>63</sup> Uranus war schon 1690 im Katalog von John Flamsteed verzeichnet, wo Uranus aber als Fixstern angesehen worden war und den Namen *34 Tauri* erhielt; möglicherweise ist er bereits 128 v. Chr. von Hipparchos beobachtet und in seinen Sternkatalog aufgenommen worden, den Ptolemäus im *Almagest* übernahm. Von Herschel wurde der neue Planet zunächst für einen Kometen gehalten; als Planet nannte Herschel ihn *Georgium Sidus* (*Georgs Stern*) zu Ehren von König Georg III. (König von Großbritannien von 1760-1820). Andere nannten ihn *Herschel*, und der von Bode (1747-1826) vorgeschlagene Name *Uranus* setzte sich nach der Entdeckung Neptuns (1846) um 1850 durch.

<sup>64</sup> Uranus legt einen Durchmesser in 2h zurück (die Erde in nur 7 Min.).

<sup>65</sup> Äquatordurchmesser: 51.118 km; Poldurchmesser: 49.946 km, Differenz 1172 km; also Abplattung 2,3 %.

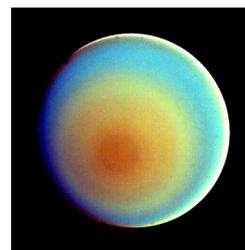
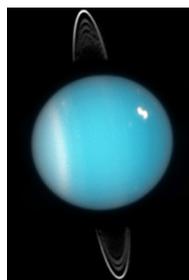
<sup>66</sup> Der unterste Atmosphärenbereich ist die *Troposphäre* (-300 bis 50 km), die fast die ganze Masse der Atmosphäre enthält und in der die Temperatur mit steigender Höhe fällt; am unteren Ende (300 km unter dem 1-Bar-Level, bei 100 Bar), herrschen +47°, auf den 1-Bar-Nullniveau -197° und am oberen Ende (50 km darüber) -220°; niedrigste Temperatur bei 70 mbar: -224°; einer der Kälterekorde im Sonnensystem. In der Troposphäre gibt es auch Wolken; die untere bestehen aus Wasser, die oberen aus Partikeln gefrorenen Methans, das als heißes Gas aus tieferen Schichten aufsteigt und kondensiert. Außerdem wehen hier Winde mit Geschwindigkeiten von 200 m/s = 700 km/h bis maximal 900 km/h. Die effektive Temperatur (= Temperatur, die ein schwarzer Strahler haben müsste, um mit der gleichen Helligkeit zu strahlen) ist mit -214° nicht viel größer als die des Neptun. Über der Troposphäre erstreckt sich die *Stratosphäre* (50-4000 km, 0,1-10-10 bar), in der die Temperatur mit steigender Höhe steigt. An der oberen liegt sie bei +527-577°. Ursache für die Erhitzung der Stratosphäre ist die Absorption von solarer UV- und IR-Strahlung durch Methan und andere Kohlenwasserstoffe, die sich in diesem Teil der Atmosphäre als Ergebnis der Methanphotolyse bilden. Die Kohlenwasserstoffe besetzen einen relativ engen Bereich in Höhen von 100 bis 280 km (Druck 10-0,1 mbar, Temperatur -198 bis -103°). Im unteren kalten Bereich bilden Ethan und Ethin (Acetylen) neblige Schichten, welche die detaillierte Erscheinung des Uranus verursachen. Über der Stratosphäre denkt sich die *Thermosphäre/Exosphäre* und *Korona* bis zu 50.000 km (2 Uranus-Radien) mit einer Einheitstemperatur von +527-577°. Dies ist viel wärmer als die Thermosphäre des Saturn; die Wärmequelle ist unbekannt; außerdem ist die gewaltige Ausdehnung der Korona einzigartig. Es gibt noch die *Ionosphäre* (oberer Teil der Stratosphäre plus Thermosphäre, 2000-10.000 km), in der es in Abhängigkeit von der Sonnenaktivität Polarlichter erscheinen und UV- sowie IR- Strahlung emittiert wird.

<sup>67</sup> Möglich ist auch eine Schicht flüssigen, ionisierten Wassers (mit Wasserstoff- und Sauerstoffionen) und eine Schicht „hyperionisierten“ Wasser, in dem die Sauerstoffionen kristallisieren und nur noch die Wasserstoffionen durch das Kristallgitter hindurchschwimmen.

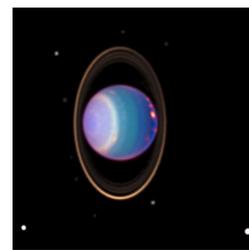
<sup>68</sup> Der Planet hat zwischen 9,3 und 13,5 Erdmassen Eis, zwischen 0,1 und 1,5 Erdmassen Wasserstoff und Helium und der Rest (0,5 bis 4,7 Erdmasse) besteht aus felsigem Material.

**Topologie:** im Gegensatz zur Jupiter und Saturn sind keine Wolkenbänder zu sehen; einheitlich gefärbte bassgrüne Scheibe. Mit fortgeschrittener Technik erkennt man weiße Wolken, dunklere Stellen und auf der Südhalbkugel einen „Kollar“ (helles Band, das den Planeten zwischen dem 45. und 50. südlichen Breitengrad umspannt) und eine „Haube“ (helle Polkappe), beides wohl Methanwolkenfelder.

**Ringsystem:** Bereits Wilhelm Herschel will 1789 (veröffentlicht 1797) einen rötlichen Ring um Uranus gesehen haben.



Voyager 2-Falschfarbenaufnahme



Infrarot-Falschfarbendarstellung

Zweifelsfrei wurde das Ringsystem erst 200 Jahre später, im März 1977, von Elliot, Dunham und Mink mit dem Kuiper Airborne Observatory entdeckt, die bei der Analyse der Bedeckung des Sterns SAO 158687 (10. März 1977) durch Uranus feststellten, dass der Stern kurz vor und nach der Bedeckung zusätzlich je fünfmal kurzzeitig verschwand; damit waren die Ringe  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$  entdeckt. Später fand das Team vier weitere Ringe: einen zwischen  $\beta$  und  $\gamma$ , den sie  $\eta$  nannten, und drei weitere im Innern des  $\alpha$ -Ringes, welche von außen nach Innen mit 4,5,6 bezeichnet wurden – nach der Nummerierung des Okkultationsereignisses in einem Artikel. So waren 1979 neun Ringe bekannt, zwei weitere wurden 1986 durch Voyager 2 entdeckt (1986U2R und  $\lambda$ ) und nochmals zwei äußere Ringe ( $\nu$  and  $\mu$ ) wurden 2003-5 mit dem Weltraumteleskop Hubble entdeckt. Mit dem Keck-Teleskop wurden 2003/4 im Bereich von 1986U2R ein weiterer breiter Ring entdeckt, den man  $\zeta$  nannte, und 2007 der hellste Ring (heller als alle anderen zusammen) wurde; er wird oft mit 1986U2Rb zusammen als ein Doppelring betrachtet, könnte aber auch als vierzehnter Ring angesehen werden. Von den zwei letzteren ist der innere rot (wie der angebliche Herschel'sche Ring), der äußere blau (wie Saturns E-Ring, darin läuft Mond Mab); die übrigen sind grau. Die Ringe sind sehr dunkel (Albedo 0.05-0,06) und bestehen aus bis zu 10 m großen Brocken, wobei diese im Schnitt größer sind als beim Saturn, dennoch sind die Ringe so dünn, dass die Gesamtmasse der Masse in der Cassinischen Teilung des Saturnring-Systems entspricht. Einzigartig ist, dass die Ringe scharf begrenzt und durch große Leerräume getrennt sind.

Von innen nach außen werden die dreizehn Ringe mit 1986U2R/ $\zeta$ , 6, 5, 4,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\eta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\lambda$ ,  $\epsilon$ ,  $\nu$  and  $\mu$  bezeichnet. Der hellste Ring ist  $\epsilon$  und verläuft im Zwischenraum zwischen den Bahnen der „Schäfermonde“ Cordelia und Ophelia, ebenso wie  $\nu$  zwischen Portia und Rosalind. Zusammenhörige Ringgruppen sind (1) neun enge Hauptringe (6, 5, 4,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\eta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$ ), (2) zwei breitere Staubringe (1986U2R/ $\zeta$ ,  $\lambda$ ) and (3) die beiden farbigen äußeren Ringe ( $\mu$ ,  $\nu$ ). Die Substanz der Ringe ist bis heute unbekannt: Es sind weder Eisringe wie beim Saturn Dunkelheit) noch matte staubige Ringe wie beim Jupiter. Die Lage der Ringe ist folgende:

$\zeta$ : 32.000–41.350 km, Rand 12.000 km über Wolken  
 darin 1986U2R: 37.000–39.500 km vom Zentrum.

6: 41.837 km,

5: 42.234 km,

4: 42.570 km,

$\alpha$ : 44.718 km,

$\beta$ : 45.661 km,

$\eta$ : 47.175/6 km,

$\gamma$ : 47.627 km,

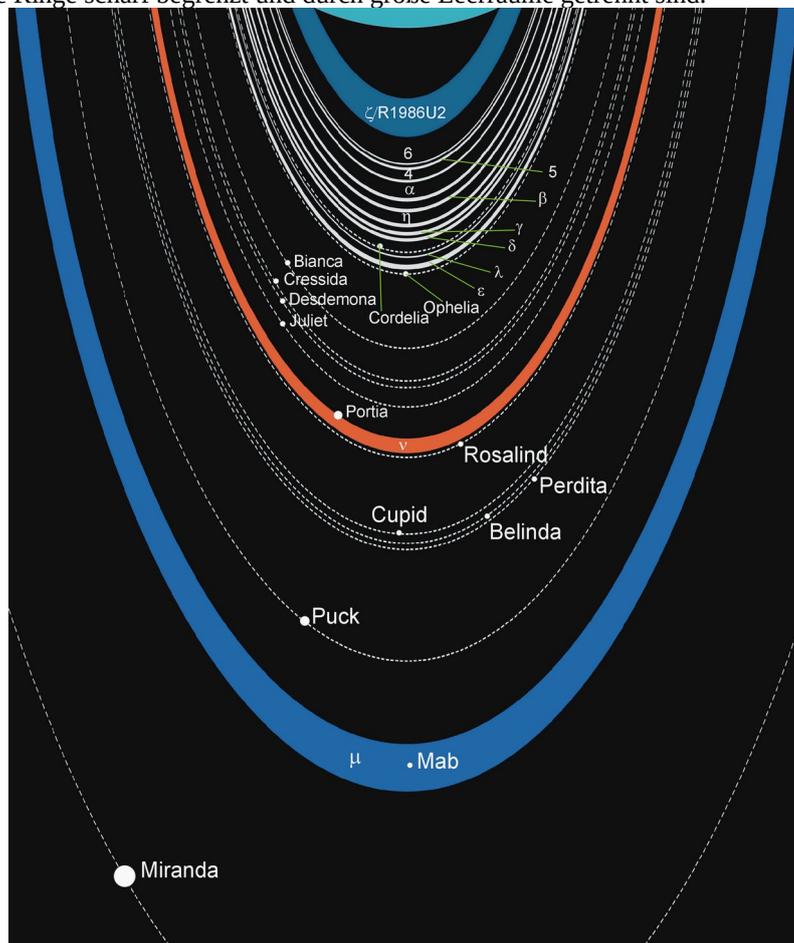
$\delta$ : 48.300 km,

$\lambda$ : 50.023 km,

$\epsilon$ : 51.149 km, hellster, zw. Cordelia & Ophelia.

$\nu$ : 66.100–69.900 km (rot), zw. Portia & Rosalind.

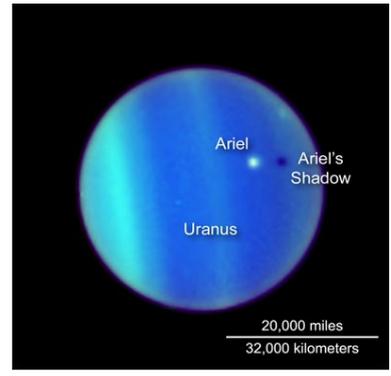
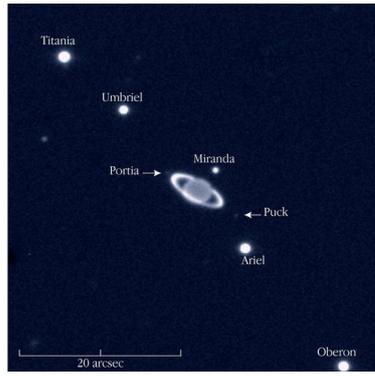
$\mu$ : 86.000–103.000 km (blau), darin Mab



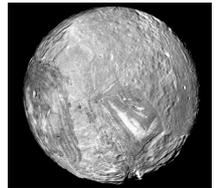
**Monde:** Es sind 27 Monde bekannt, fünf sind rund, acht rückläufig. Alle Uranusmonde liegen in der Äquatorialebene des Uranus, also senkrecht zur Bahnebene des Planeten. Wie auf Uranus gibt es also auf Miranda und den übrigen Monden extreme Jahreszeiten. Außer bei Oberon sind die nachfolgenden Hemisphären der Monde dunkler als die führenden. Die Uranusmonde sind nach Figuren von Shakespeare oder Alexander Pope benannt.

Größe (von links nach rechts) von Uranus und seinen Monden:

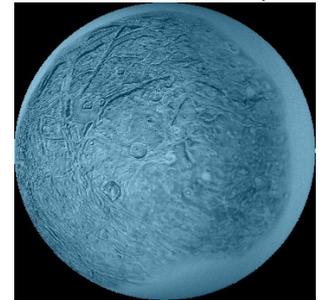
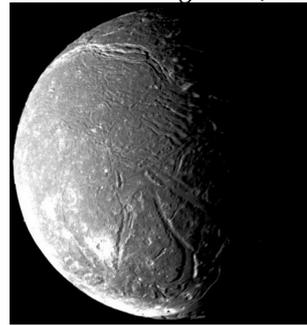
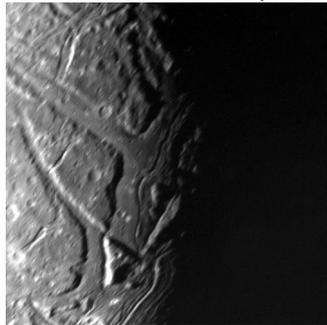
**Puck, Miranda, Ariel, Umbriel, Titania und Oberon**



**Miranda** (Uranus V; am 16. Februar 1948 von Gerard Kuiper entdeckt und nach Miranda aus Shakespeares Stücke *The Tempest* benannt) ist der kleinste & innerste der 5 runden Uranusmonde. Miranda ist eines der kleinsten Objekte des Sonnensystems, das im hydrostatischen Gleichgewicht liegt, also unter durch seine Schwerkraft rund ist. Gr. Halbachse 129.872 km, Exzentrizität 0,001, Inklination 4,338°, Umlaufzeit 1,4d, gebundene Rotation, Achsenneigung 0°, Größe Ø 470 km, Oberfläche 700.000 km<sup>2</sup> (Myanmar 676.578), 13,49 mag, Albedo 0,27, Masse 3,5•10<sup>21</sup> kg, Dichte 1711 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,079 m/s<sup>2</sup> (0,8 % Erde), Fluchtgeschwindigkeit 193 m/s, Temperatur -213 bis -189°. Miranda hat eine der extremsten, abwechslungsreichsten Geländeformen des Sonnensystems. Zu nennen ist hier z.B. *Verona Rupes*, einen 20 km hohen Felsabhang welcher des tiefste Kliff des Sonnensystems ist, und die merkwürdigen *Coronae*: Kreisförmige/ovale Strukturen, die keine Einschlagkrater sind (vermutlich Eis-Diapire).<sup>69</sup>

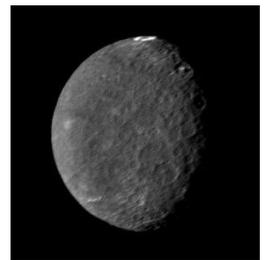
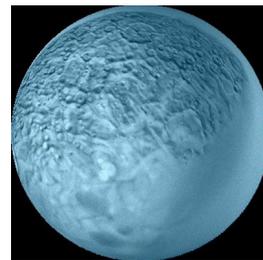


**Ariel** (Uranus I; am 24. Oktober 1851 entdeckte William Lassell Ariel und Umbriel als dritten und vierten Uranusmond; auf Vorschlag von John Herschel wurde Ariel 1852 nach einer Sylphe, d.h. einem Luftgeist, in Popes' Epos *Der Lockenraub* benannt; Ariel kommt auch in Shakespeares *Der Sturm* vor) ist der hellste Uranusmond, aber der kleinste der vier größten, nur 11 km kleiner als Umbriel, aber massiver als dieser. Gr. Halbachse 190.900 km, Exzentrizität 0,001, Inklination 0,041°, Umlaufzeit 2,7d, gebundene Rotation, Achsenneigung 0°, Größe Ø 1158 km, Oberfläche 4.211.000 km<sup>2</sup> (4,4 Mill. EU), 13,7 mag, Albedo 0.39, Masse 1,4•10<sup>21</sup> kg, Dichte 1660 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,27 m/s<sup>2</sup> (2,8 % Erde), Fluchtgeschwindigkeit 558 m/s, Temperatur -213 bis -189°. Grabenbruchsystem mit 10 km tiefen Gräben und ein System von „Flüssen“, welche Täler verbinden; unklar ist, welche Flüssigkeit hier floss. Oberflächenfarbe grau.



Falschfarbenaufnahme

**Umbriel** (Uranus II; am 24. Oktober 1851 entdeckte William Lassell Ariel und Umbriel als dritten und vierten Uranusmond; auf Vorschlag von John Herschel wurde Umbriel 1852 nach einem Gnom in Popes' Epos *Der Lockenraub* benannt) ist der dunkelste der großen Uranusmonde (Umbra = Schatten).<sup>70</sup> Gr. Halbachse 266.300 km, Exzentrizität 0,004, Inklination 0,128°, Umlaufzeit 4,1d, gebundene Rotation, Achsenneigung 0°, Größe Ø 1169 km, Oberfläche 4.296.000 km<sup>2</sup> (4,4 Mill. EU), 14,5 mag, Albedo 0.16, Masse 1,2•10<sup>21</sup> kg, Dichte 1390 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,23 m/s<sup>2</sup> (2,3 % Erde), Fluchtgeschwindigkeit 520 m/s, Temperatur



<sup>69</sup> Coronae gibt es auch auf der Venus.

<sup>70</sup> Für Oberflächenstrukturen auf Umbriel werden Namen von dunklen, eher böartigen Gestalten aus Sage und Literatur verwendet.

-198 bis -188°. Farbe bläulich.

Die Oberfläche zeigt je nach Beleuchtungswinkel große Helligkeitseffekte: die Reflektivität von 0,26 bei einem Phasenwinkel von 0° sinkt rapide auf 0,19 bei etwa 1° ab. In der Nähe des Äquators befindet sich das auffälligste Merkmal auf seiner Oberfläche, mutmaßlich ein Krater mit einem 131 km großen Ring aus hellem Material (Krater *Wunda*). Auffällig sind noch polygonförmige Strukturen.

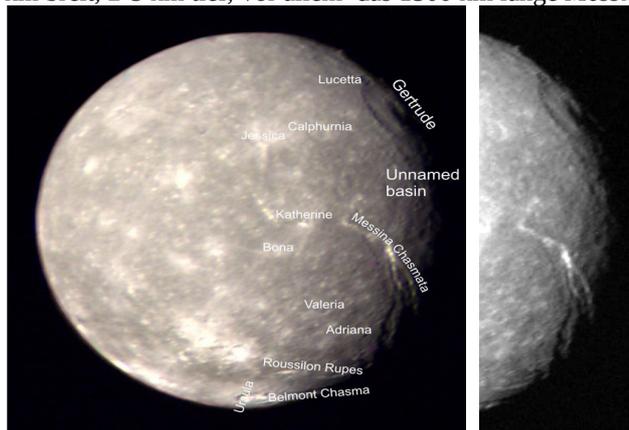
**Titania** (Uranus III; am 11. Januar 1787 entdeckte Wilhelm Herschel die ersten zwei Uranusmonde Titania und Oberon; auf Vorschlag seines Sohnes John Herschel wurde Titania 1852 nach der Elfenkönigin in Shakespeares Sommernachtstraum benannt) ist der größte Uranusmond. Gr. Halbachse 436,300 km, Exzentrizität 0,001, Inklination 0,079°, Umlaufzeit 8,7d, gebundene Rotation, Achsenneigung 0°, Größe Ø 1578 km, Oberfläche 7.820.000 km<sup>2</sup> (> Australien 7.692.024), 13,9 mag, Albedo 0.27, Masse 3,5•10<sup>21</sup> kg, Dichte 1711 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,378 m/s<sup>2</sup> (3,85 % Erde), Fluchtgeschwindigkeit 773 m/s, Temperatur -213 bis -184°. Saisonale dünne Kohlendioxid-Atmosphäre, zur Sommersonnenwende 3 nBar. Möglich ist ein unterirdischer Ozean wie auf dem Jupitermond Europa. Landschaft ist leicht rötlich, mit bläulichen Eisfeldern.



Auffällig sind Grabenbrüche (Canyons, „Chasmata“), 20-50 km breit, 2-5 km tief; vor allem das 1500 km lange *Messina Chasma*:



im Größenvergleich: Titania – Mond – Erde



**Oberon** (Uranus IV; am 11. Januar 1787 entdeckte Wilhelm Herschel die ersten zwei Uranusmonde Titania und Oberon; auf Vorschlag seines Sohnes John Herschel wurde Oberon 1852 nach dem Elfenkönig in Shakespeares Sommernachtstraum benannt) ist der äußerste und zweitgrößte der großen Uranusmonde, nur 55 km kleiner als der größte, Titania. Gr. Halbachse 583.519 km, Exzentrizität 0,001, Inklination 0,068°, Umlaufzeit 13,5d, gebundene Rotation, Achsenneigung 0°, Größe Ø 1523 km, Oberfläche 7.285.000 km<sup>2</sup> (< Australien 7.692.024), 14,1 mag, Albedo 0.24, Masse 3•10<sup>21</sup> kg, Dichte 1630 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,347 m/s<sup>2</sup> (3,53 % Erde), Fluchtgeschwindigkeit 726 m/s, Temperatur -203 bis -193°. Möglich ist ein unterirdischer Ozean wie auf dem Jupitermond Europa (40 km tief, flüssig bei -97°, falls Salze den Schmelzpunkt des Wassers senken). Allgemein roter Farbton (roteste Oberfläche der Uranusmonde), mit einigen helleren, grau-blaue Stellen.



#### **Weitere Monde außer den fünf genannten Hauptmonden:**

##### **A. dreizehn innere Monde (im Bereich der Ringe):**

**Mab** (Uranus XXVI, Gr. Halbachse 97.736 km, im blauen Staubring  $\mu$ ; Ø 16 km)

**Puck** (Uranus XV, größter Mond nach den fünf klassischen Hauptmonden, entdeckt am 30. Dezember 1985 von Stephen P. Synnott auf fotografischen Aufnahmen der Raumsonde Voyager 2; erster Mond, der durch den Vorbeiflug der Sonde entdeckt wurde; benannt nach dem trickreichen Geist in Shakespeare's *Sommernachtstraum*, der auch Robin Goodfellow heißt und Hofnarr des Elfenkönigs Oberon ist; *Puk*, der aus dem baltischen Volksglauben entlehnt, kommt in zahlreichen europäischen Legenden vor, wie in der keltischen *Púca*); Gr. Halbachse 86.000 km (an der Innenkante des äußeren  $\mu$ -Rings), Umlaufzeit 18h 17min (nur wenig länger als Rotationsdauer des Uranus, bewegt sich daher äußerst langsam von Ost nach West und geht nur alle 17,5 Uranustage auf) Größe Ø 162 km).

*die neun Monde der Portia-Gruppe: diese und auch die inneren Monde Ophelia und Cordelia (insgesamt 11 Uranusmonde) haben eine Umlaufzeit, die kleiner als Uranus' Rotationsperiode (17h 14 min) ist, gehen also im Westen auf und im Osten unter.*

**Perdita** (Uranus XXV, Ø 30 km, Umlaufzeit 15h 19min), **Belinda** (Uranus XIV, Ø 81 km), **Cupid** (Uranus XXVII, Ø 12-18 km) mit Gr. Halbachse 76.417 bzw. 75.256 bzw. 74.392 km) kreisen zwischen dem  $\mu$ - und dem  $\nu$ -Ring; der rote  $\nu$ -Ring wird von den Bahnen von **Rosalind** (Uranus XIII, Ø 72 km) und **Portia** (Uranus XII, Ø 135 km) von außen und innen eng umschlossen (Gr. Halbachse 69.928 bzw. 66.097 km); und zusätzlich gehören zur Portia-Gruppe noch vier Monde, die sich zwischen dem  $\nu$ -Ring und dem hellen  $\epsilon$ -Ring b **Voyager 2** befinden: **Juliet** (Uranus XI, Ø 94 km 64.358 km), **Desdemona** (Uranus X, Ø 64 km 62.658 km), **Cressida**, (Uranus IX, Ø 80 km, 61.767 km) und **Bianca** (Uranus VIII, Ø 51 km, 59.166 km).

Die Bahnen von **Ophelia** (Uranus VII, Ø 43 km, 53.763 km) und **Cordelia** (Uranus VI, Ø 40 km, 49.751 km, der innerste Mond, nur

24.193 km über der Wolkendecke, Umlaufzeit 8h 2min) umgeben schließlich den  $\epsilon$ -Ring außen und innen.

**B. Neun „irreguläre“, äußerste Monde**, alle wesentlich weiter von Uranus entfernt als Oberon. Alle außer Margaret sind retrograd.

**Francisco** (Uranus XXII,  $\varnothing$  22 km, 4.275.910 km).

**Caliban** (Uranus XVI, Sohn der Hexe Sycorax in Shakespeare's Der Sturm, zusammen mit Sycorax entdeckt am 6./7. September 1997 von Gladman / Nicholson / Burns / Kevelaar auf Fotos des Hale Observatoriums,  $\varnothing$  150 km, zweitgrößter Mond dieser Gruppe): Gr. Halbachse 7.231.560 km (Exzentrizität 0,18, Inklination  $140^\circ$ ), Rotation 2,7h.

**Stephano** (Uranus XX,  $\varnothing$  32 km, 7.952.320 km).

**Trinculo** (Uranus XXI,  $\varnothing$  10-18 km, wohl kleinster Uranusmond, ähnlich klein nur Cupid, 8.501.260 km).

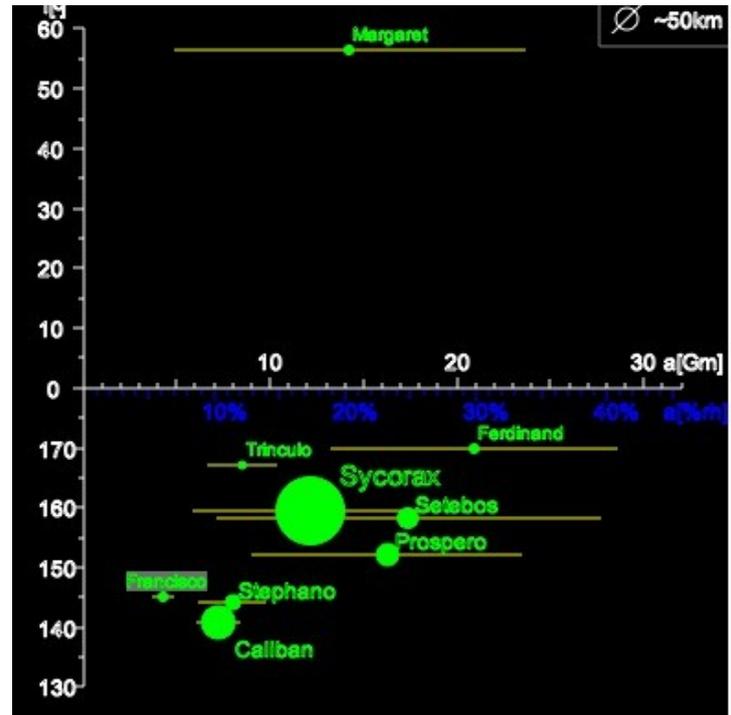
**Sycorax** (Uranus XVII, Hexe in Shakespeare's Der Sturm, zusammen mit Caliban entdeckt am 6./7. September 1997 von Gladman / Nicholson / Burns / Kevelaar auf Fotos des Hale Observatoriums,  $\varnothing$  72 km, größter Mond dieser Gruppe): Gr. Halbachse 12.175.560 km (Periapsis 5.957.740, Apoapsis 18.393.380, Exzentrizität 0,51, Inklination  $159^\circ$ ), Rotation 3,7h.

**Margaret** (Uranus XXIII,  $\varnothing$  20 km) m Gr, Halbachse 14.420.340 (Periapsis 2.913.700, Apoapsis 25.926.970, Exzentrizität 0,8; höchste Exzentrizität eines Mondes im Sonnensystem; Inklination  $51,4^\circ$ , prograd!).

**Prospero** (Uranus XVIII,  $\varnothing$  50 km, 16.162.240 km).

**Setebos** (Uranus XIX,  $\varnothing$  47 km, 17.419.270 km).

**Ferdinand** (Uranus XXIV,  $\varnothing$  21 km); Gr. Halbachse 20.507.100 km, Apoapsis 29.350.350 km; äußerster Mond



**Uranus-Trojaner:** Der einzige bisher bekannte ist der 2011 entdeckte, um L4 kreisende **2011 QF 99** (Durchmesser 60 km).

**Mission: Voyager 2** (siehe Fußnote 57) flog am 24. Januar 1986 am Uranus vorbei; am 4. November 1985 begann die Beobachtung.

## 1.13. Neptun

**Neptun** (griech. *Poseidon*, chin. 海王星 (Hǎiwángxīng) König des Meeres = jap. Kaioosei = viet. Sao Hải Vương, entdeckt am 23. September 1846 von Johann Gottfried Galle nach Berechnungen von Urbain Le Verrier aus Bahnstörungen des Uranus)

Symbol  $\Upsilon$  (Dreizack des Neptun)

**Gr. Halbachse:** 30.07 AU = 4,5 Mrd. km (Perihel 29,81, Aphel 30,33, Exzentrizität 0,01, Inklination 1,77°), Erdabstand 28,78 – 31,34 AU.

**Umlaufzeit:** siderisch 164,79a; tropisch 367,49d, mit 5,43 km/s.

**Rotation** 16h 06min 36s mit Achsenneigung 28,32°. Größte Windgeschwindigkeiten im Sonnensystem: bis zu 2100 km/h.

**Größe:**  $\varnothing$  49.244 km ( $4 \times$  Erde)<sup>71</sup> Oberfläche 7,6 Mrd. km<sup>2</sup> (15 x Erde); 2.2" to 2.4"; 8,02 bis 7,78 mag (unter extrem guten Verhältnissen mit bloße Auge sichtbar!), Albedo 0,41.

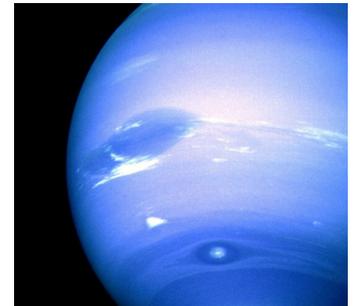
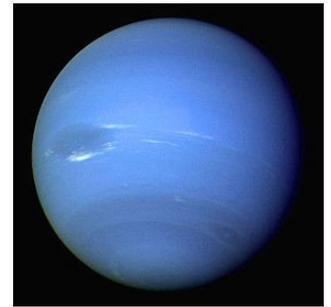
**Farbe:** blau (wegen des Methans), ähnlich wie bei Uranus, jedoch ein schärferes Azurblau im Gegensatz zum milderen Cyanblau mit Grünlich bei Uranus; die Ursache dafür ist unbekannt.

**Masse:**  $1 \times 10^{26}$  kg ( $17 \times$  Erde, dritt-massivster Planet, obwohl nur viertgrößter!), Dichte 1638 kg/m<sup>3</sup> (dichtester der vier Gasplaneten!) Schwerkraft: 11,15 m/s<sup>2</sup> (1,14g; zweitgrößte Schwerkraft nach Jupiter), Fluchtgeschwindigkeit 23,5 km/s.

**Atmosphäre:** 80% Wasserstoff (H<sub>2</sub>), 19% Helium 1,5% Methan, 0,01%. Aerosole: Ammoniak, Wassereis, Ammonium-Hydrosulphit (NH<sub>4</sub>SH) und Methan-Eis.

**Temperatur:** (bei 1 bar) -2091°. Im Mittelpunkt 5100°, in der äußeren Atmosphäre -218°.<sup>72</sup>

**Magnetfeld:** Im Gegensatz zu Erde, Jupiter und Saturn (aber wie Uranus) besitzt Neptun kein Dipolfeld, sondern ein Quadrupolfeld (mit je zwei Nord- und Südpolen). Die Stärke variiert zwischen 10 Mikrottesla auf der nördlichen und 110 Mikrottesla auf der südlichen Halbkugel. Die Stärke am Äquator beträgt nur 1,5 Mikrottesla; siehe auch Fußnote 6.



**Innerer Aufbau** wie Uranus.

**Topologie:** Am Äquator „großer dunkler Fleck“; im Süden „kleiner dunkler Fleck“, dazwischen „Scooter“ (weiße Wolke).

### Ringsystem:

schwaches (dunkles) und fragmentiertes azurfarbenes Ringsystem („Bögen“), eindeutig erst 1989 von Voyager 2 entdeckt; es besteht aus mehreren ausgeprägten Ringen und den ungewöhnlichen Ringbögen im äußeren Adams-Ring. Die Existenz des Ringsystems wurde 1982 durch ein Team von Edward Guinan mittels Sternverdunkelungen erschlossen (auf Aufnahmen von 1968), man vermutete, dass die Ringe nicht komplett seien. Die Beobachtungen von Voyager 2 (1989), welche die Existenz der Ringe eindeutig bestätigten, widerlegten diese Annahme. Die Ursache für diese Erscheinung sind helle Klumpen im Ringsystem. Die Ringe wurden nach Astronomen benannt, die bedeutende Beiträge zur Erforschung Neptuns lieferten. Von Innen nach Außen:

Galle: 41.900 km (2000 km breit)

Le Verrier: 53.300 km (110 km breit)

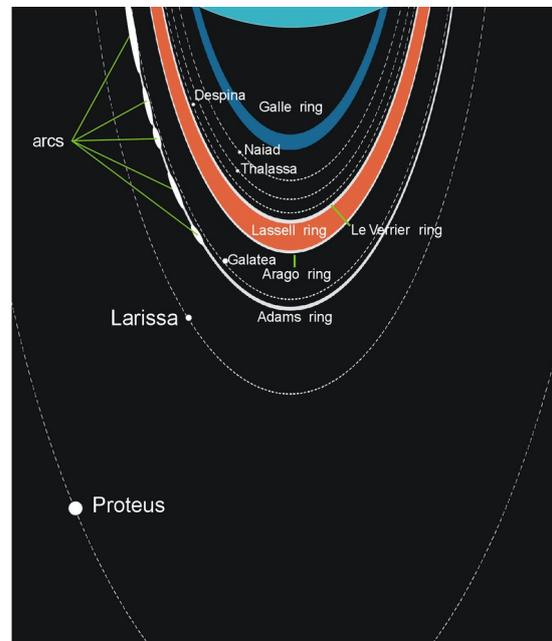
Lassell: 53.200-57.200 km (4000 km breit)

Arago: 57.200 km (< 100 km breit)

Adams: 62.933 km (50 km breit).

Im Adams-Ring laufen die Ringbogenstücke:

Liberté (4°), Égalité (5-8°), Fraternité (8-10°) & Courage (2-4°).



<sup>71</sup> Äquatordurchmesser: 49.528 km; Poldurchmesser: 48.683 km, Differenz 845 km; also Abplattung 1,7 %.

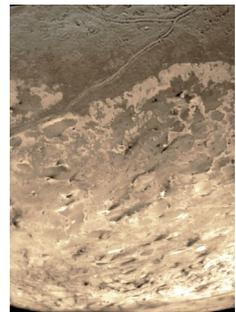
<sup>72</sup> Trotz des großen Abstandes zur Sonne reicht die empfangene Energie, im Sommer Gebiete bis zu 10 K wärmer werden zu lassen als die restlichen Regionen Neptuns. Neptun besitzt eine starke innere Wärmequelle.

**Monde:** Vierzehn bekannte Monde. Vier Monde Neptuns (Naiad, Thalassa, Despina und Galatea) umlaufen Neptun innerhalb der Ringregion.

**I. Größter Mond:**

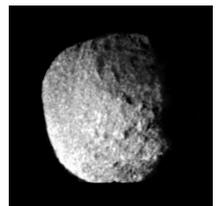
**Triton** (Neptun I; benannt nach dem Sohn des Meergottes Poseidon = Neptun; am 10. Oktoberr 1846, 17 Tage nach Neptuns Entdeckung, von William Lassell entdeckt) ist der größte retrograd laufende Mond des Sonnensystems. Gr. Halbachse 354.759 km, Exzentrizität 0,000, Inklination 157,3°, Umlaufzeit 5,9d, gebundene Rotation, Achsenneigung 0°, Größe Ø 2707 km, Oberfläche 23 Mill km<sup>2</sup> (Nordamerika 24,5), 13,5 mag, Albedo 0,76, Masse  $2,1 \cdot 10^{22}$  kg (99,5 % der um Neptun kreisenden Masse), Dichte 2061 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,779 m/s<sup>2</sup> (8 % Erde), Fluchtgeschwindigkeit 1,455 km/s, Temperatur -237,5 bis -189°. Atmosphäre: Druck 1,4–1,9 Pa (1/70.000 Erde); Zusammensetzung 99 % Stickstoff (N<sub>2</sub>), 1 % Methan (CH<sub>4</sub>), Spuren Kohlenmonoxid. Oberfläche: Tritons Oberfläche ist zu 55 % mit gefrorenem Stickstoff, zu 15–35 % mit Wassereis und zu 10–20 % mit Trockeneis bedeckt. Zudem konnte ein 0,1 % Methan- und 0,05 % Kohlenmonoxideis-Anteil bestimmt werden.

**Kryovulkanismus:** Es wurden aktive Geysire festgestellt, die ein Gemisch aus flüssigem Stickstoff und mitgerissenen Gesteinsstäuben bis in 8 km Höhe ausstoßen (Als dunkle Rauchfahnen sichtbar) . Die ausgestoßenen Partikel setzen sich auf der Oberfläche ab und bilden Ablagerungen aus gefrorenem Methan und Silikaten. Das Methan wandelt sich infolge der Sonneneinstrahlung in andere organische Verbindungen um, die als dunkle Schlieren und Streifen sichtbar sind.

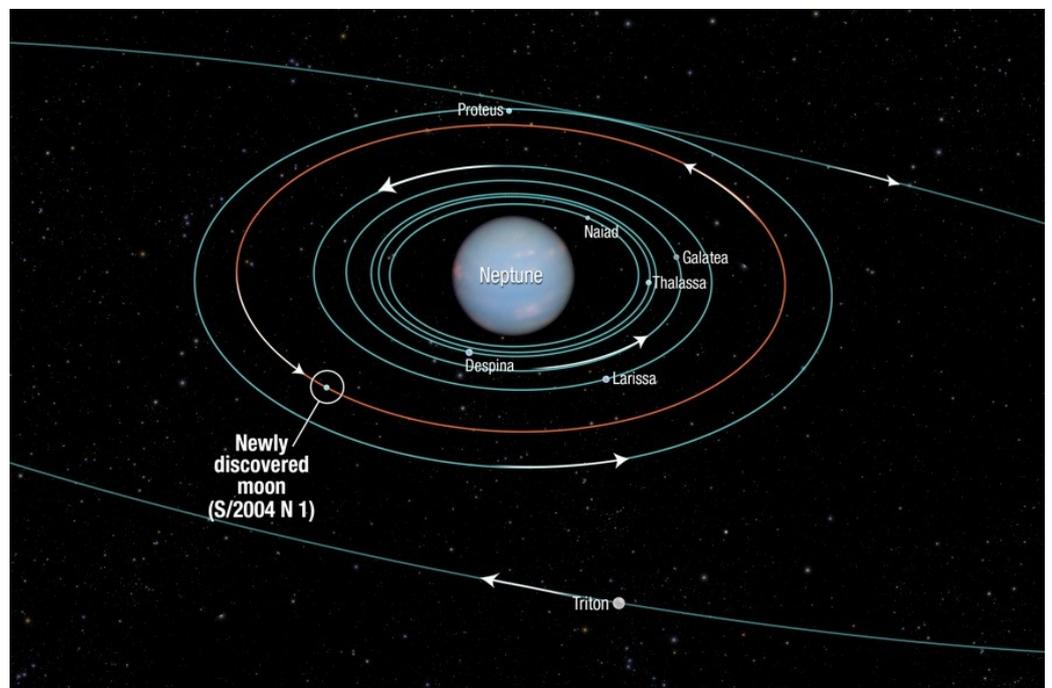


**II. Innere Monde: Die folgenden sieben Monde.**

**Proteus** (Neptun VII; benannt nach den alten Meeresgott, dem „Alten vom Meere“, der auf der Insel Pharos die Robben hütete: am 16. Juni 1989 von Stephen Synnott und Bradford Smith auf Bildern von Voyager 2 entdeckt) ist der zweitgrößte Satellit des Neptun und der größte nicht-kugelförmige Satellit des Sonnensystems. Gr. Halbachse 117.647 km, Exzentrizität 0,001, Inklination 0,52° Umlaufzeit 1,1d, gebundene Rotation, Achsenneigung 0°, Größe Ø 420 (436 × 416 × 404) km, nicht kugelförmig/elongiert, Oberfläche 2.195.000 km<sup>2</sup> (Saudi Arabien 2.150.000), 19,75 mag, Albedo 0,1 (einer der dunkelsten größeren Monde) , Masse  $5 \cdot 10^{19}$  kg, Dichte 1300 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,075 m/s<sup>2</sup> (0,76 % Erde), Fluchtgeschwindigkeit 180 m/s, Temperatur -222°. Farbe grau.



Weiter innen folgen zunächst S/2004 N 1 (Neptun XIV, der den Namen **Hippocamp** erhielt, Ø 34 km, 105.283 km), und dann fünf weitere Monde, deren Umlaufzeit kleiner als die Rotationsperiode Neptuns ist, sodass sie im Westen auf- und im Osten untergehen: **Larissa** (Neptun VII, Ø 194 km, 73.548 km), **Galatea** (Neptun VI, Ø 176 km, 61.953 km an der Innenseite des Adams-Rings), **Despina** (Neptun V, Ø 150 km, 52.526 km an der Innenseite des Le Verrier-Rings), und zwischen LeVerrier- und dem innersten Galle-Ring: **Thalassa** (Neptun IV, Ø 82 km, 50.075 km) und **Naiad** (Neptun III, Ø 67 km, 48.227 km, 23,500 km über den Wolken, innerster Mond, Umlaufzeit 7h 7 min, eine der kürzesten Perioden von Monden, die noch abnimmt).

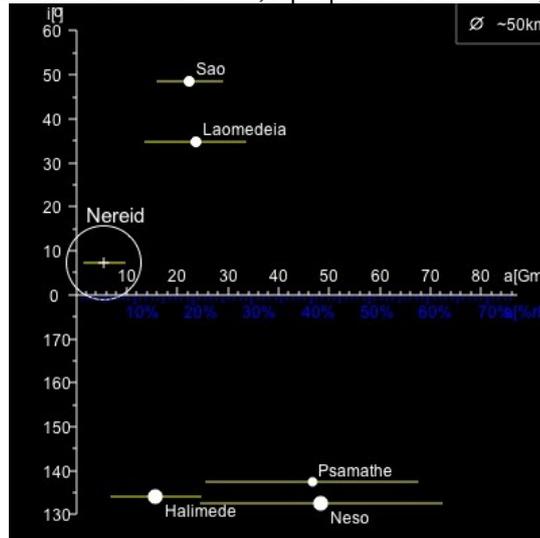


### III. Äußere Monde: Derzeit sechs.

**Nereid(e)** (Neptun II; benannt nach den Nereiden=Meernymphen, Töchter des weisen Nereus, Sodes des Pontos und der Gaia; am 1. Mai 1949 von Gerard Kuiper auf Fotoplatten entdeckt) ist der größte retrograd laufende Mond des Sonnensystems. Gr. Halbachse 5.513.787 km (Periapsis 1.374.587, Apoapsis 9.652.987, Exzentrizität 0,75, daher irregulär!, Inklination 32,6°), Umlaufzeit 360,1d, Rotation 11h 31min, Größe Ø 340 km, nicht kugelförmig/elongiert, Oberfläche 363.000 km<sup>2</sup> (Deutschland 357.000), 19,7 mag, Albedo 0,15, Masse  $3,1 \cdot 10^{19}$  kg, Dichte 1500 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,07 m/s<sup>2</sup> (0,7 % Erde), Fluchtgeschwindigkeit 160 m/s, Temperatur -223°. Farbe grau. Auf der Oberfläche ist u.a. Wassereis.



Es folgen von innen nach außen: **Halimede** (Neptun IX, Ø 62 km, 16.589.670 km, retrograd 134,1°; könnte ein Bruchstück von Nereide sein), **Sao** (Neptun XI, Ø 44 km, 22.182.010 km), **Laomedeia** (Neptun XII, Ø 62 km, 23.464.130 km); für nächsten beiden Monde wird ein gemeinsamer Ursprung vermutet: **Psamathe** (Neptun X, Ø 38 km, 46.695.000 km, retrograd 146,6°) und **Neso** (Neptun XIII, Ø 60 km, 132° retrograd, Gr. Halbachse 49.285.000, Apoapsis 77.446.500 km, äußerster Mond).

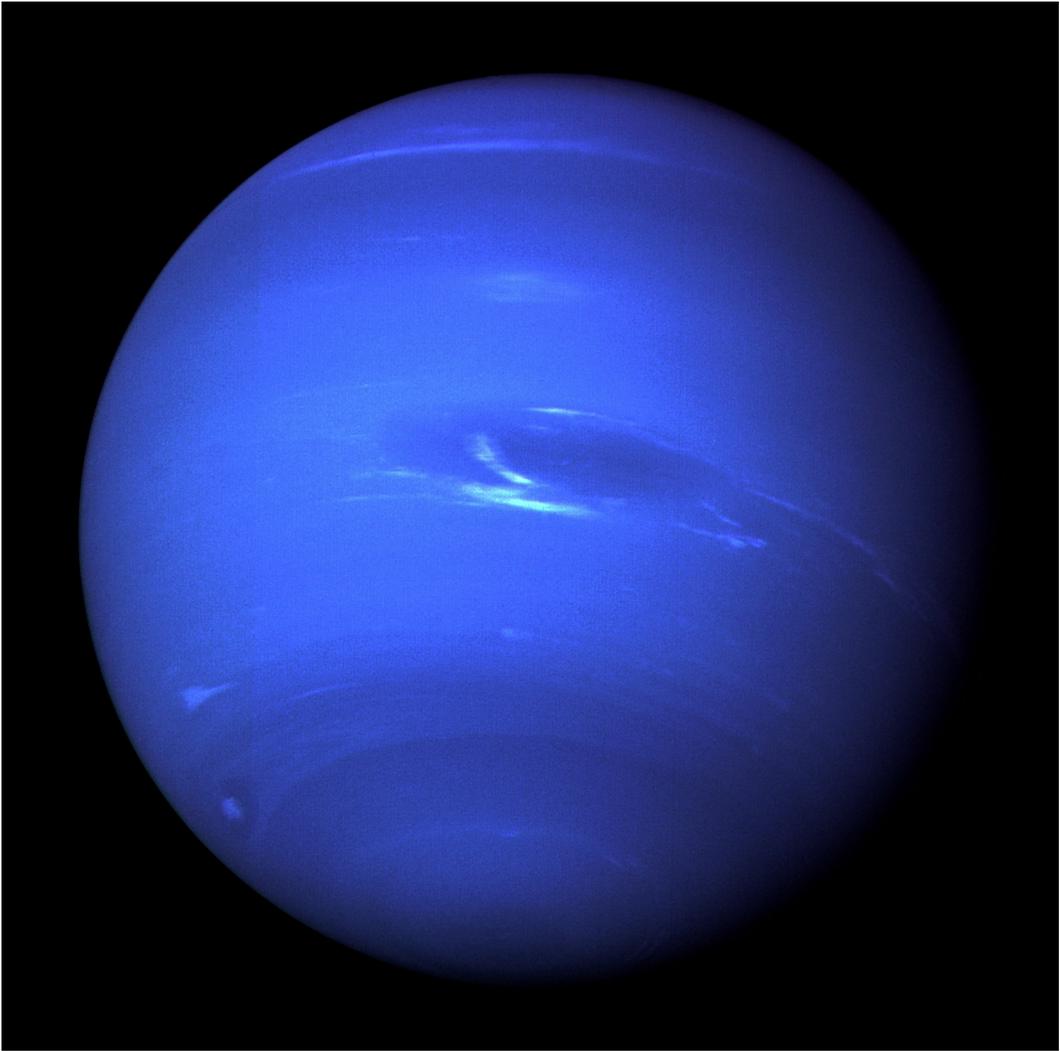


**Neptun-Trojaner:** Am 21. August 2001 wurde der erste Neptun-Trojaner entdeckt (2001 QR322, nahe den L<sub>4</sub>-Punkt, Ø 140 km, bislang größter). Am 12. August 2010 wurde der erste L<sub>5</sub>-Trojaner (2008 LC18, Ø 100 km) entdeckt. Mittlerweile sind zwölf bekannt, neun bei L<sub>4</sub> und drei bei L<sub>5</sub>. Die Neptun-Trojaner-Wolken sind dick, da große Inklinationen (bis 30° auftreten). Der Trojaner mit der größten bisher bekannten Inklination (29,4°) ist 2011 HM 102 (Ø 90-180 km), am 29. April 2011 von New Horizons KBO Search entdeckt, als die New Horizons-Sonde auf ihrem Weg zum Pluto den Trojaner im Abstand von 1,2 AU passierte.

Die großen Neptun-Trojaner (mit Durchmesser über 100 km) könnten zahlreicher sein als die Jupiter-Trojaner. Mit den Neptun-Trojaner wird der fünfte Ort im Sonnensystem entdeckt, an dem sich zahlreiche Kleinkörper in stabilen Bahnen aufhalten (nach dem Hauptgürtel, dem Kuipergürtel, und dem Bereichen der Mars- und Jupiter Trojaner).

#### Mission:

Voyager 2 (siehe Fußnote 57) flog am 25. August 1989 am Neptun vorbei; intensive Beobachtungen begannen am 6. August 1989. New Horizons flog am 29. April 2011 im Abstand von 1,2 AU an einem Neptun-Trojaner vorbei.



### Wie hell würde es sein, wenn man auf der Oberflächen eines jeden Planeten steht?

Zunächst haben nicht einmal alle Planeten eine Oberfläche, auf der man stehen kann (Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun); manche haben auch keine Atmosphären wie die Erde, die Licht streuen kann (Merkur),<sup>74</sup> bei manchen hat die Atmosphäre eine andere Dichte als auf der Erde (Venus, Mars). So sind die Vergleiche schwierig. Was Ich Ihnen sagen kann ist wie hell die Sonne wäre, relativ zu dem, was wir von ihr auf der Erde sehen. Dies entspricht auch der Gesamtenergie, die den Planeten direkt über der Wolkengrenze erreicht.

	Abstand (AU)	Solareinstrahlung	Helligkeit des Himmels	scheinbare Größe der Sonne (mag)
Merkur	0.38	6.9	3.4 stilb <sup>75</sup>	-30
Venus	0.72	1.9	1.0	-28.7
Erde	1.00	1.0	0.4	-28
Mars	1.5	1/2.2	0.2	-27.1
Jupiter	5.2	1/27	0.02	-24.4
Saturn	9.5	1/90	0.005	-23.1
Uranus	19.2	1/368	0.0013	-21.6
Neptun	30.0	1/900	0.0005	-20.6
Pluto	39.4	1/1552	0.0003	-20.0

Die Solareinstrahlung ist das Vielfache des irdischen Wertes: Sie berechnet sich einfach durch  $1 / \text{Abstand zum Quadrat}$ . Merkur empfängt also das 6,9-fache (ungefähr 7-fache) der Solareinstrahlung der Erde, Pluto empfängt nur den 1552-ten Teil. Die Helligkeit des Himmels ist die typische Helligkeit des blauen Himmels auf der Erde am Tage; wenn also die Planeten die gleiche Atmosphäre hätten wie die Erde, so gibt diese Spalte an, wie hell der Himmel über dem Planeten wäre. Beachte, dass ein bewölkerter Mittagshimmel auf der Erde nur ca. 0,2 stilb hat, und die gerade unter den Horizont getauchte Sonne eine Himmelselligkeit von 0,01 stilb erzeugt, von der Größenordnung her ähnlich wie auf Jupiter. Am Ende der nautischen Dämmerung, wenn die Sonne 12 Grad unter dem Horizont steht, hat der Himmel 0,0001 stilb, das ist also von der Größenordnung her vergleichbar mit der Helligkeit auf Pluto. Auf Planeten ohne Atmosphäre ist jedoch der Himmel Tag und Nacht perfekt schwarz, nur dass am Tag ein einziger heller Stern scheint ... die Sonne. Sogar auf Merkur können Sie Sterne und schwarzen Himmel auch am Mittag sehen, nur dass die Sonne dort 7 mal heller scheint, was aber nicht sehr bemerkenswert wäre. Der Vollmond hat eine scheinbare visuelle Helligkeit der Größe  $-18.0$ , so dass auf dem Pluto die Sonne um zwei Größenklassen heller wäre als der Vollmond, aber ihre Scheibe wäre im Durchmesser weniger als eine Bogensekunde groß, so dass sie für das menschliche Auge nicht erkennbar wäre

---

Englischer Originaltext: **How bright would it be to stand on the surfaces of each of the planets?** First of all, not all planets have either surfaces to stand on (Jupiter, Saturn, Uranus, Neptune) or atmospheres to diffuse the light as the Earth has (Mercury, Pluto) or have atmospheres the same density as the Earth (Venus, Mars). So comparisons are difficult. What I can tell you is how bright the Sun would be relative to what we see on the Earth and this controls the total energy reaching the planet just above its cloud tops.

	distance	Insolation	'sky' brightness	Sun mag
Mercury	0.38	6.9	3.4 stlb	-30
Venus	0.72	1.9	1.0	-28.7
Earth	1.00	1.0	0.4	-28
Mars	1.5	1/2.2	0.2	-27.1
Jupiter	5.2	1/27	0.02	-24.4
Saturn	9.5	1/90	0.005	-23.1
Uranus	19.2	1/368	0.0013	-21.6
Neptune	30.0	1/900	0.0005	-20.6
Pluto	39.4	1/1552	0.0003	-20.0

The insolation is just  $1/\text{distance}^2$  relative to Earth. So, Mercury receives nearly 7 times the solar energy as the Earth. Pluto receives 1552 times less. The sky brightness is the typical blue sky brightness on the Earth in daytime, so if the planets had the same atmosphere as the Earth, this column would be about how bright their skies would be. Note, overcast noon sky is about 0.2 stlb units, and the Sun just below the horizon gives a sky brightness of 0.01 stlb similar to Jupiter. At the end of nautical twilight when the Sun is 12 degrees below the horizon, the sky is 0.0001 stlb about what we might expect out by Pluto. However, for planets with no atmosphere, the sky will be perfectly black day and night, except for a single bright star...the Sun. Even at mercury you can see stars and black sky at high noon, its just that the Sun's disk would be 7 times brighter, which would not be very noticeable. The Full moon has an apparent visual magnitude of  $-18.0$ , so out by Pluto, the Sun would be 2 magnitudes brighter than the Full Moon, but its disk would be only 1 arcminute in diameter or less, and would not be discernable to the human eye.

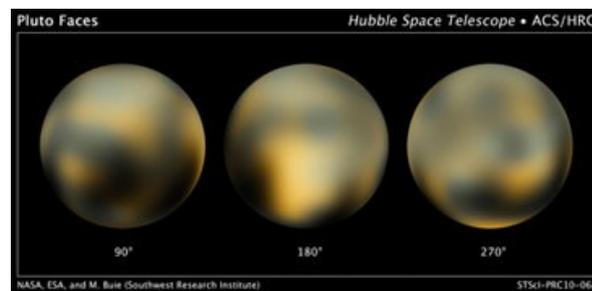
<sup>73</sup> Die Passage ist jedoch heute nicht mehr online, im Folgenden übertrage ich sie ins Deutsche.

<sup>74</sup> Dr. Odenwald fügt hier auch Pluto hinzu, aber nach neueren Erkenntnissen hat Pluto eine Atmosphäre. Außerdem ist nach der neuen Definition Pluto kein Planet mehr, sondern ein Zwergplanet.

<sup>75</sup> stilb ist eine veralteten Einheit für die Leuchttichte: 1 stilb = 1 Candela pro  $\text{cm}^2$  = „Kerzen pro Quadratzentimeter“.

## 1.14. Pluto und andere Trans-Neptun-Objekte

TNO<sup>76</sup> (134340)**Pluto** (röm. Gott der Unterwelt, auch *Orcus*, *Dis Pater*, griech. *Hades*, chin. 冥王星 (*Ming-wang-xing*) König der Unterwelt = jap. *Meioosei* = viet. *Sao Diêm Vương*), entdeckt am 18. Februar 1930 von Clyde William Tombaugh mit dem von Percival Lowell gegründeten Lowell Observatorium in Flagstaff, Arizona, USA (nach von Lowell 1906 initiiertes, 25-jähriger Suche nach dem vermuteten Transneptun-Planeten, von Lowell „Planet X“ genannt), „Pluto“ genannt nach dem Vorschlag der damals 11-jährigen Britin Venetia Phair, geborene Burney (auch weil die ersten beiden Buchstaben PL die Initialen von Percival Lowell sind), galt bis zur Neudefinition des Planetenbegriffs am 24. August 2006 als neunter Planet. Seitdem gilt er nur noch als Zwergplanet.<sup>77</sup> größtes der Objekte im Kuipergürtel (der sog. KBOs),<sup>78</sup> Neptunbahnkreuzer mit 2:3-Resonanz mit Neptun (2 Orbits von Pluto entsprechen drei von Neptun), und Namensgeber der Plutinos und Plutoiden.<sup>79</sup> Am 14. Juli 2015 flog die Raumsonde New Horizons in 9600 Kilometern Entfernung am Pluto vorbei, Symbol ♇ (nach den Anfangsbuchstaben von Pluto und den Initialen von Percival Lowell) oder ♇ (variiertes Neptun-Symbol).



Gr. Halbachse 39,482 AU (Perihel 29,658, Aphel 49,305, Exzentrizität 0,249), Inklination 17,2°, Umlaufzeit siderisch 247,68a, synodisch 366,73d, retrograde Rotation 6 d 9 h 17 min 34 s, Achsenneigung 122,53° (extreme Jahreszeiten!), Größe 2377 km (1/5 = 0,186 Erde), 16.763.853 km<sup>2</sup> (Russland 16,377,742; 17,840,000 Südamerika), Winkeldurchmesser 0,065", 13,65 – 16,3 mag, H = -0,7, Albedo 0,49 – 0,66 (35% Variation), Masse 1•10<sup>22</sup> kg, Dichte 2030 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,658 m/s<sup>2</sup>, (6,7 % Erde), Fluchtgeschwindigkeit 1,2 km/s, Temperatur -240 – -218°, Ø 229°; wegen Treibhauseffekt (Methan) ist die Temperatur 10 km über der Oberfläche 36° wärmer.

Atmosphäre: 1600 km dick (1/8 der Strecke bis zum großen Plutomond Charon), friert im Winter aus und fällt zu Boden; laut NASA beträgt der maximale Bodendruck im Sommer 0,3 Pascal (= 0,003 bar = 0,3% Erdatmosphäre) und laut ESO 1,5 Pascal. Der Hauptanteil ist Stickstoff, dann kommt Kohlenmonoxid, dann Methan. Es herrscht eine Inversionswetterlage: Am Boden herrschen -220°, in der unteren Atmosphäre -180°, in der oberen Atmosphäre -170°. Der Himmel über Pluto ist blau (bewirkt durch Lichtstreuung von Aerosolen); die Farbe von Wassereis auf dem Planeten ist merkwürdigerweise rot.

Plutos Gesamtfarbe ist rotbraun; einzeln treten die Farben schwarz, weiß und dunkel-orange hervor (leicht rot; Farbnuancen von Io, aber mehr ins orange gehend), mit einigen dunklen und (sehr) hellen Flecken (hohe Albedo!) Pluto hat eine der kontrastreichsten Oberflächen im Sonnensystem wie der Saturnmond Japetus. Die Farben wechselten von 1994 bis 2002/3, die Nordregion wurde heller, die Südregion dunkler. Der Nullmeridian ist definiert als mittlerer „sub-Charon Punkt“ auf der Planetenoberfläche (siehe zu Charon).

Die hellste Fläche ist die *Tombaugh Regio* nördlich des Äquators (auch „Herz Plutos“ genannt) zwischen der dunklen walförmigen *Cthulhu Regio* (*Cthulhu*, ein von H.P Lovecraft erfundenes Fantasy-Monster) im Nordosten und der dunklen *Krun Regio* (Krun, der größte der fünf mandäischen Herrscher der Unterwelt) im Nordwesten; der mittlere Teil der Tombaucht Regio ist das eisglatte *Sputnik Planum*. Cthulhu Regio und Krun Regio gehören zu einer Serie von sechs Dunkelflecken entlang des Äquators von Pluto. Auf dem Pluto meint man auch den Hund Pluto zu sehen, der 1930, im Entdeckungsjahr Plutos, von Walt Disney entworfen wurde.

Die Oberfläche besteht aus 98% aus Stickstoffeis mit Spuren von Methan- und Kohlenmonoxideis; man entdeckte auch einen zugefrorenen Stickstoff-See; die dem Mond Charon zugewandte Oberfläche hat dabei mehr Methaneins, die angewandte Oberfläche mehr Stickstoff- und Kohlenmonoxideis. Auf dem Boden gibt es auch Ethan. Zusätzlich gibt es eine hohe Bergkette aus Wassereis; die anderen Formen von Eis sind zu weich, um Gebirge zu bilden.

Der ganze Körper besteht aus einem Felskern 50–70% und einem Eismandel 50–30%. Der Kern dann 1700 km, 70% des Durchmessers haben; an der Kern-Mantel-Grenze könnte eine 100–180km dicke Schicht aus flüssigem Wasser existieren.

<sup>76</sup> *Trans-Neptunian-Object*, d.h. um die Sonne kreisendes Objekt mit großer Halbachse größer als 30 AU (= gr. Halbachse von Neptun); heute sind 1547 bekannt.

<sup>77</sup> Ein *Planet* ist ein um die Sonne kreisender Körper, der (1) keinen anderen um die Sonne kreisenden Körper umkreist (also kein *Mond* ist), der außerdem (2) genug Masse hat, um im hydrostatischen Gleichgewicht – annähernd rund – zu sein, und auf den drittens zutrifft, dass (3) auf seiner Bahn nicht noch andere Körper von derselben Größenordnung um die Sonne kreisen (Orbitaldominanz). – Ein *Zwergplanet* ist ein um die Sonne kreisender Körper, auf den (1) und (2), aber nicht (3) zutrifft.

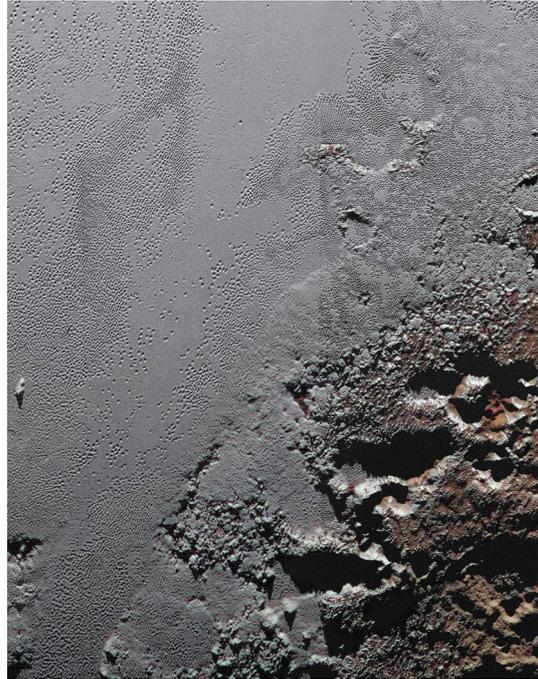
<sup>78</sup> Der *Kuipergürtel* ist das Gebiet außerhalb der Neptunbahn in 30-50 AU Abstand von der Sonne. Benannt ist er nach Gerard Peter Kuiper, einem US-Astronomen niederländischer Herkunft, der 1951 und 1974 einen comet belt in dieser Entfernung postuliert zu haben scheint. Das erste Kuipergürtel-Objekt (KBO) nach Pluto und dessen Mond Charon wurde 1992 entdeckt (1992 QB 1: 44 (40,9-47)AU, 167km), nach ihm heißen klassische Kuipergürtel-Objekte (solche mit geringer Exzentrizität) auch *Kubewanos* (Q-B-1-os); die übrigen KBOs sind resonante KBOs, die in bestimmten ganzzahligen Bahnresonanzen zu Neptun stehen wie Pluto und die Plutinos in einer 2:3 Resonanz (Fußnote 79) und die weiter außen kreisenden Twotinos in 2:1 Resonanz (in 47,8 AU, am äußeren Rand des Kuipergürtels).

<sup>79</sup> *Plutinos* sind Objekte des Kuipergürtels, deren Bahnelemente der des Pluto gleichen, die insbesondere wie Neptun in einer 2:3-Bahnresonanz zu Neptun stehen. *Plutoiden* sind Zwergplaneten, deren große Halbachse größer als 30 AU (gr. Halbachse von Neptun) ist.

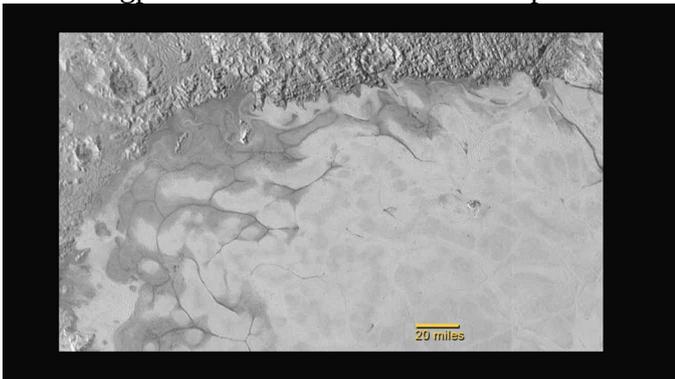
Bilder der Pluto-Sonde New Horizons 2015:



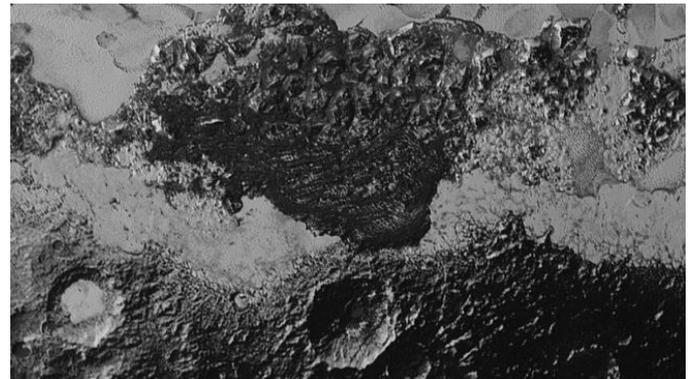
der Zwergplanet Planet mit seiner Atmosphäre



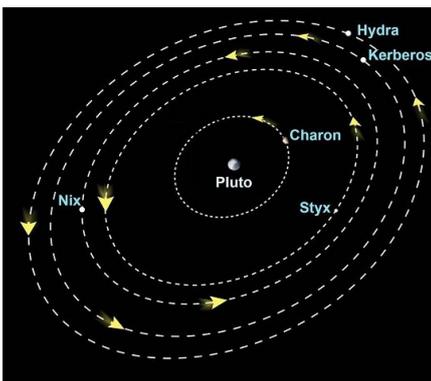
Details der Oberfläche



Details der Oberfläche



Landschaft mit großer Diversität



Pluto und seine fünf Monde

Die fünf Pluto-Monde<sup>80</sup> haben eine kreisförmige Umlaufbahn; ihre Bahnebenen sind komplanar mit der Äquatorebene des Pluto (nicht aber mit seiner dazu ungefähr senkrechten Bahnebene). Die Monde im Einzelnen sind **Charon** (Pluto I, 1978, Ø 1208 km, 17.536 km, Rotation: 6,387d ist doppel-gebunden, d.h. Pluto und Charon wenden *einander* immer dieselbe Seite zu, was im Sonnensystem einzigartig ist; dies gestattet es, Plutos Nullmeridian als denjenigen zu definieren, der durch den mittleren sub-Charon-Punkt geht; Charon ist bedeutend dunkler als Pluto), **Styx** (Pluto V, 2012, Ø 7 ´ 5 km, 42.000 km, 20,2d), **Nix** (Pluto II, 2005, Ø 42 ´ 36 km, 48.708 km, 24.856 d), **Kerberos** (Pluto IV, 2011, Ø 12 ´ 4,5 km, 59.000 km, 32,1d), **Hydra** (Pluto III, 2005, Ø 55 ´ 40 km, 64.749 km, 38,2d).

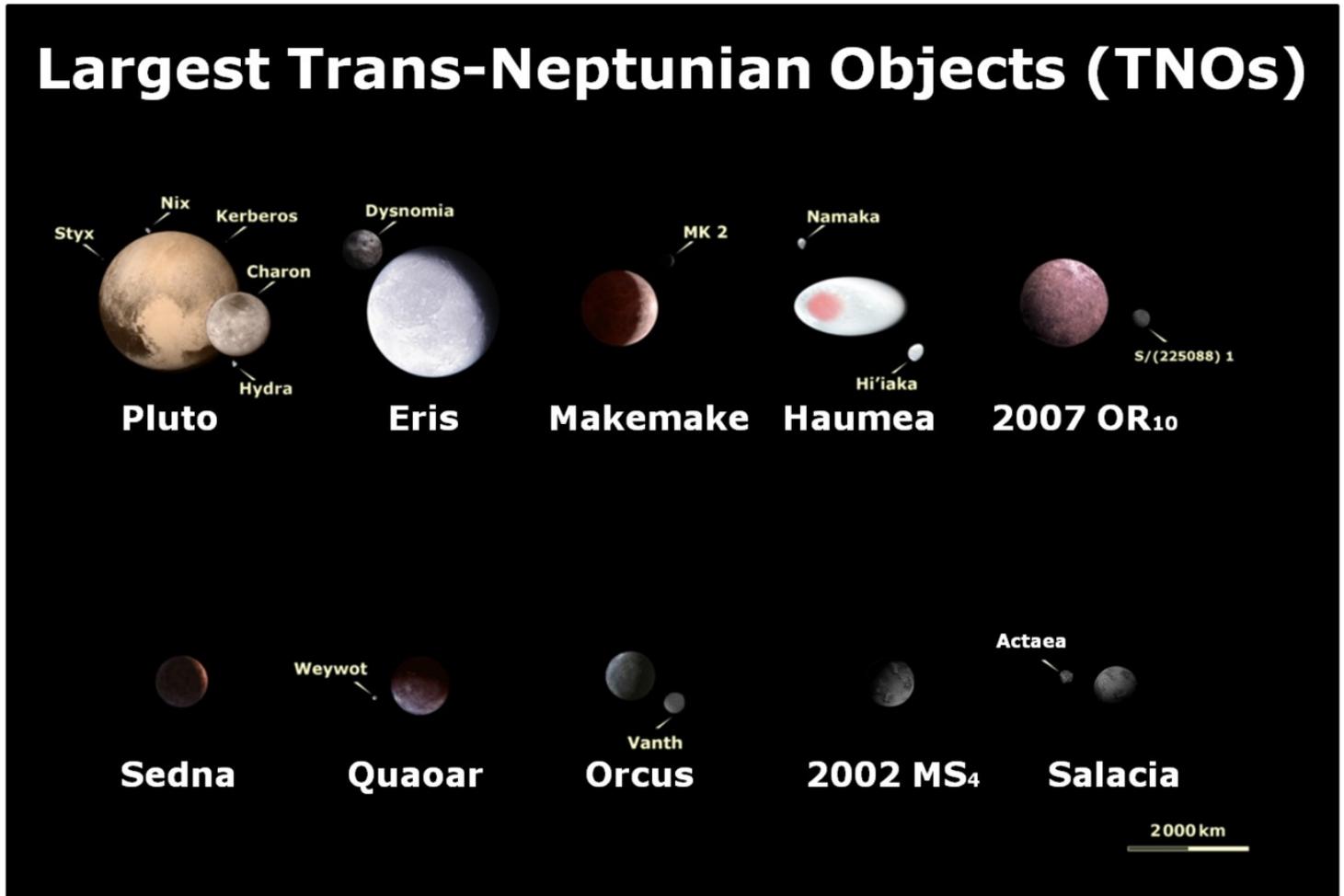


größter Plutomond Charon

Charon ist mehr als halb so groß wie Pluto, der Schwerpunkt des Pluto-Charon Systems liegt außerhalb von Pluto („Doppelplanet“). Die Monde sind rechtläufig, ihre Bahnen liegen fast in derselben Ebene (Inklinationen < 0,4°) und sind nahezu kreisförmig (Exzentrizitäten < 0,005). Styx, Nix, Kerberos and Hydra stehen in ungefährer 3:1, 4:1, 5:1 and 6:1-Resonanz mit Charon. Die Durchmesser sind von der unbekanntenen Albedo abhängig; ist diese wie bei Charon ca. 0,35, liegen sie nahe der unteren Grenze, d.h. nach abnehmender Größe geordnet folgen Charon (1210 km), Hydra (61 km), Nix (46 km), Kerberos (13 km), Styx (10 km). Die Farbe der Monde ist gleich, nämlich grau.

<sup>80</sup> Der erste Plutomond Charon wurde am 22. Juni 1978 von James Christy entdeckt; die übrigen vom „Hubble Space Telescope Pluto Companion Search Team“ am 15. Mai 2006 (Nix und Hydra), am 20. Juli 2011 (Kerberos) und am 7. Juli 2012 (Styx).

Übersicht über die zehn größten TNOs:



**Bemerkenswerte Tatsachen über die oben abgebildeten zehn größten TNOs:**

1. Bei acht von ihnen (also bei fast allen) hat man mindestens einen Mond entdeckt.
2. Pluto, Eris, Makemake und Haumea haben (wie Ceres aus dem Asteroidengürtel) offiziell den Status von *Zwergplaneten*<sup>81</sup> erhalten.
2. Eris ist wesentlich weiter von der Sonne entfernt als Pluto, aber von vergleichbarer Größe wie Pluto (wie man zuerst dachte, sogar ein wenig größer, aber Pluto bleibt, wie man jetzt weiß, wohl doch die Nr. 1 unter den TNOs).
3. Haumea ist eiförmig.
4. 2007 OR 10 hat den Namen Gonggong bekommen.

Hier einige bemerkenswerten TNOs, geordnet nach zunehmender Entfernung von der Sonne (große Halbachse):

TNO (90482)**Orcus** (röm. Gott der Unterwelt, auch Pluto, Dis Pater), am 17. Februar 2004 von Mike Brown et al. in Pasadena, KBO & Plutino, vielleicht Zwergplanet (und damit Plutiod).

Gr. Halbachse 39,321 AU (Perihel 30,555, Aphel 48,087, Exzentrizität 0,223), Inklination 20,5°, Umlaufzeit 246a 212d, Rotation 13,19h, Größe 814 km, 2.081.607 km<sup>2</sup> (Saudi Arabien 2,149,690), max. 19,1 mag, H = 2,3, Albedo 0,28, Masse 6•10<sup>20</sup> kg, Dichte 1530 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,27 m/s<sup>2</sup>, (2,75 % Erde), Fluchtgeschwindigkeit 450 m/s, Temperatur -229°, Spektrum bläulich, B-V=0.68; V-R=0.37. Orcus hat eine graue Farbe (hohe Albedo) und wasserreiche Oberfläche.

Orcus-Mond: Im Februar 2007 gab ein Team um Mike Brown die Entdeckung des (moderat rötlichen) Mondes **Vanth** (etruskische geflügelte Seelenbegleiterin der Sterbenden, sog. Psychopompos) mit 262 km Durchmesser bekannt, der auf Aufnahmen aus dem Jahr 2005 entdeckt wurde und Orcus in nur 9030 km Entfernung in 9,5 Tagen umkreist.

Wie Pluto steht Orcus in 2:3-Resonanz mit Neptun, befindet sich aber immer in der entgegengesetzten Orbitphase: im Aphel, wenn Pluto im Perihel ist, und umgekehrt, daher (und auch, weil er mit seinem großen Mond Vanth dem Pluto-Charon-System gleicht) heißt Orcus auch der „Anti-Pluto“.

An zweiter Stelle käme der oben schon genannte Pluto mit Halbachse 39,482 AU.

TNO (28978)**Ixion** (Lapithenkönig, der die Gastfreundschaft missbraucht, und dafür in der tiefsten Unterwelt, im Tartaros, an einem

<sup>81</sup> Zur Definition des Planeten und Zwergplaneten siehe Fußnote 77.

Rad gequält wird), entdeckt am 2. Juli 2001 von einer Astronomengruppe am Lowell Observatorium in Flagstaff / Arizona; KBO & Plutino (2:3 Resonanz zu Neptun) und sehr wahrscheinlich ein Zwergplanet;  
Gr. Halbachse 39,68 AU (Perihel 30,09, Aphel 49,27, Exzentrizität 0,242), Inklination 19,6°, Umlaufzeit 250a, Größe 650 km, 1.327.323 km<sup>2</sup> (Peru 1,285,216), max. 19,6 mag, H = 3,86, Albedo 0,12, Temperatur -229°,  
Spektraltyp moderat rot (etwas röter als Quaoar) B-V = 1.03, V-R = 0.61.

TNO (**307261**) **2002 MS4**, ein vorgeschlagener, aber noch nicht angenommener Eigenname: **Homonoia** (griech. Eintracht), a großes Objekt ohne besondere Auffälligkeiten; entdeckt am 18. Juni 2002 von Michael E. Brown und Chadwick A. Trujillo, wahrscheinlich Zwergplanet (und damit Plutoid), Gr. Halbachse 42,010 AU (Perihel 36,172, Aphel 47,848, Exzentrizität 0,13), Inklination 17,7°, Umlaufzeit 269.5a, Rotationsperiode unbekannt,<sup>82</sup> Größe knapp unter 1000 km,<sup>83</sup> 20,6 mag, H= 3,6; Albedo 0.051, Masse (und somit auch die Dichte) kann aufgrund eines fehlenden Mondes nicht geschätzt werden.

TNO (120347)**Salacia** (Frau Neptuns), entdeckt am 22. September 2004 von Mike Brown et al. am Palomar Observatorium, KBO & Kubewano, ziemlich sicher Zwergplanet (und damit Plutoid), hat die dunkelste Albedo und die kleinste Dichte von allen TNOs gleicher Größe, und weniger als 5% Wassereis (obwohl die Dichte der von Wasser gleichkommt); so existieren vielleicht große Hohlräume.  
Gr. Halbachse 42,189 AU (Perihel 37,838, Aphel 46,540, Exzentrizität 0,10), Inklination 23,9°, Umlaufzeit 274a, Rotation 6h, Größe 905 km, 2.291.213 km<sup>2</sup> (Algerien 2,381,740), 20,7 mag, H = 4,2, Albedo 0,035, Masse  $5 \cdot 10^{20}$  kg, Dichte 1160 kg/m<sup>3</sup>.  
Salacia-Mond **Actaea** (Nereide=Seenymphe), entdeckt am 21. Juli 2006 von Keith Noll et al. mit dem Hubble Space Teleskop mit 300 km Durchmesser (sehr groß = 1/3 von Salacia, daher Doppelasteroid), der Salacia in 5619 km Entfernung in 5,5 Tagen umkreist.

TNO (2000)**Varuna** (Hindu-Gott des Wassers, Ozeans, Gesetzes und der Unterwelt), entdeckt am 28. November 2000 von Robert McMillan, Leiter des Spacewatch-Projekts, registriert auf Fotoplatten von 1953, KBO & Kubewano, sehr wahrscheinlich ein Zwergplanet (und damit Plutoid), Gr. Halbachse 42,9 AU (Perihel 40,5, Aphel 45,3, Exzentrizität 0,056), Inklination 17,2°, Umlaufzeit 281,03a mit 4,53 km/s, Rotation 6,34h, Sphäroid mit Achsen 2:3, Größe 900 km, 2.544.690 km<sup>2</sup> (Algerien 2,381,741), max. 19,9 mag, H = 3,6, Albedo 0,04, Masse  $4 \cdot 10^{20}$  kg, Dichte 992 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,15 m/s<sup>2</sup>, (1,5 % Erde), Fluchtgeschwindigkeit 390 m/s, Temperatur -232 – -230, Spektraltyp moderat rot (B-V=0.93; V-R=0.64).

TNO (50000)**Quaoar** (geschlechts- & gestaltlose Schöpfergöttheit der Tongva-Indianer bei Los Angeles, welche die Welt ins Leben sang & tanzte), entdeckt am 4. Juni 2002 von Mike Brown et al. KBO & Kubewano, ziemlich sicher Zwergplanet (und damit Plutoid).  
Gr. Halbachse 43,179 AU (Perihel 41,606, Aphel 44,752, Exzentrizität 0,036), Inklination 7,99°, Umlaufzeit 283a9M mit 4,52 km/s, Rotation 18h, Größe 890 km (1/12 Erde, 1/3 Mond, 1/3 Pluto) 2.488.456 km<sup>2</sup> (Algerien 2,381,740), max. 19,3 mag, H = 2,5, Albedo 0,2, Masse  $2 \cdot 10^{21}$  kg, Dichte 3500 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,3 m/s<sup>2</sup>, (3 % Erde), Fluchtgeschwindigkeit 0,6 km/s, Temperatur -230°, Spektraltyp moderat rot B-V=0.94, V-R=0.64.  
Quaoar-Mond **Weywot** (Himmelsgott, Sohn Quaoars), am 22. Februar 2007 auf der Basis von Photos vom 14 Februar 2006 entdeckt von Mike Brown et al, 40km, 12,4d. 2023 wurde um Quaoar ein relativ großer **Ring** entdeckt.

TNO (136108)**Haumea** (hawaiischen Göttin der Fruchtbarkeit), auf Bildern vom 6. Mai 2004 entdeckt am 28. Dezember 2004 von Mike Brown et al. in Pasadena und zunächst „Santa“ genannt; von der Entdeckung wurde am 20. Juli 2005 im Internet ein Bericht publiziert; vom 27. Juli von Luis Ortiz Moreno et al. in Spanien mit Hilfe von Bildern vom 7.-10. März 2003 ebenfalls entdeckt; von der IAU am 17. Sept. 2008 als Zwergplanet anerkannt; KBO, Zwergplanet & Plutoid in 7:12-Resonanz zu Neptun. Wegen schneller Rotation (3h 45min) langgestreckte Eiform (2200 km Äquatordurchmesser und nur 1100 km Abstand der Pole), Gr. Halbachse 43,342 AU (Perihel 35,159, Aphel 51,524, Exzentrizität 0,189), Inklination 28,2°, Umlaufzeit 285,3a, Rotation 3h 55m, Größe 2200×1100 (1300) km, 5.309.292 km<sup>2</sup> (Australien 7,633,565), max. 17,3 mag, H = 0,43, Albedo 0,80, Masse  $4 \cdot 10^{21}$  kg, Dichte 2630–3300 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,63 m/s<sup>2</sup>, (6,4 % Erde), Fluchtgeschwindigkeit 0,9 km/s, Temperatur < -223°, Spektrum B-V = 0,64, V-R = 0,33.  
Die zwei Haumea-Monde:<sup>84</sup> **Hi'iaka** (Ø 310 km, 49.880 km, 49,5d, Exzentrizität 0,05, Inklination 126°) und **Namaka** (Ø 170 km, 25.657 km, 18,3d, Exzentrizität 0,25, Inklination 113°), benannt nach Töchtern der Göttin Haumea (Namaka ist ein aus dem Körper von Haumea entstandener Wassergeist; Hi'iaka ist Patronin von Hawaii und Hula-Tänzern); die Bahnebenen der Monde sind 13° zueinander geneigt. Haumea ist auch von einem schmalen und dichten **Ring** umgeben, der 2017 im Rahmen der Beobachtungen einer Sternbedeckung entdeckt wurde.

TNO (15760)**1992 QB 1**, entdeckt von David C. Jewitt und Jane Luu am Mauna-Kea-Observatorium in Hawaii am 30. August 1992, erstes TNO, das nach Pluto und Charon gefunden wurde, Namensgeber der Kubewanos (von QB1), der von den Entdeckern vorgeschlagene Name „Smiley nach Agent George Smiley (literarische Figur) wurde nicht anerkannt, da der Name schon an den 1950 entdeckten Hauptgürtel-Asteroid (1613) Smiley (nach dem Astronomen Charles Hugh Smiley) vergeben worden war.  
Gr. Halbachse 44,0 AU (Perihel 40,9, Aphel 47,0), Exzentrizität 0,07), Inklination 2,2°, Umlaufzeit 292a mit 4,49 km/s, Rotation 10h, Größe 167 km, 87.616 km<sup>2</sup> (Aserbeidschan 86.600), 23,4 mag, H = 7,2, Albedo 0.2

<sup>82</sup> Beobachtungen 2005 and 2011 lassen auf 7,33 Stunden aber 10,44 Stunden oder auch jeweils doppelt so viel schließen.

<sup>83</sup> 726±123 km. nach Schätzungen aufgrund von Beobachtungen mit dem Spitzer Teleskop; 934±47 km nach Schätzung des Herschel Teams; durch Beobachtung einer Sternbedeckung ergab sich ein Durchmesser zumindest an einer Stelle von 831 km.

<sup>84</sup> Beide von Mike Brown et al. am Keck Observatorium (Hawaii) 2005 entdeckt: Hi'iaka am 26. Januar 2005 und zunächst „Rudolph“ genannt, und Namaka am 30. Juni und zunächst „Blitzen“ genannt (Rentiere von Santa Claus).

TNO (486958) **Arrokoth**,<sup>85</sup> auch **2014 MU 69**, war vorläufig **Ultima Thule** genannt worden (ultima = letztes/entferntestes; und Thule = Bezeichnung für eine mythische oder reale Insel im hohen Norden, von welcher der griechische Seefahrer Pytheas von Massilia um 320 v. Chr. spricht; der Name scheint auf keltische oder germanische Sagen über eine mythische Insel zurückzugehen), entdeckt mit dem Hubble-Weltraumteleskop am 26. Juni 2014 während die New Horizons-Sonde noch zum Pluto unterwegs war, als weiteres Ziel für diese Sonde nach dem Vorbeiflug an Pluto ausgesucht.



Arrokoth sieht aus wie ein Schneemann: besteht aus zwei Körpern, die sich berühren („contact binary“), der maximale Durchmesser beträgt 31,7 km, wovon 19,5 km auf die größere Komponente „Ultima“ und 14,2 km auf die kleinere „Thule“ entfallen. Die Bahn ist beinahe kreisförmig und nur wenig gegen die Ekliptik geneigt. Es handelt sich daher um ein „kaltes“ (d.h. in der Umlaufbahn kaum jemals gestörtes) klassisches Kuipergürtelobjekt. Am 1. Januar 2019 flog die Sonde New Horizons nach ihrem Vorbeiflug an Pluto auch an Ultima Thule vorbei.

Auf der Oberfläche sind rote Tholine.<sup>86</sup> Arrokoth war bis dahin erdfernste Objekt, das von einer Sonde aus der Nähe untersucht wurde. Gr. Halbachse 44,63 AU (Perihel 42,363, Aphel 46,883, Exzentrizität 0,051), Inklination 2,45°, Umlaufzeit 298a 2M, Rotation 15h, Durchmesser 31,7 km (19,5 Ultima; 13,2 Thule), 26,8 mag, H = 11.1, Albedo 0.04 rötliche Farbe.

TNO (19521) **Chaos** (Götter-Ursprung), entdeckt am 19. November 1998 im Rahmen des Deep Ecliptic Survey mit dem Kitt Peak's 4m Teleskop / Arizona; KBO & Kubewano; Gr. Halbachse 45.599 AU (Perihel 40,929, Aphel 50,269, Exzentrizität 0,102), Inklination 12,1°, Umlaufzeit 309,1a mit 4,39 km/s, Rotation 3,985d, Größe 600 km, 1.130,973 km<sup>2</sup> (Kolumbien 1,141,748), H = 4,8, Albedo 0,05,

TNO (136472)**Makemake** (Schöpfer der Menschheit und Fruchtbarkeitsgott der Rapanui, der polynesischen Urweinwohner der Osterinsel), entdeckt am 31. März 2005 von Mike Brown et al. am Mount Palomar und zunächst „Easterbunny“ genannt; die Entdeckung wurde zusammen mit der von Haumea und Eris am 29. Juli bekannt gegeben; von der IAU am 11. Juli 2008 als Zwergplanet anerkannt; KBO, Zwergplanet & Plutoid in 6:11-Resonanz zu Neptun.

Gr. Halbachse 45,715 AU (Perihel 38,590, Aphel 52,840, Exzentrizität 0,156), Inklination 29°, Umlaufzeit 309,1a, Rotation 7,8h, Größe 1426 km, 6,388,353 km<sup>2</sup> (Australien 7,633,565), max. 16,7 mag, H = -0,44, Albedo 0,81, Temperatur -235°, Spektrum B-V=0.83, V-R=0.5, also rötlich (ähnlich wie Pluto).

Am 26. April 2016 wurde ein Mond entdeckt, der **S/2015 (136472) 1** genannt wird und einen Durchmesser von ca. 175 km hat.

TNO (225088)**Gonggong** (chinesischer drachenartiger Wassergott mit rotem Haar, zuständig für Chaos, Fluten und die Neigung der Erdachse, der bekämpfte Yao, den vierten der fünf Urkaiser Chinas),<sup>87</sup> zuvor **2007 OR 10** und mit Spitznamen Snow White (Schneewittchen) benannt – der Name wurde als unpassend empfunden, nachdem man festgestellt hatte, dass die Farbe eher rot ist – entdeckt von Mike Brown et al. am 17. Juli 2007, bekannt gegeben am 7. Januar 2009; SDO oder RKBO (3:10 Resonanz); wahrscheinlich Zwergplanet.

Gr. Halbachse 66,85 AU (Perihel 33,03 Aphel 100,66, Exzentrizität 0,51), Inklination 20,9°, Umlaufzeit 546,6a, Größe 1230 km (fünftgrößtes Objekt im Kuipergürtel, nach Pluto, Eris, Haumea und Makemake, etwa von der Größe des Plutomondes Charon), 4.753.000 km<sup>2</sup> (Landfläche Indien ca. 3.000.000, Australien 7.682.300), max. 21,3 mag, H = 2,0, Albedo 0,185, Temperatur -242°, Spektrum rot. Erreichte das Perihel 1857, momentan 87 AU Entfernung, entfernt sich weiter, ist nach Eris das am weitesten entfernte bekannte Objekt des Sonnensystems; Rotationsperiode 22 Stunden.

Am 17. Oktober 2016 wurde die Entdeckung eines 300 km großen Mondes bekannt gegeben, der schon am 18. September 2010 von Gábor Marton, Csaba Kiss (Konkoly-Observatorium, Budapest, Ungarn) und Thomas G. Müller (Max-Planck-Institut, Göttingen, Deutschland) bei Beobachtungen mit dem Hubble-Weltraumteleskop entdeckt worden war. Am 5. Februar 2020 wurde der Mond nach der neunköpfigen Giftschlange **Xiangliu** (dem Minister von Gonggong) aus der chinesischen Mythologie benannt. Seine große Halbachse beträgt 15.000 km, seine Rotationsperiode 25 Tage, seine Inklination gegen die Ekliptik 83 Grad (!), und sein Durchmesser ca. 100 km. Xiangliu ist viel weniger rot als Gonggong, die Differenz in der Farbe ist extrem und atypisch.

TNO (136199)**Eris** (Göttin der Zweitracht und des Streits, Tochter der Nyx, Schwester des Ares), am 5. Januar 2005 entdeckt von Mike Brown et al. auf Bildern vom 21. Oktober 2003 vom Moun Palomar Observatorium, auch auf Aufnahmen vom 3. September 1954 identifiziert und zuerst „Xena“ genannt (nach „Xena – Die Kriegerprinzessin“, einer in den Jahren 1995 bis 2001 produzierten US-amerikanisch-neuseeländische Fernsehserie). Wegen der zunächst angenommener Größe von Eris von ca. 3000 km Durchmesser, welche jene von Pluto übertraf, der damals noch als Planet klassifiziert wurde und als „neunter Planet“ galt, wurde Eris bis 2006 als „zehnter Planet“ bezeichnet. Heute glaubt man jedoch, dass Eris kleiner ist als Pluto: Pluto ist also nach wie vor das größte bisher bekannte Trans-Neptun-Objekt und somit der „König der Trans-Neptune“, und Eris ist nur das zweitgrößte; wohl aber hat Eris eine größere Masse als Pluto, ist also das massereichste bekannte Trans-Neptun-Objekt. Eris wurde am 13. September 2006 zusammen mit Pluto als Zwergplanet akzeptiert; die Eris-Entdeckung war der Grund für die Rückstufung von Pluto zum Zwergplaneten und den damit

<sup>85</sup> Das Wort bedeutet in der Sprache der Virginia-Algonquin- und Powhatan-Indianer „Himmel“.

<sup>86</sup> *Tholine* (abgeleitet vom griechischen Wort für schlammig) bezeichnet eine rötlich braune Mischung komplexer organischer Moleküle aus Kohlenstoff, Stickstoff und Wasserstoff, die sich in der Atmosphäre von Gasplaneten, Monden oder Kometen unter Einfluss von UV-Strahlung und des Sonnenwindes bilden. Es gibt sie offenbar nicht auf der Erde, wohl aber auch dem Saturnmond Titan, auf Kometen und Pluto, sowie auf Arrokoth.

<sup>87</sup> Der Name „Gonggong“ erhielt bei einer öffentliche Abstimmung, bei der zwischen drei Namen *Gonggong*, *Holle* (deutsche Wintergöttheit und Schneemacherin „Frau Holle“) und *Vili* (nordischer Gott, der mit seinen Brüdern Odin and Ve den Urzeitriesen Ymir besiegte und aus seinem Körper das Universum schuf) zu wählen war, die meisten Stimmen. Offiziell ist er noch nicht von der Internationalen Astronomische Union angenommen, aber es ist davon auszugehen, dass er bald angenommen wird.

verbundenen Streit (daher der Name „Eris“ = griech. Streit). Eris ist also Zwergplanet jenseits des Neptun und daher auch ein „Plutoid“. Ferner ein Scattered Disk Object (SDO)<sup>88</sup> in 5:17-Resonanz zu Neptun. Symbol: ♁.

Gr. Halbachse 67,78 AU (Perihel 37,91, Aphel 97,65 (15 Mrd. km, 13,5 Lichtstunden), Exzentrizität 0,44), Inklination 44°, Umlaufzeit 558a, Rotation 25,9 h, Größe 2326 km, 17.000.000 km<sup>2</sup> (Russland 16,377,742), max. 18,8 mag, H = -1,2, Albedo 0,96, Masse  $2 \cdot 10^{22}$  kg, Dichte 2520 kg/m<sup>3</sup>, Schwerkraft 0,827 m/s<sup>2</sup>, (8,4 % Erde), Fluchtgeschwindigkeit 1,4 km/s, Temperatur -243° – -218° (-230,5°). 2014 betrug die Distanz 96,4 AU und somit ist Eris das momentan am weitesten entfernte bekannte Objekt des Sonnensystems.

Momentan befindet sich Eris in der Nähe des Aphel, welches sie 1977 erreicht hatte und von dem sie sich nun wieder entfernt.

Eris-Mond **Dysnomia** (Gesetzlosigkeit, Tochter der Eris), am 10. September von Mike Brown et al. mit dem Mauna Kea Teleskop Hawaii entdeckt und zuerst „Gabrielle“ genannt (Xenas Mitstreiterin in der TV-Serie „Xena – Die Kriegerprinzessin“), 100–250 km, 37.350 km, 15,7 d, Exzentrizität < 0,013, Inklination 63,3° oder 142°, Spektrum B-V=0,78, V-R = 0,45.

### Extreme:

TNO (90377)**Sedna** (Meeresgöttin der Inuit, die Alte der Meere), entdeckt am 14. November 2003 von Mike Brown et al. am Mount Palomar Observatorium, Entdeckung wurde am 15. März 2004 bekannt gemacht; nachträglich wurde Sedna auch auf älteren Aufnahmen 2001 bis 2003 gefunden; (Extended) Scattered Disk Object (E-SDO) oder Detached Object oder innere Oortsche Wolke; wahrscheinlich Zwergplanet und somit Plutoid.

Gr. Halbachse 540 AU (Perihel 76 AU, Aphel 936 AU, Exzentrizität 0,86), Inklination 11,9°, Umlaufzeit 11.400a mit 1,04 km/s, Rotation 10h, Größe 995 km, 3.110,255 km<sup>2</sup> (Indien 3,166,414), zur Zeit 21,1 mag, max 20,5 mag, H = 1,6, Albedo 0,32, Masse  $1 \cdot 10^{21}$  kg, Dichte 2000 kg/m<sup>3</sup>, S Temperatur -261°, Spektrum stark rötlich, eines der rötlichsten Objekte des Sonnensystems B-V=1,24; V-R=0,78. Homogen (kaum Krater, weil „einsamer Wanderer“), hat vielleicht einen unterirdischen Ozean aus flüssigem Wasser. Derzeit bei 89 AU, nähert sich dem Perihel, das sie 2076 erreicht.

TNO (87269)**2000 OO 67** hat Gr. Halbachse 544 AU, ein Aphel von 1069 AU kommt im Perihel näher als Neptun (20,7566 AU, Exzentrizität 0,962, Inklination 20,1°) und benötigt 12.705 Jahre für einen Umlauf; Durchmesser 38–86 km.

TNO **2004 XR 190**, entdeckt am 11 Dezember 2004 von Lynne Jones et al., Gr. Halbachse 57,7 AU (Perihel 51,4, Aphel 64, Exzentrizität 0,1, Inklination 46,6°), größtes Objekt mit Inklination über 45°, Umlaufzeit 438,45 a, Größe 425–850 km.

TNO (308933)**2006 SQ 372** hat Gr. Halbachse 796 AU, ein Aphel von 1500 AU kommt im Perihel näher als Neptun (24,2 AU, Exzentrizität 0,976, Inklination 19,4°) und benötigt 22.500 Jahre für einen Umlauf; Durchmesser vermutlich 110 km.

TNO **2012 VP 113** (Spitzname „VP“ für Vizepräsident, oder „Biden“ genannt), entdeckt am 5 November 2012 von Scott Sheppard et al., Entdeckung bekannt gegeben am 26 März 2014, Objekt mit dem größten bekannten Perihel; Gr. Halbachse 263 (Perihel 80,5, Aphel 446, Exzentrizität 0,696, Inklination 24°), Umlaufzeit 4268 Jahre, Größe 450 km, Farbton pink.

TNO **V774104**, entdeckt von Scott Sheppard und Chad Trujillo vom Gemini Observatory in Hawaii auf dem Gipfel des Mauna Kea mit Japans 8-Meter Subaru Telescope, verkündigt im November 2015, Objekt mit einer derzeitigen Entfernung 103 AU (größer als die derzeitige Entfernung von Eris mit 97 AU), Größe 500-1000 km

TNO **2018 VG 18** (Spitzname: **Farout**, „weit draußen“), entdeckt am 10. November 2018 von Scott Sheppard, David Tholen und Chad Trujillo mit dem 8,2-m-Subaru-Teleskop am Mauna-Kea-Observatorium (Hawaii), bekannt gegeben am 17. Dezember 2018 bekanntgegeben, derzeitige Entfernung 120 AU, Gr. Halbachse 81,4 AU (Perihel 37,8 AU, Aphel 125 AU), Umlaufzeit 735 Jahre, geschätzte Größe 500 km.

TNO **2018 AG 37** (Spitzname: **FarFarout**, „weit weit draußen“), im Januar 2018 abgebildet, am 21. Februar 2019 bekannt gegeben von Scott Sheppard, David J. Tholen und Chad Trujillo, derzeitige Entfernung 132 AU (das derzeit am weitesten entfernte bekannte Objekt im Sonnensystem), Gr. Halbachse 86 AU (Perihel 27,8 AU, Aphel 145 AU), Umlaufzeit 779,5 Jahre.

TNO **2017 MB 7** wurde zuerst am 22. Juni 2017 vom Pan-STARRS Survey am Haleakala Observatorium in Hawaii gesichtet. Es hat das größte bekannte heliozentrische Aphel unter den Kleinplaneten. Gr. Halbachse 1712±45 AU (Perihel 4,5 AU, Aphel 3419±89 AU), Umlaufzeit 70.825 Jahre, Exzentrizität 0,9974, Durchmesser 7 km.

---

<sup>88</sup> SDO, scattered disk object, gestreutes Objekt: um die Sonne kreisender Körper mit Perihelium größer als 30 AU (also außerhalb der Neptunbahn) mit großen Exzentrizitäten (so dass die Bahn weit aus dem Kuiper-Gürtel herausragt) und großen Inklinationen .

## 1.15. Kometen

**Kometen** (griech. Kometes = „Träger langer Haare“, Symbol:☄) sind auf stark exzentrischen Bahnen sich um die Sonne bewegende Körper, bestehend aus *Kopf*, zu dem sich in Sonnennähe ein *Schweif* gesellt. Der Kopf besteht aus einem 100m bis 100 km<sup>89</sup> großen *Kern*, und bis zu 2-3 Millionen km großen *Koma*, d.h. eine den Kern umgebende neblige Gashölle (aus Wasserdampf und Staub, zu 90% aus Wasserdampf), deren Durchmesser den Sonnendurchmesser übertreffen kann, und die sich in 5 AU Entfernung von der Sonne (Jupiterentfernung) durch „Ausgasung“ zum Kern dazugesellt. Der Kern besteht aus Eis (Wassereis, Trockeneis, CO-Eis, gefrorenes Methan und Ammoniak), meteoritenähnliche Staub- und Mineraleilchen (Silikate, Nickeleisen), organischem Material (wie Methanol und Ethanol, auch Aminosäuren) und lockerem Gestein (der Kern hat eine durchschnittliche Dichte von nur 600 kg/m<sup>3</sup>; vgl. hierzu die Dichte von Wasser mit 1000 kg/m<sup>3</sup>). Wegen der geringen Masse sind Kerne oft nicht kugelförmig, sondern haben irreguläre Gestalt. Insgesamt ist der Kern ein „schmutziger Schneeball“ (eine schwarze Kruste sorgt für eine sehr kleine Albedo von 0,04, das ist schwärzer als Asphalt mit 0,07, es sind die schwärzesten Objekte im Sonnensystem). Der *Schweif* entsteht in 2 AU Entfernung von der Sonne (etwas mehr als die Marsentfernung) durch stärkere Ausgasung und kann mehrere Hundert Millionen km groß sein, also eine Größe von 1 AU und mehr haben. Der Unterschied zwischen Asteroid und Komet ist die ausgasende (nicht festgehaltene) Atmosphäre; irgendwann sind sämtliches Material, das ausgasen kann, verloren, und der ausgegaste Kometenkern verliert den Kometen-Charakter und wird zu einem Asteroiden (6% der erdnahen Asteroiden scheinen ausgegaste Kometenkern zu sein, dazu dürften 14827 Hypnos und 3552 Don Quixote gehören). Die Bahnen der Kometen können bei jedem Besuch im inneren Sonnensystem stark geändert sein.

*Die drei Schweife.* Die Bestandteile der Koma werden, der der Komet der Sonne um ca. 2 AU nahe kommt, durch Strahlungsdruck und Sonnenwind weggeblasen, so dass der Komet einen *Schweif* bekommt oder genauer zwei Schweife:

Ein schmaler, lang gestreckter Schweif (*Typ-I-Schweif* oder *Plasmaschweif*) aus Molekül-Ionen. Als Ursache dieses Schweifs postulierte Ludwig Biermann 1951 eine von der Sonne ausgehende Partikelstrahlung aus geladenen Teilchen, den *Sonnenwind*, der das solare Magnetfeld mitführt, welches die kometaren Ionen antreibt. Dieser Schweif leuchtet, das er aus ionisiertem Gas besteht.

Ein diffuser, gekrümmter Schweif (*Typ-II-Schweif* oder *Staubschweif*). Die kleinen Staubteilchen dieses Schweifs werden durch den Strahlungsdruck der Sonne angetrieben, welcher der Gravitationskraft entgegengerichtet ist und wie diese quadratisch mit der Entfernung zur Sonne abnimmt wirkt wie eine Abnahme der solaren Gravitationskraft, die Staubteilchen bewegen sich deshalb auf „Pseudo-Keplerbahnen“, die sich für Staubteilchen verschiedener Größe unterscheiden, da der Strahlungsdruck von der Teilchengröße abhängig ist. Dies führt zu einer relativ starken Auffächerung und eine Verbiegung des Staubschweifs im Vergleich zum Plasmaschweif. Der Staubschweif glüht durch Reflexion des Sonnenlichtes. Sehr selten, bei besonderen Bahnkonstellationen, ist ein Gegenschweif (*Typ-III Schweif* oder *Antischweif*) sichtbar, der in entgegengesetzte Richtung wie die beiden anderen Schweife zeigt, d.h. in Richtung auf die Sonne. Er entsteht dadurch, dass schwerere Staubteilchen im Orbit des Komet permanent zurückbleiben, und dann, wenn der Komet sich ihnen erneut nähert, aufgrund von Lichtreflexion aufleuchten.

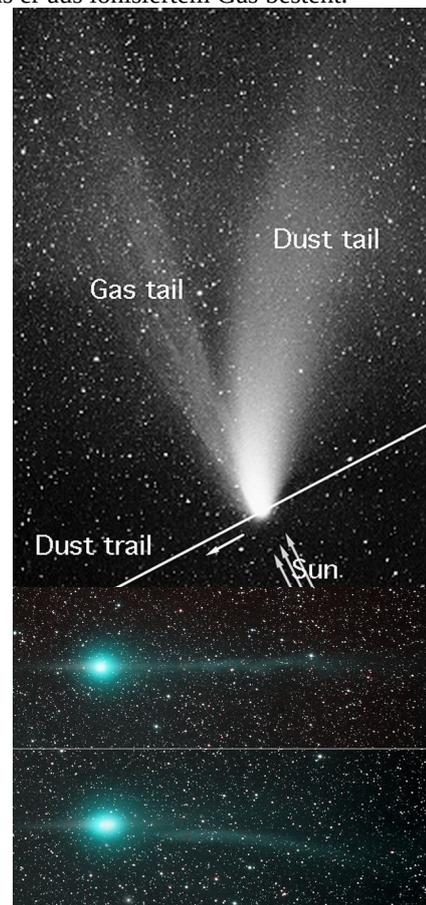
Außer den Schweifen beobachtet man spontane Ausgasungen: geysir-artige *Jets*.

Der Materialverlust eines Kometen wurde bei „neuen“ Kometen, die das erste Mal in Sonnennähe kommen, auf etwa 10 bis 50 Tonnen pro Sekunde geschätzt, nach mehrfacher Sonnenannäherung sinkt der Masseverlust auf weniger als 0,1 t/s. Diese geringen Materiemengen von maximal 0,03 bis 0,2 Prozent der Kometenmasse pro Sonnendurchgang bedeuten, dass die Schweife nur eine sehr geringe Dichte aufweisen. Die enorme Helligkeit der Schweife erklärt sich im Falle des Staubschweifs durch die große Oberfläche der mikroskopisch kleinen Staubteilchen, im Plasmaschweif trägt sogar jedes Atom bzw. Molekül zur Leuchtkraft bei. Dies führt im Vergleich zur Größe des Kometenkerns zu einer Erhöhung der Leuchtkraft um viele Größenordnungen

*Zahl:* Zum Stand November 2014 waren insgesamt 5253 Kometen bekannt; man schätzt, dass es insgesamt 1 Billion gibt; Um 1900 wurden etwa 5 bis 10 neue Kometen pro Jahr entdeckt; heute über 20, jährlich ist durchschnittlich 1 Komet mit bloßem Auge sichtbar.

*Entstehungsort:* Man geht davon aus, dass sie im *äußeren* Sonnensystem außerhalb der Neptunbahn entstanden sind.

*Forschungsgeschichte:* Kometen galten als (meist unheilvolle) Schicksalsboten; Aristoteles, Ptolemäus und noch Galilei hielten sie für atmosphärische Erscheinungen; ihre wahre Natur erkannte schon Regiomontanus (eigenständiger Himmelskörper), dann Tycho Brahe (ermittelte 1577 durch Parallaxenmessung, dass der damals gesichtete große Komet über 230 Erdradien entfernt war, also sich jenseits der Mondbahn befand), Isaac Newton (vermutete richtig, dass Kirchs Komet 1680/1 sich nach den Keplerschen Gesetzen richtete) und Edmond Halley (er erkannte 1705 der Halleyschen Kometen als wiederkehrend).



<sup>89</sup> Der Kern von Komet P/2007 R5 scheint einen Durchmesser von nur 100–200 m zu haben.

Einteilung: Kometen werden eingeteilt in

1. *aperiodische* (einmalig erscheinende mit hyperbolischer Bahn um die Sonne),<sup>90</sup>
2. *langperiodische* (mit elliptischen Umlaufbahnen von über 200 Jahren, bis zu 100 Millionen Jahren, die aus der postulierten Oort-schen Wolke weit außerhalb der Planetenbahnen kommen), die durch vorbeiziehende ferne Fixsterne ins innere Sonnensystem gelenkt werden und
3. *kurzperiodische* mit Umlaufbahnen unter 200 Jahren aus dem Kuipergürtel und der Scattered Disk jenseits des Neptun oder aus der Nähe der Jupiterbahn; erstere mit Umlaufzeiten zwischen 20 und 200 Jahren und unregelmäßig verteilten Inklinationen sind seltener und gehören zur *Halley-Familie* (54 bekannte), vermutlich sind sie in der Oortschen Wolke entstanden (waren also lang-periodisch) und kamen durch Gravitationseinflüsse ferner vorbeiziehender Fixsterne und der großen Planeten permanent in größere Sonnennähe; letztere mit Umlaufzeiten bis 20 Jahren und Inklinationen zwischen 20 und 30° sind häufiger und bilden die *Jupiter-Familie* (ca. 400 bekannte); sie könnten eine ursprüngliche Bahn im Kuipergürtel gehabt haben und durch die großen Planeten auf eine Bahn in der Nähe der Jupiterbahn abgelenkt worden sein.<sup>91</sup> Seit 1979 kennt man auch ca. zwölf *Hauptgürtel-Kometen* mit geringer Exzentrizität, großer Hauptachse zwischen 2 und 3,5 AU und Perihel nicht kleiner als 1,5 AU; sie heißen auch „*aktive Astroiden*“. Der erste, 1979 entdeckte war Elst-Pizarro (Kometenname: 133P/Elst–Pizarro; Asteroidenname: 7968 Elst–Pizarro).

Außerordentlich auffällige, freizügig sichtbare Kometen heißen *Große Kometen*.

Von ca. 660 untersuchten Kometen zeigt sich folgende Verteilung: 43 % haben Parabelbahnen (d.h. es ist unklar, ob sie eine Ellipse oder Hyperbel ist), 25 % haben stark exzentrische Ellipsenbahnen (d.h. sind langperiodisch mit Umlaufzeit über 200 Jahre), 17 % haben Ellipsenbahnen mit Umlaufzeit bis zu 200 Jahre, und 15 % haben Hyperbelbahnen. Der hohe Anteil an Parabeln ist jedoch auf den zu kurzen Beobachtungszeitraum vieler Kometenerscheinungen zurückzuführen, bei denen langgestreckte Ellipsen nicht von einer Parabel unterschieden werden können. Bei einer längeren Sichtbarkeit von 240 bis 500 Tagen ist noch noch bei 3 % der Kometen eine scheinbare Parabelbahn zu konstatieren. Somit dürften die Ellipsen vorherrschend sein.

*Zur Bezeichnung:*<sup>92</sup> Kometen werden seit 1995 nach dem Zeitpunkt ihrer Entdeckung wie folgt bezeichnet: Vier Ziffern für das Entdeckungsjahr, dann ein Buchstabe von A bis Y (A für Entdeckung in erster Januarhälfte, B für zweite Januarhälfte, ... Y für zweite Dezemberhälfte; Buchstabe I wird weggelassen), dann eine Zahl, die angibt, als wievielter Komet im fraglichen Zeitpunkt der Komet entdeckt wurde. In Klammern kann dann noch der Name des Entdeckers bzw. (bei mehreren Entdeckern) die mit Bindestrich verbundenen Namen der Entdecker;<sup>93</sup> ausnahmsweise nimmt man an Stelle des Entdeckers des Kometen auch den Entdecker seiner Periodizität (so bei den Kometen Halley und Encke). Dem so gebildeten Namen wird schließlich einer der Buchstaben P,C,X,D,A gefolgt von einem Schrägstrich vorangestellt: P für Periodisch (Kometen, von denen ein zweiter Perihel-Durchgang beobachtet wurde, C für Kometen mit bekannter Bahn, von denen noch kein zweiter Perihel-Durchgang beobachtet wurde; X für eine Kometen mit nicht-bestimmbare Bahn, D („disappeared“) für verlorengegangene oder nicht mehr existierende Kometen, und A für Asteroiden, die man fälschlich für Kometen hielt; außerdem kann vor den Buchstaben P,C,X,D,A noch eine Nummer angehängt werden, welche die Reihenfolge der Entdeckungen angibt. In abgekürzter Form kann man auch nur diese Nummer und den Buchstaben, gefolgt vom Schrägstrich und dem Entdeckernamen als Bezeichnung des Kometen verwenden (z.B. 1P/Halley = der erste bekannt gewordene periodische Komet, von Halley als periodisch erkannt; 2P/Encke = der zweite bekannte geworfene periodische Komet, von Encke entdeckt usw.) oder auch nur den Entdeckernamen. Eine Zahl nach dem Entdeckernamen gibt an, der wievielte von dem Betreffenden Menschen entdeckte Komet es ist. Ein Beispiele für die volle Form wäre „C/1996 B2 / Hyakutake“ = der zweite (2) in der zweiten Januarhälfte (B) des Jahres 1996 entdeckte Komet, entdeckt von Yūji Hyakutake. Unter „Shoemaker-Levy 9“ versteht man den neunten vom Ehepaar Eugene und Carolyn Shoemaker gemeinsam mit David Levy entdeckten Kometen, dieser heißt auch D/1993 F2; dabei deutet D an, dass der Komet nicht mehr existiert: er geriet in die Nähe des Jupiter und zerbrach in 21 Fragmente, die 1994 in den Jupiter stürzten.

Bis 1994 erhielten die Kometen eine vorläufige Bezeichnung, bestehend aus dem Jahr der Entdeckung und einem kleinen Buchstaben, der die Reihenfolge der Entdeckungen in dem betreffenden Jahr angibt: Z.B. Komet 1969i(Bennett) = der 9. im Jahr 1969 entdeckte Komet. Wenn die Bahn des Kometen (insbesondere sein Perihel) feststand, bekam der Komet seine endgültige Bezeichnung durch das Jahr seines ersten beobachteten Perihelions, gefolgt von einer römischen Zahl, welche die Reihenfolge angibt, in der die bisher entdeckten Kometen in jenem Jahr ihr Perihel durchliefen. So wurde aus Komet Comet 1969i der Komet 1970 II.

*Sonnenstreifer (Sungrazer)* sind eine Kometengruppe, die der Sonne extrem nahe kommen oder sich sogar durch die Sonnenkorona bewegen. Der Großteil der Sungrazer gehört der *Kreutz-Gruppe* an (eine von Heinrich Kreutz entdeckte Gruppe mit gleichen Bahnelementen, wohl Teile eines einzigen irgendwann auseinandergebrochenen Ursprungskometen: Inklination 144°, Perihellängen 280-282°, manche sehr hell; die Kometen der Kreutz-Gruppe sind wieder in zwei Untergruppen eingeteilt, die zwei Zerbrechungs-Prozessen entsprechen könnten). Durch die Sondenmission SOHO konnten über 1000 derartige Kometen fotografiert werden. Schätzungen ihrer Gesamtzahl belaufen sich auf über 200.000 Objekte. Durch die starken Gezeitenkräfte der Sonne werden die Sungrazer oft auseinandergerissen. Die meisten Sonnenstreifer sind daher kleine Bruchstücke mit einem Durchmesser von 10 m und

<sup>90</sup> Auch diese eher seltenen Kometen entstanden vermutlich im Sonnensystem, und ihre Bahnen waren daher ursprünglich elliptisch; ihre Bahn könnte aber aufgrund einer Bahnstörung durch die Planeten hyperbolisch geworden sein. Wenn die Bahn so bleibt, müssen sie das Sonnensystem verlassen, aber durch weitere Störungen in weiter Entfernung von der Sonne kann die Bahn sehr leicht wieder elliptisch werden, und dann verlassen sie das Sonnensystem nicht.

<sup>91</sup> Jan Hendrik Oort untersuchte 1950 die Bahnen langperiodischer Kometen und stellte eine Häufung bei Apheldistanzen zwischen 50.000 und 150.000 AU fest, wobei Bahnneigungen und Umlaufrichtungen statistisch verteilt sind. Er postulierte deshalb in dieser Entfernung ein großes Kometenreservoir, die aus etwa 1 Billion Objekten bestehende Oortsche Wolke. Da diese Wolke weder die Anzahl noch die Bahneigenschaften der kurzperiodischen Kometen erklären kann, postulierte Gerard Kuiper ein weiteres Kometenreservoir zwischen 30 und 50 AU: den aus ca. 100 Millionen bis 10 Milliarden Objekten bestehenden Kuipergürtel

<sup>92</sup> Vgl. die offiziellen Richtlinien der IAU (<http://www.minorplanetcenter.org/iau/lists/CometResolution.html>).

<sup>93</sup> Man nimmt heute nur noch die zwei ersten gemeldeten Entdecker. Die Bezeichnung früherer Kometen mit mehr als zwei Entdeckern wurden aber beibehalten.

weniger. Der auffällige Komet Ikeya-Seki war jedoch sogar bei Tageslicht zu sehen, so dass sein Durchmesser auf mehrere Kilometer geschätzt wurde.

**Erdnahe Kometen:** Von den 10.713 zum Stand Februar 2014 katalogisierten erdnahen Objekten sind 94 Kometen und 10.619 Asteroiden.[9] Damit sind etwas unter einem Prozent aller Erdbahnkreuzer, die eine potentielle Kollisionsgefahr mit der Erde bergen, Kometen. Da zum Stand November 2014 insgesamt 5253 Kometen bekannt sind, sind knapp 2 Prozent aller bekannter Kometen Erdbahnkreuzer. Kometeneinschläge auf der Erde sind möglich, bisher aber nicht einwandfrei nachgewiesen. Das Tunguska-Ereignis 1908 könnte auf ein kleines Kometenfragment des Kometen Encke zurückgehen, das vollständig in der Atmosphäre verdampft ist.

#### **Raumfahrtmissionen:**

1985 durchflog der International Cometary Explorer den Schweif des Kometen Giacobini-Zinner (entdeckt 1900) und flog 7800 km am Kern vorbei.

1986 war der Halleysche Komet das Ziel von fünf Sonden:

Die japanischen Sonden Sakigake und Suisei näherten sich dem Kern bis auf 7 Millionen bzw. 150.000 Kilometer.

Die sowjetischen Sonden Vega 1 und Vega 2 näherten sich auf 8.000 bis 9.000 Kilometer und durchquerten damit die Koma.

Die europäische Sonde Giotto flog in 596 Kilometer am Kern vorbei und lieferte erstmals Aufnahmen eines Kometenkerns.

1992 flog Giotto nur 200 km am Kometen 26P/Grigg-Skjellerup (entdeckt 1902) vorbei.

2001 flog die amerikanische Sonde Deep Space 1 2200 km am Kern des Kometen 19P/Borrelly (1904 entdeckt) vorbei.

2004 sammelte die amerikanische Stardust-Sonde Teilchen aus der Koma des Kometen Wild 2 in 240 km Entfernung vom Kern auf; die Probenkapsel brachte die Teilchen 2006 zur Erde.

2005 feuerte die Raumsonde Deep Impact ein 372 kg schweres Projektil auf den Kometen Tempel 1 und beobachtete seinen Einschlag aus einer Entfernung von rund 8.600 km. 2011 besuchte die Stardust-Sonde (in der Erweiterungsphase Stardust-NEXT) den Kometen nochmals und machte Bilder von der Einschlagstelle aus 181 km Entfernung.

2010 flog Deep Impact in der erweiterten Mission (EPOXI = Extrasolar Planet Observation/eXtended Investigation of comets) 700 km am Kometen 103P/Hartley 2 vorbei (1986 entdeckt, 1,6 km, kleinster untersuchter Komet).

2011: siehe 2005.

2014 erreichte die (2004 gestartete) Rosetta-Mission der ESA den Kometen Tschurjumow-Gerassimenko; der Lander Philae landete am 12. November 2014 auf diesem Kometen.

#### **Berühmte Kometen:**

**Aristoteles'** Komet (Großer Komet von 373 vor Christus). Er war vermutlich einer der größten Kometen mit 100 km Durchmesser; scheint damals zerbrochen zu sein und ist vielleicht Ursprung der nahe an der Sonne vorbeiziehenden Kometen der sog. Kreutz-Gruppe. Aristoteles (der ein ca. 12-jähriger Augenzeuge gewesen sein kann) nennt ihn explizit einen „großen Kometen“ und berichtet genauer: Er erschien er im Winter zur Zeit des Archonten Asteus von Athen (= 373/2 v. Chr.); sein Schweif erstreckte sich über ein Drittel des Himmels und man nannte ihn einen [Licht]Weg; er tauchte westlich des Frühlingspunkts auf und wanderte bis zu den Gürtelsternen des Orion, wo er sich auflöste.<sup>94</sup> Der griechische Historiker Diodoros Siculus (um 60 v. Chr.) erklärt, das Licht des Kometen habe nachts Schatten geworfen wie das Mondlicht, und man habe den Kometen als „große brennende Fackel“ und „feurigen Streifen“ bezeichnet.<sup>95</sup> Vom makedonischen Geschichtsschreiber Kallisthenes von Olynth (ca. 370-327 v. Chr., Neffe und Schüler des Aristoteles) wird überliefert, dass er die Überflutung von Helike und Bura<sup>96</sup> auf den Kometen zurückführte.<sup>97</sup> Der Geschichtsschreiber Ephoros von

<sup>94</sup> Vgl. Aristoteles, *Meteorologica* (350 v. Chr.) Buch 1, 343b: „der große Komet, welcher um die Zeit des Erdbebens in Achaia und der Überschwemmung erschien, kam vom Westen der Tag-und-Nacht-Gleiche [des Frühlingspunktes?] her empork [ὁ τε γὰρ μέγας κομήτης ὁ γενόμενος περὶ τὸν ἐν Ἀχαΐα σεισμόν καὶ τὴν τοῦ κύματος ἔφοδον ἀπὸ δυσμῶν τῶν ἰσημερινῶν ἀνέσχευεν] ... Der große Komet, dessen wir vorher gedachten, erschien abends im Winter bei frostigem klarem Wetter zur Zeit des Archonten Asteios [373/2 v. Chr.]; und in der ersten [Nacht] erschien er [abends] nicht, da er vor der Sonne unterging, in der nächsten [Nacht] aber erschien er, da er so kurz hinter ihr zurückblieb [d.h. den einen so kurzen Winkelabstand von der Sonne hatte], dass dies [nämlich sein Erscheinen] eben noch möglich ist, und er ging sofort [nach der Sonne] unter. Sein Glanz dehnte sich über ein Drittel des Himmels aus ... darum wurde er auch ein [Licht]Weg genannt. Er kam bis zum Gürtel des Orion hinauf, und daselbst löste er sich auf [προδεδυκῶς τοῦ ἡλίου, τῆ δ' ὑστεραία ὤφθη ὅσον ἐνδέχεται γὰρ ἐλάχιστον ὑπελείφθη, καὶ εὐθὺς ἔδου· τὸ δὲ φέγγος ἀπέτεινε μέχρι τοῦ τρίτου μέρους τοῦ οὐρανοῦ οἷον ἄλμα· διὸ καὶ ἐκλήθη ὁδός. ἐπανήλθε δὲ μέχρι τῆς ζώνης τοῦ Ὀρίωνος, καὶ ἐνταυθοῖ διελύθη].“

<sup>95</sup> Diodorus Siculus (60 v. Chr.), *Bibliotheca Historica* 15,50,1-3: „Als Alkisthenes Archont in Athen war [Nachfolger des Asteios, 372/2 v. Chr.] wählten die Römer acht Militärtribune mit konsularischer Macht, Lucius und Publius Valerius, Gaius Terentius, Lucius Menenius, Gaius Sulpicius, Titus Papirius, und Lucius Aemilius, und die Elter feierten die hundertste Olympiade [372/1 v. Chr.] in welcher Damon von Thurii den Stadionwettbewerb gewann. (2) In dieser Zeit [ungefähre Angabe, kann auch 373/2 gewesen sein!], nachdem die Lakedaimonier die Oberherrschaft in Griechenland fast fünfhundert Jahre [Verschreibung für fünfzig Jahre?] innehatten, sagte ein göttliches Zeichen den Verlust ihrer Macht voraus: Während vieler Nächte war am Himmel eine große brennende Fackel zu sehen, welche aufgrund ihrer Gestalt ein „flammer Streifen“ [ἰσχυρὴν δοκίαν] genannt wurde; ein wenig später wurden überraschenderweise die Spartaner in einer großen Schlacht besiegt [von den Thebanern in der Schlacht von Leuktra am 5. August 371 v. Chr.] und verloren unerwartet ihre Oberherrschaft. (3) Einige der Naturgelehrten führten die Entstehung der Fackel auf natürlichen Ursachen zurück und meinten dass solche Erscheinungen mit Notwendigkeit zu bestimmten Zeiten auftauchen, und dass in diesen Dingen die Chaldäer in Babylon und andere Astrologen erfolgreich genaue Vorhersagen machen. ... Jedenfalls hatte diese Fackel, wie man erzählt, eine solche Brillanz und ihr Licht eine solche Kraft, dass es Schatten warf, ähnlich den Schatten, die der Mond wirft.“

<sup>96</sup> Helike lag in Achaia am Golf von Korinth, östlich von Patras, und wurde in einer Winternacht 373 v. Chr. durch einen Tsumani überflutet, zwei Jahre vor der Schlacht von Leuktra (371 v. Chr.); seit 2000 wird die versunkene Stadt durch Unterwasserarchäologen ausgegraben. Bura lag bei Helike, weiter landeinwärts, und wurde 373 v. Chr. durch ein Erdbeben zerstört, wohl dasselbe, das zum Zunami führte, dem Heike zum Opfer fiel. Die Erdbeben in Achaia im Gefolge des Kometen erwähnt auch Aristoteles (siehe Fußnote 94).

<sup>97</sup> Vgl. Seneca (1-65 n. Chr.), *Naturales Quaestiones* (62/63 n. Chr.) 7,5: „talem effigiem ignis longi fuisse Callisthenes tradit, antequam Burin et Helicen mare absconderet. Aristoteles ait non trabem illam sed cometen fuisse.“

Kyme (ca. 400-330 v. Chr.), der Verfasser der ersten Weltgeschichte (Die *Historien*, deren Inhalt aber nur noch in Zitaten und Anspielungen anderer Autoren vorhanden ist) berichtet als Augenzeuge von seinem Zerbrechen in zwei Teile.<sup>98</sup>

**Caesar** (C/-43 K1, in der Antike auch *Caesaris astrum* und das *sidus Iulium* genannt) wurde als Gestirn des vergöttlichten Julius Caesar angesehen. Komet Caesar erschien 44 v. Chr. für sieben Tage am nordöstlichen Himmel Roms, nachdem Caesar am 15. März 44 v. Chr. ermordet worden war. Einige Quellen (z.B. Servius) erwähnen eine Sichtbarkeit am Taghimmel. Der älteste Text mit Details der Himmelserscheinung findet sich jedoch erst 77 n.Chr. in der *Naturalis historia* von Plinius: „Nur an einem einzigen Ort der Erde, nämlich in Rom, wird ein Komet in einem Tempel verehrt, weil ihn der Göttliche Augustus als ein sehr günstiges Zeichen für sich erklärte. Er trat nämlich zu Beginn seiner Regierung in Erscheinung während der Spiele, die er zu Ehren der Venus Genetrix kurz nach dem Tode seines Vaters Caesar in dem noch von diesem eingesetzten Kollegium abhielt. [d.h. zwischen dem 20. und 23. Juli 44 v. Chr.]<sup>99</sup> Mit folgenden Worten äußerte er darüber seine Freude: ‚Gerade an den Tagen meiner Spiele wurde ein Haarstern sieben Tage lang am nördlichen Teile des Himmels erblickt; er ging um die elfte Tagesstunde auf, war sehr leuchtend und in allen Ländern sichtbar. Das Volk glaubte, durch diesen Stern werde die Aufnahme der Seele Caesars unter die unsterblichen Götter angezeigt; um dessentwillen wurde dieses Sternzeichen am Abbild seines Kopfes angebracht, das später auf dem Forum geweiht wurde.‘ So sprach er sich öffentlich aus; in seinem Innern aber war er mit Freude davon überzeugt, dass der Stern für ihn aufgegangen sei, und dass er mit ihm aufgehe – und zwar, wenn wir die Wahrheit sagen wollen, zum Heile der Welt.“<sup>100</sup> Servius in seinen Kommentaren zu Vergils *Eklogen* und *Aeneis* während des 4. Jh. Servius gab für die Sichtbarkeit drei Tage an und erwähnte insbesondere eine Sichtbarkeit am Tage. Auch fernöstliche Quellen erwähnen den Kometen. In dem von Bān Gū geschriebenen *Hàn Shū* (100) ist von einem „Besenstern“ die Rede, der im Sommer 44 v. Chr. zwischen dem 18. Mai und dem 16. Juni gesehen wurde. Er gibt auch astronomische Details zu dieser Erscheinung, wie eine Schweiflänge von 8-10<sup>101</sup> Eine Erklärung dafür, dass der Komet in China nur im Mai/Juni und in Rom nicht vor Juli gesehen wurde, wäre der Ausbruch des Ätna im Jahre 44 v. Chr. (damals wurde ein großer Ausbruch registriert, die Asche verdunkelte den Himmel in Rom und als Folge gab es Missernten im Mittelmeerraum bis nach Ägypten).<sup>102</sup>

**Kirch** (C/1680 V1, Der Große Komet von 1680/1, auch „Newtons Komet“ genannt, entdeckt am 14. November 1680 von Gottfried Kirch mittels Teleskop). Komet, für den erstmals eine genaue Bahnbestimmung gelang, extremer Sonnenstreifer (Annäherung an die Sonne auf 1,3 Sonnenradien: 930.000 km vom Sonnenmittelpunkt, ca. 1/3 des Sonnenradius über der Sonnenoberfläche).

Gr. Halbachse 444 AU (Perihel 0,00622, Aphel 889 AU, Exzentrizität 0,99986), Inklination 60,7°. Umlaufzeit siderisch 9360a, Periheldurchgang 18. Dezember 1680 mit 534 km/s. Kam während seines Kommens allen Planeten von Saturn bis Merkur ein- oder zweimal relativ nahe (unter 1,5 AU),<sup>103</sup> wodurch seine Bahn leicht geändert wurde. Zur Zeit (2014) befindet sich der Komet etwa 255 AU/38 Mrd. km von der Sonne, er entfernt sich noch weiter mit 2,3 km/s. Ob er jemals in das innere Sonnensystem zurückkehrt, lässt sich nicht sagen, möglicherweise erst wieder nach mehreren zehntausend Jahren.

Beim Periheldurchgang war Kirch so hell, dass er am Tag neben der Sonne gesehen wurde. Am 20. Dezember wunderschön durch goldschimmernden Schweif. John Flamsteed berichtete am 21. Dezember von einem Lichtstrahl mit der Breite des Vollmonds, der sich senkrecht vom Horizont bis fast zum Zenit erstreckte. Ponthio in Italien schätzte die Schweiflänge am 22. Dezember zu 70° mit einer Breite von 3° an seinem Ende. Der Kopf des Kometen war so hell wie ein Stern erster Größe und der Schweif so lang, dass er am westlichen Horizont noch fünf Stunden zu sehen war, nachdem der Kopf untergegangen war. Am 28. Dezember erreichte der Schweif nach Robert Hooke in England eine Länge von 90° und reichte damit über das halbe Firmament. Er entfaltete auf die Öffentlichkeit eine ungeheure Wirkung. Eine Flut von Schriften erschien, zumeist beflügelt von einer grassierenden Kometenfurcht. In den Kirchen wurden Bußgottesdienste abgehalten.



Komet Kirch 1680 über Rotterdam

Im Januar 1681 zeigte der Komet erste Anzeichen des Verblässens, doch der Schweif blieb sehr lang und auffällig: Nach Flamsteed war der Kopf am 5. Januar schwächer als 3 mag, der Schweif maß aber drei Nächte später noch immer 55°. Kirch berichtete am 7. Januar auch von einem (sehr schwachen) Gegenschweif, der zur Sonne zeigte, aber diese Beobachtung wurde von niemand anderem bestätigt. Anfang Februar war der Komet selbst nicht mehr ohne Fernrohr zu sehen (Flamsteed schätzte 7 mag), doch sein Schweif war immer noch freiläufig zu erkennen und Newton schätzte ihn auf 6–7°. Der Komet wurde zuletzt am 19. März 1681 beobachtet. Newton vermutete richtig, dass sich der Komet nach den Keplerschen Gesetzen richtete.

<sup>98</sup>Vgl. Seneca, *Naturales Quaestiones* 7,16: „Ephorus ... saepe decipitur, saepius decipit, sicut hunc cometen, qui omnium mortalium oculis custoditus est, quia ingentis rei traxit euentum, cum Helicen et Burin ortu suo merserit, ait illum discessisse in duas stellas, quod praeter illum nemo tradidit.“ Seneca hält also die Aussage von Ephorus nicht für glaubwürdig, das er das Zerbrechen eines Kometen nicht für möglich hält, was es aber durchaus ist.

<sup>99</sup> Der Tempel der Venus Genetrix wurde am 26 September 46 v. Chr. eingeweiht, aber zwei Jahre nach seiner Einweihung wurde eine neue Feierlichkeit geschaffen, genannt die *ludi Victoriae Caesaris*, die um den 20.-23. Juli stattfanden, und die Spiele der Venus Genetrix wurden mit diesen Spielen kombiniert.

<sup>100</sup> Ähnlich Sueton in seinem *De vita Caesarum* (120 n. Chr.). Auch Horaz erwähnt in einer Ode dem Jahr 24 v. Chr. das *sidus Iulium*, ebenso wie Ovid in den *Metamorphosen* 15,745-842 darauf anspielt; es erscheint auch auf zahlreichen Münzen mit der Beischrift *divus Iulius*. Seneca berichtete in seinen um 63 geschriebenen *Naturales Quaestiones* von einem Kometen, der „hervorkam nach dem Tod des vergöttlichten Julius, während der Spiele der Venus Genetrix um die elfte Stunde des Tages.“ Weitere Erwähnungen des Kometen erfolgten bei Calpurnius Siculus in *Eklogen I* (60), Plutarch in *Bioi paralleloi* (100), Cassius Dio in *Römische Geschichte* (229), Iulius Obsequens in *Liber de prodigijs* (4. Jh.).

<sup>101</sup> Den Kometen erwähnt auch ein koreanischer Bericht, der aber auf den chinesischen Quellen beruhen könnte.

<sup>102</sup> Eine andere Erklärung wäre, dass der Komet, nachdem er in China gesehen wurde, schwächer wurde und für einen Monat nicht gesehen werden konnte, dann aber durch einen dramatischen Helligkeitsausbruch Ende Juli wieder erschien. Aber das ist unwahrscheinlich, da man dann in China, wo anscheinend genau nach Kometen gefahndet wurde, das Wiedererscheinen wohl vermert hätte.

<sup>103</sup> Saturn 1,46 AU, Jupiter 1,45 AU, Mars 0,37 und 1,42 AU, Erde 0,42 und 0,49 AU, Venus 0,72 und 1,02 AU, Merkur 0,24 AU.

**Der Große Komet von 1744** (C/1743 X1, *Komet de Chéseaux* oder *Komet Klinkenberg-Chéseaux*, Perihel 0,222209 AU am 1. März 1744, Exzentrizität 1,0, Inklination 47,1417°),<sup>104</sup> Großer Komet, war der erste, dem eine eigene Monografie gewidmet wurde.

Gottfried Heinsius berechnete darin seine monatelang sichtbare Bahn, die Formänderungen der Koma und die genaue Schweiflänge (52 Millionen km). Am 18. Februar 1744 erreichte er die Helligkeit des Planeten Venus (mag -4,6), war am Tag zu sehen und hatte einen doppelten Schweif. Nach dem Durchgang durch das Perihelion bekam er einen 6-fachen Schweif (vielleicht verursacht durch mehrere Kometenkerne?) der am Himmel sichtbar war, auch wenn der Kopf schon untergegangen war. Er war bald nur noch am Südhimmel zu sehen und verschwand nach dem 22. April 1744. Chinesische Quellen assoziieren hörbare Geräusche mit dem Kometen (verursacht von Partikeln des Kometen, die mit der Magnetosphäre der Erde interagieren?).



**Großer Märzkometa, Tageslichtkometa, der Große Komet von 1843** (C/1843 D1; 1843 I; Gr. Halbachse 64,3 AU, Perihel 0,00553, Aphel 128,5, Exzentrizität 0,999914, Inklination 144,4°, Periheldurchgang 27. Februar 1843 mit 567 km/s, im Aphel nur 0,01 km/s, siderische Umlaufzeit 515a) war ein Komet, der im Jahr 1843 mit dem bloßen Auge am Taghimmel gesehen werden konnte. Er gilt als schönster des 19. Jahrhunderts und einer der prächtigsten je gesehenen.

Die frühesten Beobachtungen dieses Kometen erfolgten am Abend des 5. Februar 1843 (Ortszeit) sowie ein weiteres Mal am 11. Februar. Diese anonymen Beobachtungen ohne weitere Einzelheiten wurden nach einem Bericht von Johann Franz Encke in einer Zeitung in New York erwähnt.

Der Schweif erreichte am 21. März eine Länge von 64°, der nach Untergang des Kometen sichtbar blieb, war gleichförmig und von hoher Intensität, relativ schmal, leicht gebogen und am Ende etwas gegabelt. Der Komet erreichte eine Helligkeit über -4mag und wurde zuletzt am 19. April in Südafrika beobachtet.

Der Komet war ein Sonnenstreifer der Kreutz-Gruppe und passierte die Sonnenoberfläche im Abstand von nur 200.000 km. Der Komet scheint Bruchstück des sonnenstreichenden Kometen X/1106 C1 gewesen zu sein.

X/1106 C1 wurde 1106 mit bloßem Auge beobachtet, und war ebenfalls am Tage sichtbar; sein Schweif war bis zu 100° und bis zu 5° breit; in China und England sah man mehrere „Strahlen“, in muslimischen Ländern sah man einen „Stern am Himmel mit Haarlocken wie ein Regenbogen“.



Der Komet 1843, wie er sich zeigte in Aldridge Lodge, Tasmanien

**Donati** (C/1858 L1; 1858 VI, am 2. Juni 1858 von Giambattista Donati in Florenz entdeckt; Gr. Halbachse 156,1 AU (Perihel 0,578, Aphel 311,7 AU, Exzentrizität 0,9936), Inklination retrograd 117,0°, Umlaufzeit siderisch 1951a, Periheldurchgang 30. September 1858 mit 55,3 km/s) war einer der beeindruckendsten und schönsten Kometen.

Er erreichte 0 mag und hatte einen anmutig geschwungenen (leicht gekrümmten) Staubschweif mit deutlichen Querstreifen (Striae); dazu einen geraden Plasmaschweif; beide erreichten eine Länge von bis zu 40° (am 6. Oktober bzw. 11. Oktober) und einer Breite des Staubschweifs von 10-16°.

Die letzte Beobachtung mit bloßem Auge gelang am 11. November. Teleskopisch konnte der Komet noch bis zum 4. März 1859 am Kap der Guten Hoffnung beobachtet werden.

An Donati wurde erstmals bei einem Kometen das Ausgasen in die Koma beobachtet.



**Tebbutt 1** (C/1861 J1; 1861 II), entdeckt am 13. Mai 1861 von John Tebbutt. Gr. Halbachse 55,1 AU (Perihel 0,822, Aphel 109,3 AU, Exzentrizität 0,9851), Inklination 85,4°. Umlaufzeit siderisch 409a (kürzeste Umlaufzeit von allen großen Kometen außer Halley), Periheldurchgang 12. Juni 1861 mit 46,3 km/s; Aphelgeschwindigkeit ca. 0,35 km/s.

John Tebbutt (1834-1916), dem bedeutendsten australischen Astronomen des 19. Jahrhunderts. Er verbrachte sein gesamtes Leben in Windsor (New South Wales), wo er sich im Jahr 1863 ein kleines Observatorium einrichtete. Im Jahr zuvor hatte er die Stelle als Government Astronomer in Sydney abgelehnt. Tebbutt, der fast 400 Fachartikel schrieb, blieb zeitlebens Amateurastronom. Am 13.05.1861 entdeckte er in der Abenddämmerung ein zunächst unscheinbares diffuses Objekt im Sternbild Eridanus der fünften Größe,

<sup>104</sup> Er wurde Klinkenberg-Chéseaux genannt, weil man lange der Meinung war, dass der Komet unabhängig voneinander am 9. Dezember um 21 Uhr vom Amateurastronomen Dirk Klinkenberg in Haarlem und am 13. Dezember vom Astronomen Jean-Philippe Loys de Chéseaux in Lausanne entdeckt wurde; erst 1894 entdeckte man in einer Bibliothek in Utrecht Dokumente mit Beobachtungen des Kometen, die bereits 10 Tage vor Klinkenberg am 29. November 1743 vom Architekten Jan de Munck in Middelburg erfolgten. Die offizielle Bezeichnung müsste daher eigentlich C/1743 W1 (de Munck) lauten.

welches der Jahrtausend-Komet werden sollte. Erst am 21.05.1861 war eine Bewegung erkennbar.

Tebbutt wurde bald klar, dass sein Komet fast genau auf die Erde zusteuerte. Er beobachtete ihn in den kommenden Wochen weiter und sagte am 15.06.1861 in einem Artikel für die Tageszeitung Sydney Morning Herald voraus, dass die Erde etwa am 29.06.1861 durch den Schweif gehen würde und dass der Komet dann am Taghimmel sichtbar sei würde. C/1861 J1 (Tebbutt) hatte mittlerweile (am 12.06.1861) sein Perihel in einer Sonnenentfernung von 0.82 AU passiert. Um den 20. Juni präsentierte er sich den Beobachtern auf der Südhalbkugel bereits mit einem 40 Grad langen Schweif. Die Bahn stand fast senkrecht zur Ekliptik und zudem zog der Komet fast genau zwischen Sonne und Erde hindurch. Es war daher unmöglich, ihn vor der Erdnähe von der Nordhalbkugel aus zu sehen.



Hier ahnte niemand etwas von dem Schweifstern, denn die Nachrichten verbreiteten sich damals mangels Telegrafverbindungen noch im Tempo der Schiffe. Das schlagartige Auftauchen von Komet Tebbutt am Nordhimmel am Abend des 30.06.1861 könnte dem Plot zu einem Endzeitfilm entstammen. Als es spät an diesem Sommerabend eindunkelte, stand wie aus dem Nichts ein Schweifstern von geradezu unglaublichen Dimensionen am Himmel. Der breit aufgefächerte Schweif nahm den gesamten Sektor zwischen den Sternbildern Kassiopeia und Großer Wagen ein und erstreckte sich über etwa 120 Grad. Seine Helligkeit war so groß, dass er Schatten warf.<sup>105</sup> Vernünftige Helligkeitsschätzungen waren angesichts der Ausmaße des Kometen kaum möglich, der mondgroße Kopf soll -3 mag erreicht haben; er blieb nach Sonnenaufgang am 01.07.1861 am Taghimmel sichtbar. C/1861 J1 war ohne jeden Zweifel das größte Objekt, welches man jemals am Himmel gesehen hat. Da seine Bahn nahezu senkrecht auf der Ekliptik steht, ist sie relativ stabil. Vor 1861 könnte er um 1500 bereits die Erde besucht haben (Sichtung im Fernen Osten: C/1500 H1), sein Aphel erreicht er 2063, das nächste Mal erscheint er möglicherweise um 2267.

Das Erscheinen des Kometen fiel zeitlich mit dem Ausbruch des Amerikanischen Bürgerkriegs (1861-1865; Beginn 12. April 1861) zusammen. Es gab aus diesem Anlass eine Vielzahl von Karikaturen, in denen der Komet mit dem Kopf verschiedener zeitgenössischer Politiker oder Militärs dargestellt wurde, wie Abraham Lincoln oder General Winfield Scott.

**Tebbutt 2, der große Komet von 1881** (C/1881 K1; 1881 II, der zweite große von John Tebbutt in Windsor, New South Wales / Australien entdeckte Komet, entdeckt am 22. Mai 1881; Gr. Halbachse 180 AU, Perihel 0.73455 AU, Aphel 359 AU, Exzentrizität 0,9958, Inklination 63.4256°, Umlaufzeit 2414a).

Am 25. Juni war der Schweif 25° lang und die Helligkeit des Kerns 1 mag. Mit bloßem Auge war der Komet bis August sichtbar. Camille Flammarion sah ihn in den Alpen bis September. Die letzte teleskopische Sichtung war am 15. Februar 1882

Henry Draper schoss von Tebutt 2 das erste Weitwinkel-Foto eines Kometenschweifs und nahm das erste Spektrum eines Kometenkopfes auf. Andrew Common benutzte ein Newton Spiegelteleskop mit 36-Zoll-Spiegel, um den Kometen zu fotografieren.



<sup>105</sup> Am 30. Juni warf der Komet Schatten auf einer weißen Wand warf, wie Johann Friedrich Julius Schmidt in Athen berichtete.

**Großer Septemberkomet, der große Komet von 1882 (C/1882 R1; 1882 II; Sonnenstreifer der Kreutz-Gruppe, Gr. Halbachse 83,3 AU, Perihel 0,007751, Aphel 166,7 AU, Exzentrizität 0,999907, retrograde Inklination 142,0°, siderische Umlaufzeit 759a, Periheldurchgang 17. September 1882 mit 478 km/s, nach dem Bericht von Neptun-Entdecker Johann Gottfried Galle wurde er von anonymen Personen erstmalig am 1. September 1882 gesehen) zog bei seinem Perihel vor und hinter der Sonnenscheibe vorbei, wobei sein Schweif auch am Taghimmel zu sehen war, er ging am 17. September für 75 Minuten vor der Sonne vorüber erreichte unmittelbar zuvor -12,5 mag. Dann kam er wieder am anderen Sonnenrand hervor, ging wieder auf diese zu und verschwand um 19:05 nochmals für zwei Stunden hinter dem Sonnenrand. In den Tagen danach erreichte der Schweif eine Länge von bis zu 20°. Am 3. Oktober wurden zwei ovale Kometenkerne sichtbar „wie zwei Reiskörner Spitze an Spitze“; bis zum 19. Oktober sah man bis zu sechs Kometenkerne, die „wie sehr kleine Perlen auf einem Wollfaden aufgereiht erschienen“; der Komet zerbrach also. Mitte Oktober zeigte sich auch ein auf die Sonne zeigender Antischweif. Letzte Beobachtung 1. Juni 1883. In der Nacht erreichte der Komet -4 mag.**



**Halley (1P/Halley, seit der Antike bekannt, ausnahmsweise nach Halley benannt, der nicht Entdecker des Kometen, sondern seiner Periodizität war; Namengeber der Halley-Gruppe, Aphelion nur ein wenig weiter als beim Neptun, Gr. Halbachse 17,834 AU (Perihel 0,586, Aphel 35,082 AU, Exzentrizität 0,967), Inklination retrograd 162,262°, Umlaufzeit siderisch 75,32a, Periheldurchgang 5. Februar 1986 mit 54,75 km/s mit 70,56 km/s, Rotation 7,1d, Achsenneigung 66°, Präzessionsperiode nur 3,7d, also ungewöhnlicherweise kleiner als Rotationsperiode, Größe  $15,3 \times 7,2 \times 7,2$  km, Dichte  $550 \text{ kg/m}^3$ ,  $2 \cdot 10^{14}$  kg, Albedo 0,05, leichttrötlich wie P-Typ-Asteroiden) ist der einzige mit bloßen Auge sichtbare kurzperiodische Komet, war der erste Komet, der (1705 vom englischen Astronomen Edmond Halley) als periodisch erkannt wurde,<sup>106</sup> und der erste, dessen Kern (1986) von Raumsonden fotografiert werden konnte.<sup>107</sup> Er kehrt ca. alle 76 (74-79) Jahre meist gut freiäugig sichtbar wieder; seine erste quellenmäßig belegte Sichtung erfolgte nach chinesischen Quellen 240 v. Chr.; einschließlich dieser Erscheinung gab es bisher 30 Erscheinungen, die alle durchgehend in chinesischen Quellen aufgezeichnet wurden.<sup>108</sup> Noch seine vorletzte, vorher angekündigte Wiederkehr (19. Mai 1910) versetzte viele Menschen in Angst, weil der Astronom Camille Flammarion gewarnt hatte, das durch den Eintritt der Erde in den Schweif giftige Gase (das dort nachgewiesene Dicyan) das Leben auf der Erde auslöschen könnten; sein letztes Kommen war 1986, das nächste Mal wird er 2061 erwartet.<sup>109</sup> Bei jedem Kommen verliert er in Sonnennähe durch Ausgasen Materie, wobei diese für bis zu 200.000 Jahre reichen würde**

<sup>106</sup> Halley (1656-1742) erkannte, dass der 1682 erschienene Komet derselbe war, den 1531 Petrus Apianus und 1607 Johannes Kepler und Ottmar Stab d. J. beschrieben hatten, und sagte seine Wiederkehr für 1758 vorher. Nach dem Tod Halleys kehrte der Halleysche Komet tatsächlich zurück: Sein damaliges Wiedererscheinen wurde zuerst am 25. Dezember 1758 vom sächsischen Amateurastronomen Johann George Palitzsch beobachtet. Set 1759 wird der Komet nach Halley benannt. Im Babylonischen Talmud (um 500), Traktat Horajoth 10a heißt es: „Es gibt einen Stern, er einmal in sieben Jahren aufgeht und die Schiffe irreleitet“ – möglicherweise ein Beleg dafür, dass die Periodizität von Halley schon im antiken Judentum bekannt war. Der Satz wird Rabbi Jehoschua ben Hananiah (ca. 50-130) zugeschrieben, der den Kometen im Jahre 66 erlebt haben dürfte.

<sup>107</sup> Der Halleysche Komet war 1986 das Ziel von fünf Raumsonden der ESA, Japans und der Sowjetunion, teilweise in internationaler Absprache. Von den Sonden Giotto, Sakigake, Suisei, Vega 1 und Vega 2 war die ESA-Sonde Giotto (benannt nach dem unten erwähnten mittelalterlichen Maler des Kometen Giotto di Bondone) die wissenschaftlich erfolgreichste. Ihr gelang die direkte Beobachtung des Kerns.

<sup>108</sup> Vgl. im Einzelnen Tsu, Wen Shion (al. Hsien), The observations of Halley's comet in Chinese history, in: Popular Astronomy 42(1934), S. 191-201.

Vgl. zu den Ländern, aus denen die Erscheinungen beobachtet wurden, in <http://www.weltraum-fun.de/events/vortraege/kometen/kometen-halley.html> / 14. März 2015.

<sup>109</sup> Folgendes sind die bekannten Erscheinungen, die man (mit etwas Geschick) alle mit zumeist unglücklichen Ereignissen in Verbindung bringen kann.

**613 v. Chr.** (ein Jahr vor der Zerstörung Ninives 612 v. Chr. und dem dadurch eingeläuteten Untergang des assyrischen Reiches 609 v. Chr.) tauchte nach den Frühlings- und Herbstanalen (einer der fünf Konfuzius zugeschriebenen klassischen Schriften) ein Komet im 7. Monat auf und bewegte sich in Richtung Großer Bär. Dies könnte Halley sein, ist aber sehr unsicher. Die nächste mögliche Erscheinung erfolgte zwei Zyklen später:

**467 v. Chr.** wurde er möglicherweise gesichtet (vor der Schlacht von Eurymedon 466 in der Zeit der Kriege zwischen Griechenland und Persien): Zwischen 468 und 466 erschien ein Komet in Griechenland; außerdem fiel nach Plinius dem Älteren in Aigospatami, auf der thrakischen Seite der Dardanellen, ein Meteorit vom Himmel; er war von brauner Farbe von der Größe einer Wagenladung und diente dann 500 Jahre lang als Landmarke; Meteorschauer könnten den Kometen begleitet haben.

Die älteste zweifelsfreie Aufzeichnung war erst drei Zyklen nach 467 v. Chr., nämlich

**240 v. Chr.** (erwähnt im chinesischen Geschichtswerk Shiji, verfasst zwischen 109 und 91 v. Chr.), sodann erschien er

**164 v. Chr.** (Makkabäerzeit, Tod von Antiochus IV., beobachtet von Babylonischen Astronomen),

**87 v. Chr.** (Zeit Sulla, beobachtet von babylonischen Astronomen, der damalige armenische König Tigranes II. der Große hat auf einer Münze Kopf mit königlicher Tiara und einem Stern mit gebogenem Schweif auf dieser Tiara abbilden lassen),

**12 v. Chr.** (7 Jahre vor Christi Geburt, erwähnt im 111 n. Chr. verfassten chinesischen Hanshu, vom römischen Geschichtsschreiber Dio Cassius mit dem Tod Agrippas in Verbindung gebracht),

**66** (Beginn des jüdischen Krieges, 66-70),

**141** (chinesische und tamilische Aufzeichnung, letztere bringt die Erscheinung mit dem Tod des guten Königs Thervan Malayan von Südindien in Verbindung),

**218** (löst in China eine erfolglose Revolte gegen den Usurpator Cao Cao aus),

**295** (4 Jahre vor Beginn der größten antiken Christenverfolgung),

**374** (Beginn der Völkerwanderung, kurz vor dem Tod Valentinians I., 375),

**451** (Attilas Frankreichfeldzug und Niederlage auf den Kataunischen Feldern; Konzil von Chalzedon),

**530** (Justinians Genera Belisar schlägt die Perser; danach 533/4 vernichtet er das Vandalenreich, das Burgunderreich fällt 534 an die Franken),

**607** (drei Jahre vor der Berufung Muhammads zum Propheten 610, sieben Jahre vor der blutigen Einnahme Jerusalems durch die Sassaniden 614)

**684** (hierfür auch europäische Quelle, gesammelt in Nürnberger Chroniken 1493; mitten im konfessionsspaltenden zweiten islamischen Bürgerkrieg 680-692),

(In Sonnennähe wurden Verlustraten von mehr als 50 Tonnen pro Sekunde ermittelt, der gesamte Materialverlust während der letzten Sonnenannäherung 1986 betrug  $5 \times 10^{11}$  Kilogramm, d. h. 2,5 % der Gesamtmasse); der Komet könnte 10 Millionen Jahre alt sein. Die Helligkeit nimmt bei jedem neuen Kommen also tendenziell ab, Halley ist aber immer noch der hellste aller kurzperiodischen Kometen. Reste des Halleyschen Kometen sind auch für zwei Meteorströme verantwortlich, nämlich für die Orioniden im späten Oktober und die Eta-Aquariiden im frühen Mai, sie treten auf, wenn die Erde die Kometenbahn kreuzt, wo sich die wenige Milligramm schweren Körnchen längs der Kometenbahn verteilt haben.

Die berühmteste und in den letzten 1000 Jahren eindrucksvollste Perihelppassage fand 1066 statt. Sie wird in zahlreichen Quellen von Europa über Arabien bis nach China erwähnt. Halley näherte sich der Erde damals bis auf 0.1 AU (etwa 15 Millionen) Kilometer, aber selbst für eine solch große Annäherung war er ungewöhnlich hell. Dabei könnte Vorwärtsstreuung des Sonnenlichts ebenso eine Rolle gespielt haben wie einer oder mehrere Helligkeitsausbrüche. Möglicherweise war er kurzzeitig auch am Taghimmel sichtbar. Berühmt wurde diese Erscheinung von Halley vor allem durch die Darstellung auf dem Teppich von Bayeux (um 1070). Für den angelsächsischen König *Harald II.*, der in der Schlacht von Hasting (14. Oktober 1066) sein Reich und sein Leben verlor, war der Schweifstern ein Unglücksbringer. Der siegreiche Normannen-Herzog *William der Eroberer* könnte dagegen den Schweifstern dagegen als günstiges Omen für sich gesehen haben. Der Benediktiner *Eilmer von Malmesbury* (ca. 984-1070) bekannt für den misslungenen Bau eines Fluggeräts (Flügel an Händen und Füße, mit dem er als junger Mann um 1010 vom Turm der Abtei sprang, 201 m weit flog und sich beim Absturz die Beine brach, wobei der den Fehler auf das Fehlen eines Heckflügels zurückführte), sagte zu der Erscheinung (nach den *Gesta Rerum Anglorum* des William von Malmesbury, 1125): „You've come, have you? – You've come, you source of tears to many mothers. It is long since I saw you; but as I see you now you are much more terrible, for I see you brandishing the downfall of my country.“ In den irischen Annalen der vier Meister (1616) heißt es, der Mond sei nicht heller als der Komet gewesen (in der Tat dürfte sie viermal heller als Venus und  $\frac{1}{4}$  mal so hell wie der Mond gewesen sein). Auch die Pueblo-Indianer in New Mexico (Chaco Canyon) haben möglicherweise das Ereignis in Petroglyphen vermerkt.

Der Maler Giotto di Bondone (1266–1337) dürfte den Kometen 1301 gesehen haben und nahm ihn zum Vorbild für die erste realistische Darstellung eines Kometen als Stern von Betlehem in dem Fresko *Anbetung der heiligen drei Könige* in der Cappella degli Scrovegni (Arena Kapelle in Padua/Venetien/Italien, vollendet 1305).

**Encke** (2P/Encke, am 17. Januar 1786 von Pierre Méchain, wie 1P/Halley ist er ausnahmsweise nicht nach dem Entdecker benannt, sondern nach Johann Franz Encke, der seine Periodizität erkannte, Gr. Halbachse 2,218 AU, Perihel 0,339, Aphel 4,097, Exzentrizität 0,847, Inklination 11,5°, Periheldurchgang 12. April 2007 mit 69,53 km/s, siderische Umlaufzeit 3,31a = 3a 110d, Größe 4,8 km, Albedo 0,047) hat eine der kürzesten Umlaufzeit aller bekannten Kometen.<sup>110</sup> Schon im 19. Jh stellte man fest, dass sich seine Umlaufzeit ständig verkürzt (wie auch bei Bielas Komet) was als Beweis für die Existenz des Äthers angesehen wurde, dessen Reibungswiderstand die Abbremsung erklären konnte.<sup>111</sup> Heute führt man die Abbremsung darauf zurück, dass in Sonnennähe Materie vom Kometenkern in Form von Jets ausgestoßen wird, und diese Jets wie Bremsraketen wirken. Der ständige Verlust an Materie führt auch zur Abnahme der Masse und Helligkeit des Kometen: Die absolute Helligkeit des Kometen Encke geht in 50 Jahren durchschnittlich um zirka 0,5<sup>mag</sup> zurück; dadurch ist der heute so dunkel geworden, dass er mit bloßem Augen nicht mehr oder kaum noch zu sehen ist.<sup>112</sup>

760 (acht Jahre bevor Karl der Große 668 König der Franken wird, und zwölf Jahre vor Beginn der Sachsenkriege Karls, 772-804)

837 (größte Annäherung, 0,03 AU = 5,1 Mill. km, 60° Schweif, aufgezeichnet in China, Japan, Deutschland und Mitterem Osten, fünf Jahre vor der großen chinesischen Religionsverfolgung unter dem taoistischen Kaiser Wuzong der Tang-Dynastie 842-846 an, die sich gegen Buddhisten aber auch Zorastrier, Manichäer und nestorianische Christen richtete, die als „buddhistische Sekten“ betrachtet wurden)

912 (Annalen von Ulster, kompiliert Ende 15. Jh.: „A dark and rainy year. A comet appeared“),

989 (sieben Jahre vor der Regierung des Fatimiden-Kalifen al-Hakim, 996-1022, dessen Religionspolitik gegen Christen den Boden für die späteren Kreuzzüge bereite)

1066 (Schlacht von Hastings, viele Aufzeichnungen aus aller Welt),

1145 (von Mönch Eadwine von Canterbury bei seiner Transkription des „Eadwine-Psalters“ am Fuß einer Seite aufgezeichnet, Beginn des Zweiten Kreuzzugs).

1222 (Mongolenfürst Dschingis Khan, gannante „Geißel der Menschheit“ soll den Kometen als seinen Stern betrachtet haben und zu seiner Invasion Europas durch die Bewegung des Kometen nach Westen inspiriert worden sein),

1301 (vermutlich inspirierte der Komet den Maler Giotto; mit der Bulle „Ausculat Fili“ beginnt der Konflikt zwischen Bonifaz und Philipp dem Schönen, der zur „Babylonischen Gefangenschaft“ der Kirche führen wird, 1305/8-1378),

1378 (beginn des abendländischen Schismas, 1378-1414),

1456 (diese und alle weiteren Erscheinungen wurden weltweit beobachtet; „Türengefahr“ Belagerung von Belgrad nachdem Fall von Konstantinopel 1453: Bittgottesdienste auf Anordnung von Papst Callixt III.),

1531 (Petrus Apianus; Vollendung der Kirchenspaltung unter Heinrich VIII. 1534 bahnt sich an),

1607 (Johannes Kepler; Vorjahr des dreißigjährigen Krieges),

1682 (Halley, Vorjahr des großen Türkenkriegs 1683-1699),

1758/59 (Palitzsch; von Halley vorhergesagt: mitten im Siebenjährigen Krieg = nullter Weltkrieg, 1756-1763),

1835 (Bessel; Karl Marx' erste Schrift, Georg Büchners Aufruf gegen Adel und Bürgertum in der Flugschrift „Der Hessische Landbote“ 1834; Dantons Tod 1835),

1910 (Flammarion, imposante Erscheinung, Angst der Bevölkerung vor tödlichem Giftgas; Mark Twain, im Erscheinungsjahr 1835 geboren, wünschte sich, die nächste Erscheinung 1910 noch mitzerleben, und starb eine Tag nach dieser; Sturz der Monarchie in Portugal, Europa steuert auf den in vier Jahren beginnenden Weltkrieg zu),

1986 (Tschernobyl-Jahr, enttäuschend schwache Erscheinung, Raumsonden in situ); nächster Termin: 2061.

<sup>110</sup> Noch etwas kürzer (3,2 Jahre) ist die Umlaufzeit des Main-Belt-Kometen 311P/PANSTARRS oder P/2013 P5, entdeckt am 27. August 2013 vom PANSTARRS-Teleskop: ein 480m großer „rubble pile comet“ (Geröllhaufen-Komet) mit 6 Schweifen.

<sup>111</sup> So heißt es bei Benjamin Silliman, *First Principles of Chemistry*, Philadelphia 1860, S. 44: „Encke's comet is found to lose about two days in each successive period of 1200 days. Biela's comet, with twice that length of period, loses about one day. That is, the successive returns of these bodies is found to be accelerated by this amount. No other cause for this irregularity has been found but the agency of the supposed ether.“

<sup>112</sup> Seine Helligkeit war 1805 4mag, 1829 noch einmal 3,5 mag (größte aufgezeichnete Helligkeit), im 20. Jh. nie über 5 mag, wobei 5 mag das letzte Mal 1964 erreicht wurde; 1997 waren die maximale Helligkeit 6 mag, 2007 nur noch 7 mag. Die größte aufgezeichnete Schweiflänge wurde 1805 erreicht und betrug 3°.

Auf den Enckeschen Kometen geht der Meteorstrom der Tauriden zurück, des größten Materiestroms im inneren Sonnensystem,<sup>113</sup> ebenso ein Meteorstrom, der auf den Merkur niedergeht, und der 350-780m große erdnahe Asteroid **2004 TG 10**, auf den wiederum ein Teil der Tauriden (die sog. nördlichen Tauriden) zurückgehen. Encke und die Tauriden sind Überbleibsel eines viel größeren Kometen, der in den letzten 20-30.000 Jahren zerstückelt wurde. Die Swastika, die als Symbol in verschiedenen alten Kulturen um die gleiche Zeit auftauchte, wird mit dem Aussehen des Kometen Encke in Verbindung gebracht, der einst Feuerrad-ähnlich Erschienen sein könnte (entsprechende Kometenzeichnungen gibt es in einem Atlas der Han-Dynastie; festgehalten in den Mawangdui Silk Texts). Es gibt Spekulationen, dass Tauridenschwärme oder größere Bruchstücke des Kometen für bronzezeitliche Katastrophen im Nahe Osten verantwortlich sein könnten; ein großer Einschlagkrater im Irak (Umm al Binni lake) gilt als möglicher Beweis. Mehr als 700 Jahre vor der ersten Sichtung des Kometen Encke durch den französischen Astronom Pierre Méchain im Jahre 1786 war der Komet Encke unter der Bezeichnung *Du-ba mjug-rings* „Einer, der einen langen Rauchsweif hat“ in Tibet bekannt.<sup>114</sup>

Franz Encke gelang es 1819, verschiedene Sichtungen in den Jahren 1786 (Méchain), 1795 (Caroline Herschel, Schwester von Uranus-Entdecker Wilhelm Herschel), 1805 und 1818 (beide von Jean-Louis Pons) als Sichtungen desselben Kometen nachzuweisen; er veröffentlichte dieses Ergebnis 1819 in der Zeitschrift *Correspondance Astronomique* und sagte die Wiederkehr für das Jahr 1822 korrekt vorher. Encke war eines der Ziele der gescheiterten NASA-Raumsonde *Contour* (Comet Nucleus Tour).<sup>115</sup>

**Biela** (3D/Biela, entdeckt am 27. Februar 1826 vom österreichischen Offizier und Amateurastronomen Wilhelm Freiherr von Biela in Josefstadt/Böhmen, Komet der Jupiter-Familie, vierter als periodisch erkannter Komet nach 1P/Halley, 2P/Encke und 16P/Olbers; Gr. Halbachse 3,535 AU, Perihel 0,879, Aphel 6,190 AU, Exzentrizität 0,751, Inklination 13,216°, Umlaufzeit 6,6 a 6a 236d, Periheldurchgang 24. September 1854 mit 42,04 km/s) war der erste Komet, dessen Zerfall 1845/46 beobachtet wurde; er löste sich daraufhin vollständig auf.

Es handelte sich um den gleichen Kometen handelt, der bereits im 1772 von Jacques Leibax Montaigne und Charles Messier, sowie 1805 von Jean-Louis Pons entdeckt worden war. Wie vorhergesagt kehrte er 1832 wieder, wo er zuerst am 24. September von John Herschel (Sohn von Uranus-Entdecker Wilhelm Herschel und Neffe von Caroline Herschel) gesichtet wurde.

Zum Jahreswechsel 1845/1846 konnten Astronomen beobachten, wie der Komet in zwei Teile zerbrach, die sich langsam voneinander entfernten. Im März 1846 war der Abstand zwischen den beiden Bruchstücken, die beide einen kurzen Schweif ausbildeten, bereits auf 300.000 Kilometer angewachsen. Auch bei der nächsten Wiederkehr des Kometen im Jahr 1852 konnten beide Teile aufgefunden werden, ihr Abstand war bereits auf 2,5 Millionen Kilometer angewachsen, was ein Auseinanderdriften mit 40–50 km/h ergab.

Die Wiederkehr des Kometen wurde für die Jahre 1859 und 1865 vorhergesagt, der Komet konnte aber nicht wiedergefunden werden. Auch im Jahr 1872 blieb die Suche nach dem Kometen erfolglos, jedoch konnte am 27. November – dem Tag, an dem die Erde die Bahn des Kometen kreuzte – ein Meteorschauer mit bis zu 3000 Sternschnuppen pro Stunde beobachtet werden: Offenbar handelte es sich bei den Meteoroiden um die Überreste des nun vollständig aufgelösten Himmelskörpers. Der als *Bieliden* (auch *Andromediden*) bezeichnete Meteorstrom konnte auch 1885, 1892 und 1899 wieder beobachtet werden, seine Intensität ging aber stetig zurück. Danach traten die Bieliden nicht wieder in Erscheinung.

<sup>113</sup> Die Tauriden werden außer von Encke aber auch von den Bruchstücken einiger Asteroiden gespeist. Die Tauriden sind schwerer als andere Meteoroiden (eher Kieselsteine als Staub: manche sind noch größere und werden als Boliden / Feuerkugeln gesichtet). Sie fallen (mit typischerweise 5 Meteore pro Stunde) vor allem Ende Oktober / Anfang November und heißen daher auch „Halloween Fireballs“. Durch Gravitationsstörungen des Jupiter hat sich der Schwarm aufgeteilt in Südliche Tauriden (10. Sept – 20. Nov) und Nördliche Tauriden (20. Oktober – 10. Dezember). Ein weiterer Teil sind die Beta Tauriden und Zeta Perseiden im Juni/Juli, welche die Erde aber zur Tagzeit treffen und daher unsichtbar bleiben; das Tunguska-Ereignis am 30. Juni 1908 könnte durch einen Beta Tauriden ausgelöst worden sein. Der 2005 beobachtete Meteoriteneinschlag auf dem Mond stammte von den Tauriden (seither sind über 100 Einschläge auf dem Mond beobachtet worden, sichtbar durch Lichtblitze, die teils mit bloßem Auge sichtbar sind). Die Tauriden haben einen Aktivitätszyklus mit einer erhöhten Aktivität alle 2500-3000 Jahre; der nächste Peak wird um 3000 n. Chr. erwartet.

<sup>114</sup> Vgl. hierzu die Tibet-Encyclopaedia (<http://www.tibet-encyclopaedia.de/komet-encke.html> / 16.03.2015): „In seiner 1966 in München vorgelegten Habilitationsschrift (*Indo-tibetische Astronomie*) erläuterte Winfried Petri auf S. 144f., dass sich im Kālacakratāntra, das in der vorliegenden Form nach 1027 entstanden ist und in der zweiten Hälfte des 11. Jahrhunderts in das Tibetische übersetzt wurde, Berechnungen zur Sichtbarkeit eines Himmelskörpers finden, der im Tibetischen mit *du-ba mjug-rings* („einer, der einen langen Rauchsweif hat“) bezeichnet wird. Dieser Komet wird nach dem Kālacakratāntra alle drei Jahre für 1,5 Monate sichtbar. Die Berechnungen seiner Sichtbarkeit hat die tibetische Astronomie seit dem 11. Jahrhundert bis in die Neuzeit beschäftigt. Die zweitälteste uns aus Tibet bisher bekannt gewordene Abhandlung über Astronomie, die Berechnungen zur Sichtbarkeit des Kometen Encke enthalten, ist das Kālacakrāvātāra des indischen Lehrmeisters Abhayākaragupta (1084–1130). Dieses Werk wurde im ersten Viertel des 12. Jahrhunderts geschrieben und zur gleichen Zeit unter Mitwirkung des Autors von dem Tibeter *Nyin-phug-pa Chō kyi Dragpa* (*Chos kyi grags pa*, 1094–1186) ins Tibetische übersetzt. Nach Abhayākaragupta pendelt dieser *du-ba mjug-rings* genannte Komet vor und hinter der Sonnenscheibe mit einer Geschwindigkeit von 2,5 *chu-srang* pro Tag gegenüber der Sonne hin und her und wird jeweils nach drei Jahren nur für 1,5 synodische Monate sichtbar. In dem Zeitraum von drei Jahren, in dem der Komet sich vor oder hinter der Sonnenscheibe befindet, ist Encke für den Beobachter auf der Erde nicht wahrnehmbar. Nach Abhayākaragupta wirft Encke in den 1,5 Monaten seiner Sichtbarkeit für einen Monat seinen Schweif (*du-ba*) ab und erscheint in dieser Zeit dem Beobachter wie ein Fixstern (*skar-ma*). Die restliche Zeit von 15 Tagen ist er jeweils mit einem langen Schweif (*mjug-ma ring-po*) sichtbar.

Nach den Erläuterungen des tibetischen Astronomen Khyenrab Norbu (*mKhyen-rab nor-bu*, *Rigs-ldan snying gi thig-le*, Dharmasala-Ausgabe, S. 64) waren den tibetischen Astronomen vier Kometen bekannt, die alle als Emanationen (*sprul-pa*) des Pseudoplaneten *sGra-gcan* angesehen wurden, der für die Sonnen und Mondfinsternisse verantwortlich zeichnete. Ihr Erscheinen am Himmel wurde als unheilvolles Vorzeichen (*mi-dge'i ltas*) angesehen. Khyenrab Norbu führt für diese Kometen folgende Bezeichnungen und Himmelsrichtungen auf: (Osten) *Du-ba mjug-rings*, d. i. der Komet Encke; (Süden) *sTag-mgo me-'bar* „Tigerkopf mit einem Feuerkranz“; (Westen) *g.Yag-mgo rlung-tshub* „Yakkopf mit heftigem Sturm“; (Norden) *Chu-tig sngon-po* „Blauer Wassertropfen“. Nach *mKhyen-rab nor-bu* waren der tibetischen Astronomie nur im Falle des Kometen Encke Berechnungsmethoden bekannt, die eine Vorausberechnung seiner Sichtbarkeit ermöglichten.

Die ältesten uns überlieferten Berechnungen eines tibetischen Astronomen zur Sichtbarkeit des Kometen Encke finden sich in der 1318 von dem Karma[pa] Rangjung Dorje (*Rang-byung rdo-rje*) verfassten Schrift *rTsis kyi bstan-bcos kun las btus-pa'i rtag-pa*. Während diese Darlegungen noch sehr kurz gefasst sind, beschäftigt sich über 100 Jahre später der Astronom Phugpa Lhündrub Gyatsho (*Phug-pa lHun-grub rgya-mtsho*) in seinem 1447 fertiggestellten, in Prosa verfassten *Padma dkar-po'i zhal-lung* ausführlich diesem Thema. Phugpa Lhündrub Gyatshos ausführliche Erörterungen abweichender Berechnungsmethoden von Seiten anderer tibetischer Astronomen zeigen, dass die Berechnung der Sichtbarkeit des Kometen Encke in seiner Zeit vielfältig diskutiert wurde. In den folgenden Jahrhunderten fehlten in keinem der wichtigen tibetischen astronomischen Lehrbüchern Berechnungen zur Sichtbarkeit des Kometen Encke. Dies gilt insbesondere für das 1685 fertiggestellte, umfangreiche Werk *Vaidūrya dkar-po* des Regenten *sde-srid Sangs-rgyas rgya-mtsho*.“

<sup>115</sup> Die Sonde wurde 2002 gestartet, zerfiel aber im Erdboden aber aus unbekanntem Gründen (Kollision mit einem Meteoroiden oder mit Weltraum-Müll?) in drei Teile. Sie sollte am Kometen Encke im Jahre 2003, am Kometen 73P/Schwassmann-Wachmann 3 im Jahre 2006 und am Kometen 6P/d'Arrest im Jahre 2008 vorbeifliegen.

**Johannesburger Komet** oder **Großer Januarkomet** oder **Tageslichtkomet von 1910** (C/1910 A1; 1910 I; Gr. Halbachse 25.795 AU, Perihel 0,129 Aphel 51.590 AU, Exzentrizität 0,999995, retrograde Inklination 138,8°, Umlaufzeit > 4 Millionen Jahre, Periheldurchgang 17. Januar 1910 mit 117,3 km/s; „dynamisch neuer“ Komet aus der Oortischen Wolke; nach dem Durchgang wurde durch die Planeten seine Exzentrizität auf 0,999913 verringert und seine Große Halbachse auf 1500 AU verkürzt, so dass er möglicherweise bereits nach 50.000–60.000 Jahren wiederkehren wird) machte – fast gleichzeitig mit Halley – 1910 zum einmaligen Jahr zweier Großer Kometen. Er wurde am 12. Januar 1910 von drei Arbeiter einer Diamantmine in Transvaal/Südafrika (bei Johannesburg) in der Morgendämmerung entdeckt, als er schon eine Helligkeit von -1 mag hatte. Er war zunächst nur auf der Südhalbkugel zu sehen, wurde heller als Venus und als schneeweißes Objekt von 1° geschildert; er war möglicherweise der hellste Komet des 20. Jahrhunderts, abgesehen von Ikeys-Seki. Am 17. Januar während seines Perihelions war er am Tage sichtbar. Danach nahm er an Helligkeit ab, war aber als immer noch spektakuläres Objekt auf der Nordhalbkugel in der Abenddämmerung sichtbar, wobei sein Schweif Anfang Februar eine Länge von 50° hatte. Der erwartete Halleysche Komet erschien erst im April; viele, die ihn gesehen zu haben glauben, erinnern sich in Wirklichkeit den zwei Monate vorher erschienenen Tageslichtkometen.



**Ikeya-Seki** (C/1965 S1; 1965 VII; Sonnenstreifer der Kreutz-Gruppe; am 18. September 1965 von den beiden Astronomen Kaoru Ikeya und Tsutomu Seki unabhängig voneinander entdeckt; Gr. Halbachse 91,6 AU, Perihel 0,0078 Aphel 183,2 AU, Exzentrizität 0,999915, retrograd Inklination 149,9°, siderische Umlaufzeit 880a, Periheldurchgang 21. Oktober 1965 mit 477 km/s) war vermutlich der hellste Komet des 20. Jahrhunderts, wenn nicht sogar des letzten Jahrtausends.

Der Komet war am 20. Oktober 1965 mit bloßem Auge 2° deutlich neben der Sonne am Taghimmel mit ca. -10 mag sichtbar. Während der letzten Oktober- und der ersten Novembertage wurden allgemein Schweiflängen von bis zu 30° (was einer realen Länge von 0,75 AU entsprach) berichtet. Ein Beobachter will sogar am Morgen des 28. Oktober einen 45° langen Schweif gesehen haben. Zu dieser Zeit wurde auch ein zweiter Plasmaschweif neben dem hellen Staubschweif beobachtet. Die Verdichtungen (Striae) im Staubschweif gaben diesem eine charakteristische Korkenzieherform.

Am 4. November wurde erstmals ein doppelter Kometenkern beobachtet. Neben dem Hauptkern konnte ein schwächerer zweiter Kern festgestellt werden, der dann noch bis zum 14. Januar 1966 beobachtet werden konnte. Die letzte visuelle Beobachtung des Kometen erfolgte am 31. Januar 1966 bei einer Helligkeit von 11 mag, möglicherweise wurde er auch noch ein letztes Mal am 12. Februar fotografiert.

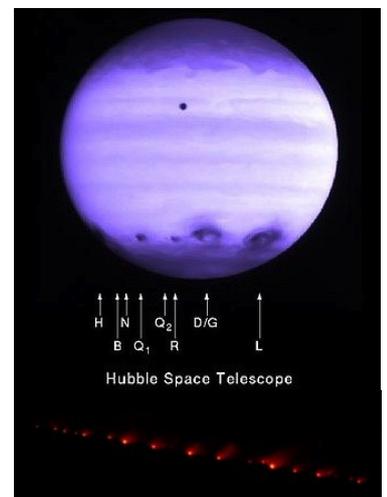


**Shoemaker-Levy 9** (D/1993 F2; 1993e; am 24. März 1993 von Carolyn und Eugene Shoemaker zusammen mit David Levy auf einem Foto entdeckt; Gr. Halbachse 5,162 AU, Perihel 4,822 AU 5.503 AU, Exzentrizität 0,066; Inklination 1,3508°, siderische Umlaufzeit 11a 266d, Durchmesser 4 km, Periheldurchgang: keinen).

Dieser Komet war vermutlich schon vor seiner Entdeckung um 1960 zu einem Quasisatelliten des Jupiter geworden und in 21 Bruchstücke zerfallen, zwischen 50 und 1000 m Größe, die sich auf einer mehrere Millionen Kilometer langen Kette aufrehten. Zur Unterscheidung wurden die Fragmente mit den Buchstaben „A“ bis „W“ bezeichnet. („I“ und „O“ wurden wegen ihrer Ähnlichkeit mit den Ziffern „1“ und „0“ nicht verwendet.)

Alle Fragmente schlugen zwischen dem 16. und 22. Juli 1994 auf der Südhalbkugel des Planeten Jupiter auf.

Ihre Geschwindigkeit betrug 60 km/s und sie setzten dabei die Energie von 50 Millionen Hiroshima-Bomben (= 13.000 kg TNT), d.h. 650 Gigatonnen TNT frei. Dies war das erste Mal, dass die Kollision zweier Körper des Sonnensystems und die Auswirkungen eines solchen Impakts direkt beobachtet werden konnten. Die Spuren des Impakts waren über Monate hinweg sichtbar: sog. „Plumes“ (heiße Gasblasen, ähnlich einem „Atompilz“) bildeten dunkle Flecken mit Durchmessern bis zu 12.000 km in der Atmosphäre Jupiters. Die Raumsonde Galileo konnte aus einer Entfernung von 1,6 AU die Impakte direkt beobachten.



**Hale-Bopp, Großer Komet von 1997** (C/1995 O1; am 23. Juli 1995 unabhängig voneinander durch Alan Hale in New Mexico und Thomas Bopp in Arizona entdeckt; die erste unbewusste Ablichtung des Kometen geschah bereits 1993 von dem Siding Spring Observatorium / Australien; Gr. Halbachse 186,2 AU, Perihel 0,914, Aphel 371,4 AU; Exzentrizität 0,995; Inklination 89,430°, Periheldurchgang 1. April 1997 mit 44,005 km/s, siderische Umlaufzeit 2540a, Größe 60 km, Rotationsdauer 11h 46min) war von 1996 bis 1997 mehr als 18 Monate mit bloßem Auge sichtbar und hält damit den Rekord unter allen bekannten Kometen – doppelt so lange wie der vorherige Rekordhalter Flaugergues (C/1811 F1 – der Große Komet von 1811), der für 9 Monate mit bloßem Auge beobachtet wurde. Auch war Hale-Bopp für acht Wochen heller als 0<sup>m</sup> – länger als irgendein anderer Komet in den letzten tausend Jahren. Er erzeugte ein weit größeres Aufsehen als der Halleysche Komet 1986. Man kann davon ausgehen, dass kein anderer Komet jemals von so vielen Menschen gesehen wurde wie Hale-Bopp.

Bei seiner Entdeckung hatte er 11 mag und war 7,2 AU von der Sonne entfernt, befand sich also zwischen Jupiter und Saturn, was bei weitem die größte Entfernung ist, bei der ein Komet entdeckt wurde; er hatte ungewöhnlicherweise bereits in dieser Entfernung eine Koma. Die Größe des Kerns 60 km ist größer als bei jedem anderen bekannten Komet. Man sah zwei wachsende Schweife. Der blaue Gasschweif zeigte direkt von der Sonne weg, während der gelbe Staubschweif in Richtung seines Orbits zeigte. Erstmals wurde hier an einem Kometen ein dritter Schweif entdeckt (dünner Natriumschweif zwischen dem Gasschweif und dem gewöhnlichen Staubschweif, nur Teleskopen und Filtern sichtbar). Man entdeckte auch organische Verbindungen und dass der Deuteriumgehalt des Kometen doppelt so hoch ist wie in irdischen Ozeanen; das Eis des Kometen könnte sich eher in interstellaren Wolken als in der protoplanetaren Scheibe entwickelt haben. Da sich zwei Helligkeitsspitzen zeigen, wird außerdem spekuliert, dass der Komet vielleicht zwei Kerne hat, von denen der eine den anderen umkreist.



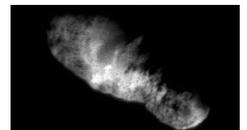
Als der Komet am 1. April 1997 sein Perihel passierte, hatte er sich mit einer scheinbaren Helligkeit von etwa  $-1^m$  zu einem eindrucksvollen Schauspiel entwickelt. Er schien heller als jeder Stern außer Sirius und seine zwei Schweife erstreckten sich über einen Winkel von 30 bis 40° über den Himmel. Er war bereits zu sehen, bevor es richtig dunkel wurde, und blieb auf der Nordhalbkugel die ganze Nacht über sichtbar. Im Januar 2005 befand er sich mit einer Entfernung von 21 AU weiter von der Sonne weg als der Uranus, konnte aber immer noch mit großen Teleskopen ausgemacht werden. Beobachtungen zeigten, dass er zu diesem Zeitpunkt immer noch einen kleinen Schweif besaß.

Astronomen erwarten, dass er ungefähr bis zum Jahr 2020 beobachtbar ist, wenn er eine scheinbare Helligkeit von 30<sup>m</sup> erreicht haben wird. Danach wird es sehr schwer werden, ihn von den Hintergrundgalaxien zu unterscheiden, die eine ähnliche Helligkeit besitzen. Durch Jupiters Gravitationseinfluss verkürzte sich die Umlaufzeit des Kometen von 4200 Jahren auf 2380 Jahre, sodass er um das Jahr 4419 wieder ins innere Sonnensystem gelangen wird; Vor der Begegnung mit Jupiter lag sein Aphel mit 525 AU dementsprechend weiter außen gewesen.

Hale-Bopp war Anlass für Panik in verschiedenen religiösen Strömungen. So nahm die UFO-gläubige neureligiöse Gruppierung Heaven's Gate das Erscheinen des Kometen als Anlass für die Selbsttötung von 39 Sektenmitgliedern, die durch ihre Tötung auf das den Kometen angeblich begleitende Raumschiff kommen wollten.

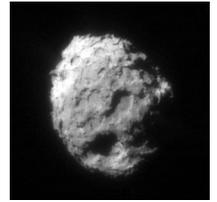
**Borelly** (19P/Borelly; 1905 II, 1904e; am 28. Dezember 1904 von Alphonse Louis Nicolas Borelly entdeckt, bald darauf als periodisch erkannt und seine Wiederkehr für 1911 korrekt vorhergesagt; Komet der Jupiter-Familie; Gr. Halbachse 3,608 AU, Perihel 1,355 Aphel 5,986 AU, Exzentrizität 0,624, Inklination 30,324°, Periheldurchgang 22. Juli 2008 mit 32,61 km/s, siderische Umlaufzeit 6a 311 d, Größe  $8 \times 4 \times 4$  km, Albedo 0,03, Dichte  $300 \text{ kg/m}^3$ ,  $2 \cdot 10^{13}$  kg) hat eine extrem kleine Dichte.

Am 22. September 2001 flog Raumsonde Deep Space 1 (extended mission) in 2200 km Abstand an ihm vorbei und übermittelte Bilder des Kerns. Seine Oberfläche ist die dunkelste im bislang bekannten Sonnensystem; so dunkel wie schwarzes Tonerpulver. Besonders schwarze Flecken haben sogar einen Albedo-Wert von 0,007, für den bisher kaum entsprechende Minerale bekannt sind.



**Wild 2** (81P/Wild; 1978 XI; 1984 XIV; 1990 XXVIII; 1978b; 1983s; 1989t; am 6. Januar 1978 vom Schweizer Astronomen Paul Wild entdeckt, Gr. Halbachse 3,45 AU, Perihel 1,60 Aphel 5,30, Exzentrizität 0,537, Periheldurchgang 22. Februar 2010 mit 29,2 km/s, Inklination 3,2°, siderische Umlaufzeit 6,41a, Größe  $5.5 \times 4.0 \times 3.3$  km, Albedo 0,04, Dichte  $500 \text{ kg/m}^3$ ,  $2,3 \cdot 10^{13}$  kg) ist der erste Komet, aus dessen Koma von einer Sonde (Stardust 1) Teilchen eingesammelt wurden. Die Proben wurden im Jahre 2006 zur Erde zurückgebracht. Der Staub enthält die Minerale Anorthit, Cubanit, Diopsid, Eisen, Enstatit, Forsterit, Gehlenit, Korund, Osbornit, Pentlandit, Perowskit, Pyrrhotin und Spinell.

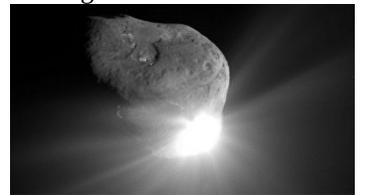
Nach weiteren Untersuchungen konnten 2009 auch mikroskopische Spuren der Aminosäure Glycin nachgewiesen werden. Dies war der erste Nachweis eines Grundbaustein des Lebens in einem Kometen und soll die Hypothese der Panspermie stützen, nach der Leben im Universum eher die Regel als die Ausnahme sei. Seine raue Oberfläche ist mit flachen Mulden überzogen, deren Ränder aber steil und schroff sind. Neben sehr kleinen lassen sich auch bis zu zwei Kilometer große Strukturen erkennen. Man glaubt, dass diese Strukturen Einschlagkrater darstellen oder von ausströmenden Gasjets gebildet wurden. Während des Vorbeiflugs von Stardust waren mindestens zehn Gasjets aktiv.



Man glaubt, dass Wild 2 während seiner mehr als 4,5 Milliarden Jahre dauernden Existenz eine weitere und weniger exzentrische Umlaufbahn hatte als heute. Nachdem er sich im Jahre 1974 auf rund 0,006 AU an den Planeten Jupiter näherte, beeinflussten dessen starke Gravitationskräfte die Umlaufbahn des Kometen. Infolge dieser Bahnstörung wurde er ins innere Sonnensystem umgelenkt: Seine Umlaufzeit verkürzte sich von vierzig auf ungefähr sechs Jahre, und seine Periheldistanz wurde von rund 5 AU auf nur 1,60 AU verringert.

**Tempel 1** (1P/Tempel 1; 1867 II; 1873 I; 1879 III; 1966 VII; 1972 V; 1978 II; 1983 XI; 1989 I; 1994 XIX; 1873a; 1879b; 1972a; 1977i; 1982j; 1987e1; 1993c; entdeckt 1867 in der Sternwarte von Marseille von dem sächsischen Astronomen und Lithographen Ernst Wilhelm Leberecht Tempel; gehört zur Jupiter-Familie, Gr. Halbachse 3,14 AU, Perihel 1,53 Aphel 4,75 AU, Exzentrizität 0,512, Inklination 10,5°, Umlaufzeit 5,56a, Periheldurchgang 6. August 2016 mit 29,6 km/s; Albedo 0,04, Größe 6 km (6,7 × 4,9 km), Dichte 620 kg/m<sup>3</sup>, 8•10<sup>13</sup> kg) war das Ziel der Deep-Impact-Mission der NASA, bei der am 4. Juli 2005 ein 372 kg schweres, hauptsächlich aus Kupfer bestehendes Projektil mit einer relativen Geschwindigkeit von 10 km/s auf dem Kometen einschlug.

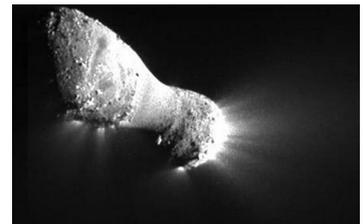
Mit der Sonde selbst und mit zahlreichen erdgestützten Teleskopen, aber auch mit dem Weltraumteleskop Hubble und der ESA-Raumsonde Rosetta wurde die entstandene Partikelstaubwolke beobachtet. Eine weitere Untersuchung des Kometen durch eine Raumsonde geschah am 14. Februar 2011. Dabei kam die Sonde Stardust, die seit 1999 unterwegs ist, dem Kometen extrem nahe. Sie flog in lediglich 181 Kilometer Entfernung an „Tempel 1“ vorbei. Der Impaktkrater hat 100 m Durchmesser und 30 m Tiefe; der Komet besitzt keine harte Kruste, sondern ist mit einer weichen Staubschicht umgeben.



Im Jahr 1881 näherte sich der Komet bis auf 0,55 AU an den Planeten Jupiter, wobei durch die Gravitationswirkung des Planeten die Bahn des Kometen so verändert wurde, dass sich die Umlaufzeit auf 6,5 Jahre verlängert hat. Durch diese Bahnänderung ging der Komet zunächst verloren. Als in den 1960er Jahren seine Bahn unter Berücksichtigung der Bahnstörung durch die Planeten berechnet werden konnte, zeigte sich, dass sich der Komet in der Zwischenzeit noch zweimal an Jupiter annäherte (1941 auf 0,41 AU und 1953 auf 0,77 AU), sodass sich seine Umlaufzeit in etwa auf den heutigen Wert von 5,5 Jahren verkürzt hatte. Nach diesen neuen Bahnbestimmungen konnte der Komet nachträglich im Dezember 1968 auf einer Fotoplatte vom Juni 1967 aufgefunden werden. Endgültig bestätigt wurde die Wiederauffindung bei der Wiederkehr des Kometen im Jahre 1972.

**Hartley 2** (103P/Hartley 2; 1985 V; 1991 XV; 1986c; 1991t; wurde am 15. März 1986 von Malcolm Hartley mit dem *UK Schmidt Telescope* am Siding-Spring-Observatorium entdeckt; Komet der Jupiter-Familie; Gr. Halbachse 3,47 AU, Perihel 1,06 Aphel 5,88 AU, Exzentrizität 0,695, Inklination 13,6°, siderische Umlaufzeit 6,46a, Periheldurchgang 28. Oktober 2010 mit 37,7 km/s; Albedo 0,028; Größe 1,6 km; Masse 3•10<sup>11</sup> kg) ist der kleinste von einer Raumsonde besuchte Komet.

Wenn der Kern nicht auseinanderbricht oder mit einem anderen Objekt zusammenstößt, wird er bei seinem momentanen Masseverlust von der Erde aus noch ca. 100 Mal sichtbar sein (das entspricht 700 Jahren). Am 20. Oktober 2010 flog der Komet in einer Entfernung von 0,12 AU an der Erde vorbei, nur acht Tage vor seinem Periheldurchgang; währenddessen war der Komet mit einer scheinbaren Helligkeit von etwa 5 mag sichtbar. Die Raumsonde Deep Impact passierte den Kometen am 4. November 2010 im Rahmen der EPOXI-Mission in einer Entfernung von 700 km. Hartley 2 ist ein hyperaktiver kleiner Komet, der mehr Wasser ausstößt als andere Kometen seiner Größe.



**Holmes** (17P/Holmes, gehört zur Jupiter-Familie, am 6. November entdeckt vom britischen Amateurastronomen Edwin Holmes am 5. November 1892; Gr. Halbachse 3,62 AU, Perihel 2,05 Aphel 5,18 AU, Exzentrizität 0,03, Inklination 19,11°, siderische Umlaufzeit 6,88; Größe 3,5 km) steigerte vom 23-24 Oktober 2007 seine scheinbare Helligkeit von 17 auf 2,5mag innerhalb von etwa 42 Stunden; eine so rapide Zunahme der Helligkeit auf das 500.000-fache ist der größte bekannte Helligkeitsausbruch eines Kometen. Der Komet wurde auch kurzzeitig das größte Objekt des Sonnensystems, indem seine Koma größer als die Sonne wurde.

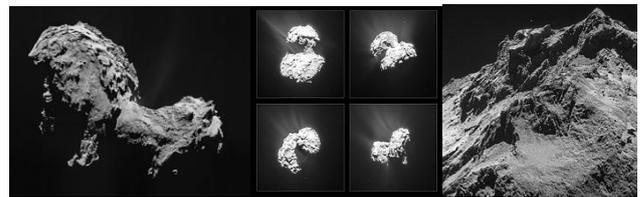


**Kohutek** (C/1973 E1 Kohutek, 1973 XII; 1973f; am 7. März 1973 vom tschechischen Astronomen Luboš Kohoutek entdeckt; Perihel 0,14 AU, Exzentrizität 1, Inklination 13,3°, Periheldurchgang 29. Dezember 1973 mit 112 m/s) hat eine besonders lang gezogene Bahn und dürfte aus der Oort'schen Wolke stammen. Seine letzte Erscheinung war vor 150.000 Jahren, er wird der Erde erst in 75.000 Jahren wieder so nahe kommen. Kohutek wurde angekündigt als „Jahrhundertkomet“, aber er blieb hinter den Erwartungen zurück. Seine maximale Helligkeit war immerhin -3 mag und hatte einen 25° langen Schweif wie auch einen Antischweif. Der Komet wurde auch von den Besatzungen von Skylab 4 und Soyus 13 beobachtet (das Bild rechts wurde am 11.1.1974 von Skylab aus gemacht) und war somit der erste aus dem All beobachtete Komet. Sektenchef David Berg (Kinder Gottes) erklärte, der Komet würde eine Katastrophe in der USA für Januar 1974 ankündigen.



**Tschurjumow-Gerasimenko** (67P/Tschurjumow-Gerasimenko; 1969 IV; kurz „Tschuri“; entdeckt 1969 von Klim Iwanowitsch Churyumov und Svetlana Iwanowna Gerasimenko; Gr. Halbachse 3,46 AU, Perihel 1,24 Aphel 5,68 AU, Exzentrizität 0,64, Inklination 7,04°, siderische Umlaufzeit 6,44a, Periheldurchgang 28. Februar 2009 mit 33,51 km/s; Größe 4,1 × 3,3 × 1,8 km, Dichte 470 kg/m<sup>3</sup>, 1•10<sup>13</sup> kg, Rotationsperiode 12,76h)

ist der Komet, der seit August 2014 von der ESA-Raumsonde Rosetta begleitet wird und auf dem am 12. November 2014 im Zuge der Rosetta-Mission erstmals eine Raussonde landete: Rosettas Philae-Lander. Der ursprünglich längerperiodische Komet wurde im mehreren Schritten vom Jupiter eingefangen und zu einem Mitglied der Jupiter-Familie gemacht. Topologie: Die Regionen wurden nach Gestalten der ägyptischen Mythologie benannt.



**Bernardinelli-Bernstein** (C/2014 UN 271). Ein 2021 entdeckter gigantischer Komet, mit 100-200 km Durchmesser. Bericht von Dirk Lorenzen im Deutschlandfunk, 12.08.2021:<sup>116</sup> „Zunächst galt dieses Objekt als Asteroid und erhielt die Bezeichnung 2014 UN271. Schnell war klar, dass es sich auf einer extrem exzentrischen Bahn bewegt, die es gut zwei Billionen Kilometer von der Sonne weg führt. Im fernsten Punkt ist dieser Körper mehr als vierzehntausendmal weiter von der Sonne entfernt als unsere Erde – die Sonne leuchtet dort nur noch als ein Stern unter vielen und fällt kaum mehr auf. Inzwischen setzt der Brocken Gas frei, die typische Aktivität eines Kometen – daher heißt er jetzt nach seinen Entdeckern Bernardinelli-Bernstein. Pedro Bernardinelli und Gary Bernstein von der Universität Pittsburgh hatten dieses Objekt auf Aufnahmen der Sternwarte Cerro Tololo in Chile entdeckt. Der Komet aus den Tiefen des Sonnensystems braucht rund 600.000 Jahre für eine volle Runde. Zwar nähert er sich uns noch für weitere zehn Jahre. Aber für ein spektakuläres Himmelschauspiel wird es kaum reichen. Denn selbst in Sonnennähe steht der Komet immer noch knapp außerhalb der Saturnbahn. Die Fachleute haben nun zehn Jahre Zeit, die weitere Annäherung zu verfolgen. Danach entschwindet der riesige Kometenkern wieder zum fernen Rand des Sonnensystems. Dass er Bernardinelli-Bernstein heißt, wird bei seiner Wiederkehr in mehr als einer halben Million Jahren wohl niemand mehr wissen.“

<sup>116</sup> <https://www.deutschlandfunk.de/das-ungewoehnliche-objekt-2014-un271-riesenkomet-im-anflug-100.html>.

## 1.16. Interstellare Asteroiden, Kometen und Meteoriten

Der Interstellare Raum ist der Raum zwischen den Sonnen und Sonnensystemen. *Interstellare Himmelskörper*, die uns „besuchen“, sind also solche, die aus dem interstellaren Raum in unser Sonnensystem eindringen.

2017 wurde am 19. Oktober durch Robert Weryk das erste dieser Objekte entdeckt (mithilfe des Teleskops Pan-STARRS 1, das regelmäßig den Himmel nach Asteroiden und Kometen absucht). Aufgrund seiner hochgradig hyperbolischen Bahn kann es nicht um die Sonne kreisen; es kommt aus der Richtung, in der momentan der Stern Wega steht (man spekuliert aber, dass es vor 45 Millionen Jahren aus einem Sternsystem der Carina-Columba Assoziation herausgeworfen wurde). Es bewegt sich im interstellaren Raum mit einer Geschwindigkeit von durchschnittlich 26,33 km/s durch den Raum relativ zur Sonne; innerhalb des Sonnensystems im Perihelium (d.h. sonnennächsten Punkt) allerdings sogar mit 87,71 km/s. Kurz vor seiner Entdeckung, nämlich am 9. September 2017, hatte es das Perihelium schon passiert, und zwar an einem Punkt, welcher der Sonne 17% näher kommt als das Perihelium des Merkur, und bei seiner Entdeckung hatte sich die Geschwindigkeit wieder auf 46 km/s verringert. Es wird den Jupiterorbit im Mai 2018 und den des Saturn im Januar 2019 passieren und das Sonnensystem in 20 Jahren verlassen, und sich dann im Sternbild Pegasus befinden. Es erhielt die Bezeichnung **1I/2017 U1** (I für „Interstellar“) und den Eigennamen '**Oumuamua** aus der hawaiischen Sprache (= Kundschafter / Bote), und hat die Form einer Zigarre (10 mal so lang wie breit) mit über 100 Meter Länge. Das sehr lichtschwache Objekt (Größenklasse 23) hat Helligkeitsschwankungen, woraus man auf eine Rotation alle 7 bis 8 Stunden und seine längliche Form geschlossen hat. Seine Farbe ist dunkles Rot, was man durch den Einfluss der kosmischen Strahlung über viele Millionen Jahre erklärt. Es besteht aus Gestein oder aus Material mit einem hohen Anteil an Metallen bestehenden Brocken handelt, auf dem es praktisch kein Eis oder Wasser gibt. Ein Besuch des Objekts mit einer Raumsonde wäre mit der in naher Zukunft verfügbaren Technologie möglich.

Als zweites Objekt dieser Art wurde am 30 August 2019 von Gennadi Wladimirowitsch Borisov entdeckt, ein Teleskopbauer und Amateurastronom auf der Krim. Es wurde 2I/Borisov genannt, und ist ein interstellarer Komet. Der Kern ist nur 2 km groß, mit Schweif hat der Komet aber die 14-fache Größe der Erde. Das Perihel lag bei 2 AE, die Inklination bei 44°, das der Komet am 8. Dezember 2019 erreichte, seitdem entfernt er sich wieder von der Sonne und wird niemals wiederkehren.



Foto von 2I/Borisov Ende 2019, neben einer weit entfernten Galaxie

Im Januar 2020 wurde mitgeteilt, dass Altersbestimmungen bei einem im Jahre 1969 in Australien niedergegangenen Meteoriten ergeben hätten, dass in diesen Meteoriten Gestein im Alter von 5 bis 7 Milliarden Jahren vorhanden ist. Da das Sonnensystem vor etwa 4,5467 Milliarden Jahren entstand, enthalten diese Meteoriten demnach Material, das bis zu ca. 2 Milliarden Jahren älter als das Sonnensystem ist. Es handelt sich also um einen „interstellaren Meteoriten“. Ebenfalls im Januar 2020 wurde kurze Zeit später bekannt, dass der Allende-Meteorit, der ebenfalls 1969 niederging (allerdings nicht in Australien, sondern in Mexiko) ebenfalls präsolares Material enthält: also Materie, die schon existierte, bevor es die Sonne gab. Auch dieser Meteorit hat also eine Reise durch den interstellaren Raum gemacht, bevor das Sonnensystem existierte.

## 2. Fixsterne

**Sternbilder:** Die 1919 gegründete Internationale Astronomische Union (IAU) legte in ihrer ersten Sitzung 1922 eine Liste von 88 Sternbildern fest, die den Himmel vollständig einteilen, so dass jeder Fixstern zu genau einem Sternbild gehört; die genauen Grenzen wurden 1930 festgelegt. Für jedes Sternbild gibt es einen Namen und eine Abkürzung aus drei Buchstaben. Von diesen waren 47 bereits in der Antike bekannt:<sup>117</sup> sie gehören zu den 48 vom Astronomen *Claudius Ptolemäus* in dessen Werk *Almagest* (um 145 n. Chr.) beschriebenen Sternbildern, auf welche er insgesamt 1028 Sterne aufteilte (nur eines der von Ptolemäus genannten Sternbilder, nämlich das Sternbild „Schiff Argo“ wurde wegen seiner Größe von der IAU nicht übernommen, sondern in die drei kleinere Sternbilder unterteilt: siehe unten). Ptolemäus hat die Sternbilder nicht selbst erfunden, denn vor ihm beschrieb schon der griechische Dichter *Aratus von Soloi* in seinem Lehrgedicht *Phainomena* (um 265 v. Chr.) fast alle diese Bilder;<sup>118</sup> dieses Gedicht geht auf das gleichnamige verlorene Prosawerk des *Eudoxos von Knidos* (ca. 390–337 v. Chr.) zurück; letztlich scheinen aber etliche der 48 Sternbilder bereits auf die vor der griechischen Epoche florierenden alt-mesopotamischen Kulturen (*Babylonier, Assyrer, Akkader und Sumerer*) zurückzugehen: Viele erscheinen in den babylonischen „*Mul.Apin*“ Keilschrift-Tafeln, deren älteste erhaltene Kopie aus dem Jahre 687 v. Chr. stammt (nach dem Astrophysiker Bradley Schaefer beruht der Text auf Beobachtungen um 1370 v. Chr. ± 100 Jahre in Assur; andere Experten weichen davon ab, aber allgemein datiert man die Beobachtungen auf Zeiten zwischen 2300 v. Chr. und kurz vor 687 v. Chr.; die sumerischen Namen könnten auf sumerischen Ursprung hindeuten, so dass die Sternbilder ins 3. Jahrtausend v. Chr. zurückgehen könnten).<sup>119</sup> Im 8. Jh. erwähnt bereits der Dichter *Homer* das Sternbild Ursa Major als Bär oder Wagen; ebenso erwähnt er den Orion. Da Ursa Major als Bär in den Überlieferungen vieler Völker erscheint (so auch in Sibirien und bei den Indianern) scheint das Sternbild bereits 10.000 Jahre alt zu sein: Die Festlegung als Bär scheint geschehen zu sein, bevor der Amerikanische Kontinent in der letzten Eiszeit über die noch zugefrorene Beringsee besiedelt wurde. Orion, Bär und Plejaden erscheinen auch in *biblischen Büchern*, und zwar in den Büchern Hiob (das Ereignis um 1600 v. Chr. zu schildern scheint, aber später geschrieben sein kann) und Amos (um 760 v. Chr.):<sup>120</sup>

*Petrus Plancius* († 1622) führte zwischen 1589 und 1612 drei neue Sternbilder ein und verschaffte einem schon vor ihm bekannten vierten Sternbild, dem *Kreuz des Südens*, Anerkennung.<sup>121</sup> *Caspar Vopelius* († 1561) trug 1532 auf einem handbemalten

<sup>117</sup> Die Ptolemäischen Sternbilder sind eingeteilt in 12 Ekliptik-Sternbilder (die auf der Ekliptik, der Planetenbahnebene, liegen, und die meist Tiere darstellen und daher auch Tierkreissternbilder heißen); 21 Sternbilder nördlich der Ekliptik und 16 Sternbilder südlich davon:

a) Die Ekliptik-Sternbilder sind in der Reihenfolge, in der die Sonne sie durchheilt, beginnend mit Frühlingsanfang:

Aries (Ari, Widder), Taurus (Tau, Stier), Gemini (Gem, Zwillinge), Cancer (Cac, Krebs), Leo (Leo, Löwe), Virgo (Vir, Jungfrau), Libra (Lib, Waage), Scorpius (Sco, Skorpion), Sagittarius (Sgr, Schütze), Capricornus (Cap, Steinbock), Aquarius (Aqr, Wassermann), Pisces (Psc, Fische).

b) Die nördlichen Sternbilder sind: Andromeda (And, Andromeda), Aquila (Aql, Adler), Auriga (Aur, Fuhrmann), Bootes (Boo, Boötes), Cassiopeia (Cas, Kassiopeia), Cepheus (Cep, Kepheus), Corona Borealis (CrB, Nördliche Krone), Cygnus (Cyg, Schwan), Delphinus (Del, Delphin), Draco (Dra, Drache), Equuleus (Equ, Füllen), Hercules (Her, Herakles), Lyra (Lyr, Leier), Ophiuchus (Oph, Schlangenträger), Pegasus (Peg, Pegasus, geflügeltes Pferd), Perseus (Per, Perseus), Sagitta (Sge, Pfeil), Serpens (Ser, Schlange), Triangulum (Tri, Dreieck), Ursa Major (UMA, großer Bär bzw. große Bärin, oder großer Wagen, Pflug oder Kochlöffel; im Arabischen ein von drei trauernden Frauen begleiteter Sarg usw.), Ursa Minor (UMi, kleiner Bär bzw. kleine Bärin, oder kleiner Wagen).

c) Die südlichen Sternbilder sind: Ara (Ara, Altar), Argo Navis (das Schiff Argo der Argonauten), Canis Major (CMa, Großer Hund), Canis Minor (CMi, Kleiner Hund), Centaurus (Cen, Zentaur), Cetus (Cet, Walfisch), Corona Australis (CrA, Südliche Krone), Corvus (Crv, Rabe), Crater (Crt, Becher), Eridanus (Eri, Fluss Eridanus), Hydra (Hya, Wasserschlange), Lepus (Lep, Hase), Lupus (Lup, Wolf), Orion (Ori, Orion), Piscis Austrinus (PsA, Südlicher Fisch).

<sup>118</sup> Die Unterschiede zwischen Aratus und Ptolemäus sind folgende: Hercules nennt er „Engonasis“ (der Knieende); Lupus nennt er „Therion“ (die Bestie); Canis Minor hat er nicht (er nennt an seiner Stelle aber den Stern Prokyon; die Corona Australis hat er nicht; dafür aber ein Bild „Hydor“ (Wasser), welches das Wasser zwischen Wassermann und Südlichem Fisch sein soll. Das Tierkreisbild Libra hat er nicht, spricht statt dessen von den „Klauen“ der Schlange.

<sup>119</sup> „Mul“ ist die sumerische Bezeichnung für „Stern“, „Planet“ und „Sternbild“, und wird als Determinativ (stummes Zusatz- oder Deutzeichen, das der Kennzeichnung einer Begriffsklasse dient, in Umschrift hochgestellt oder durch einen Punkt vom folgenden Wort getrennt) verwendet. „Apin“ bedeutet „Pflug“: Die Tafel Mul.Apin ist nach den Anfangswort (also „Sternbild Pflug“) benannt, womit das heutige Bild Triangulum plus Gamma Andromedae (Endstern der Andromeda-Kette) gemeint ist. Insgesamt werden 33 Mul des Nordens (in einem Bereich des Himmels, der „Pfad des Gottes Enlil“ heißt, Enlil = Herr des Windes, des Worts und Befehls, oberster Gott, später El), 23 äquatoriale Mul (auf dem „Pfad des Anu“, des höchsten Himmelsgottes An = Himmel, oben, Urvater der meisten Götter) und 15 südliche Mul (auf dem „Pfad des Ea“, des Weisheits-, Magier- und Süßwassergottes Ea = Enki) aufgeführt. In der Mitte des Pfades des Anu war ein Steifen zwischen +17 und -17 Grad, mit dem Himmelsäquator in der Mitte; da die Ekliptik zwischen +23 und -23 Grad verläuft, blieben die Wandelsterne nicht beständig im Pfad des Anu, sondern betreten regelmäßig für gewisse Zeit auch den Pfad des Enlil und des Ea. Als „Pfad des Mondes“ wird die Ekliptik beschrieben durch die 18 Sternbilder, darunter offenbar die uns bekannten Tierkreissternbilder. Im Einzelnen folgen aufeinander:

1. Mul.Mul.Zappu „Sternhaufen“ (Siebengestirn bzw. Plejaden), 2. MULGU<sub>4</sub>.AN.NA *alû/is lê* „Buckelstier / Stier des Himmels“ (Taurus),

3. MULSIPA.ZI.AN.NA *šitaddaru/šidallu* „wahrer Hirt des Anu = des Himmels“ (Orion), 4. MULŠU.GI *šību* „der Alte“ (Perseus),

5. MULZUGI/MULGĀM *gamlu* „Krummsäbel / Krummstab“ (Auriga), 6. MULMAŠ.TAB.BA.(GAL.GAL) *māšu/tū’amū rabūtu* „große Zwillinge“ (Gemini),

7. MULAL.LUL *alluttu* „Krebs“ (Cancer), 8. MULUR.GU.LA/MULUR.MAḤ *urgulû/nēšu* „Löwe“ (Leo),

9. MULAB.SĪN *absinnu/šer’u* „Saat-Furche“, der Getreide-Göttin Shala zugeordnet; darüber der Palmwedel der Geburts-Göttin Erua / Sarpanitu (Virgo),

10. MULZI.BA.AN.NA/MULGIŠ.ÉRIN *zibānītu* „Waage“ (Libra),

11. MULGĪR.TAB *zuqaqīpu* „Skorpion“ (Scorpius), 12. MULPA.BĪL.SAG *pabilsag* „der Gott Pabilsag / Aufseher“ = Jagdgott Ninurta (Sagittarius),

13. MULSUḤUR.MĀŠ.(KU) *suḥurmāšu* „Ziegen-Fisch“ (Capricornus), 14. MULGU.LA *šinundu/ku-ur-ku/rammanu* „der Große“ = der Wassergott Ea (Aquarius),

15. MULKUN.MEŠ/MULZIB.ME *zibbātu/zibbāt sinūnūtu* „Schwängeföhrt 1603 von *Johann Bayer* in seinem Sternatlas *Uranometria*ze“ (Pisces), 16. MULŠĪM.MAḤ *šinūnūtu* „große Schwalbe“ (SW Pisces und Epsilon Pegasi),

17. MULA.NU.NI.TUM/MULLU.LIM *anūnītu/lulīmu* „Göttin Anunitu/Hirsch“ (NO Pisces und Andromeda), 18. MUL(LÚ).ḤUD.(GĀ) *agru* „Landarbeiter“ (Aries).

Dass die Plejaden zuerst kommen, spricht dafür, dass die Überlieferung auf die Zeit um 2300 v. Chr. zurückgeht, als der Frühlingspunkt in der Nähe der Plejaden lag.

<sup>120</sup> In der Bibel heißt der Orion „Kessil“ (כֶּסֶל, wörtlich „der Tor“, das Wort kann aber auch von Kisla, Kessel (כֶּסֶל, „Hoffnung“) abgeleitet werden. Job 9,9 („Er macht den Bär und den Orion“); Job 38,31 („Kasst du Orions Gürtel losbinden?“), and Amos 5,8 („Er machte die Plejaden und den Orion“).

<sup>121</sup> Plancius führte die Sternbilder Monoceros (Mon, Einhorn) sowie Camelopardis (Cam, Giraffe) auf dem Himmelsglobus von 1612 ein; außerdem Columba (Col, Taube) auf der *Terrarum Tabula* von 1592. Schließlich zeichnete er auf seinem Himmelsglobus von 1589 das Kreuz des Südens (Crux, Cru) ein, allerdings an falscher Stelle, beim Fluss Eridanus; er korrigiert dies auf seinem Himmelsglobus von 1598. Die Kreuz des Südens war bereits im antiken Griechenland bekannt, wurde aber als Teil des Sternbildes des Zentrauren angesehen; es rückte dann wegen der Verschiebung der Erdoberfläche weiter nach Süden und wurde in Europa unsichtbar; 1501 war es von Amerigo Vespucci neu gesehen und als Orientierungshilfe genutzt, weil es auf den Himmelssüdpol zeigt.

Himmelsglobus das schon seit der Antike mehrfach genannten Sternbild *Haar der Berenike* (Coma Berenices, Com) auf, ebenso wie das Sternbild *Antinous*, das sich nicht durchsetzte;<sup>122</sup> beide erschienen auch auf dem Vopelius gedrucktem Globus von 1536. Tycho Brahe († 1601) verhalf dem Sternbild Haar der Berenike zu allgemeiner Anerkennung, indem er es in seinem Sternenkatalog von 1602 (*Astronomiae Instauratae Progymnasmata*, posthum von Johannes Kepler herausgegeben) eintrug. Johann Bayer († 1625) fügte in seinem Atlas *Uranometria* (Augsburg, 1603) zwölf weitere Sternbilder des Südhimmels hinzu,<sup>123</sup> und Johannes Hevelius († 1687) führte weitere sieben weitere Sternbilder ein, die posthum 1690 in seinem Sternatlas *Firmamentum Sobiescianum sive Uranographia* erschienen.<sup>124</sup> Nicolas-Louis de Lacaille († 1762) schließlich erweiterte in seiner *Planisphère des Étoiles Australes* (datiert 1752, veröffentlicht 1756) den Südhimmel um vierzehn neue Sternbilder,<sup>125</sup> und teilte das antike Sternbild „Schiff Argo“ ein in die drei Sternbilder Achterdeck (Puppis, Pup), Schiffskiel (Carina, Car), und Segel (Vela, Vel).

**Bayer-Notation** (eingeführt 1603 von Johann Bayer in seinem Sternatlas *Uranometria*): Griechischer Buchstabe, gefolgt vom Genitiv der lateinischen Bezeichnung des Sternbildes, zu dem der Stern gehört. In der Regel (aber nicht immer) erhält der uns am hellsten erscheinende Stern eines Sternbildes erhält den ersten Buchstaben  $\alpha$  des griechischen Alphabets, der zweithellste den zweiten Buchstaben  $\beta$  usw., dann  $\gamma$  usw., gefolgt vom Genitiv des Sternbildes, z.B. ist  $\alpha$  Centauri (Alpha Centauri) der hellste Stern im Sternbild des Zentauren. Reichen die griechischen Buchstaben nicht aus, folgen lateinische Kleinbuchstaben, dann lateinische Großbuchstaben, wobei die Bayer-Bezeichnungen nicht über Q hinausgingen. Die weiteren Buchstaben wurden später zur Bezeichnung veränderlicher Sterne benutze (siehe unten).<sup>126</sup>

**Flamsteed-Notation:** Diese wurde eingeführt in der *Historia coelestis Britannica* des britischen Astronomen John Flamsteed († 1719), die 1712 von Edmond Halley und Isaac Newton ohne Zustimmung Flamsteeds veröffentlicht wurde (1725 erschien eine von Halley ergänzte weitere Ausgabe). Sie wird teilweise parallel zu den Bayer-Bezeichnungen verwendet, vor allem aber für Sterne, die keine Bayer-Bezeichnung haben. Sie besteht aus einer Zahl (der Flamsteed-Nummer), gefolgt vom Genitiv des lateinischen Namens des Sternbildes, zu dem der Stern gehört. Die Nummern ordnete Flamsteed nach steigendem himmlischen Längengrad (Rektaszension), heute ist diese Reihenfolge wegen Veränderung der Rektaszensionen stellenweise durchbrochen. Da Flamsteed seine Himmelsbeobachtungen nur von Großbritannien aus vornahm, enthält sein Katalog nur die dort sichtbaren Sterne, jedoch keine des südlichen Himmels. Wie bei den Bayer-Bezeichnungen gibt es aufgrund der offiziellen Neueinteilung der Sternbildgrenzen durch die IAU eine Reihe von Sternen, deren Flamsteed-Bezeichnungen anderen als den heute üblichen Sternbildern zugeordnet werden müsste.

#### Notation veränderlicher Sterne:

- (1) Sterne mit einer Bayer-Bezeichnung bekommen keinen neuen Namen.
- (2) Andernfalls bekommt der Stern den großen Buchstaben R (wie „rot“: die häufigsten Fixsterne sind rote Zwerge, oder auch, weil zum Zeitpunkt der Entdeckung der ersten Veränderlichen die höchste Bayerzahl Q war), der nächste im selben Sternbild gefundene variable Stern bekommt den Buchstaben S usw. bis Z.
- (3) Man führt die Liste fort mit RR, ..., RZ, dann SS, ..., SZ, dann TT, ..., TZ usw. bis ZZ, dann folgt AA, ..., AZ, BB, ... BZ, CC, ..., CZ, usw. bis QZ, wobei der Buchstabe J in beiden Positionen (der ersten und zweiten) übersprungen wird.
- (4) Nach den 334 Kombinationen mit Buchstaben bezeichnet man weitere Veränderliche im selben Sternbild mit V335, V336, usw.

**Eigennamen:** Besonders helle Sterne (z.B. Sirius) oder sonst interessante Sterne (z.B. Polarstern) haben einen oder mehrere *Eigennamen*, manche sind *nach ihren Entdeckern* benannt (z.B. Barnhards Pfeilstern). Sirius und Arktur werden schon im 8. Jh. v. Chr. von Homer und Hesiod erwähnt. Fünf Eigennamen sind in Aratus' Phainomena (um 265 v. Chr.) genannt: außer Sirius und Arktur Prokyon, Stachys (Kornähre, heute: Spica) and Protrugater (Herold der Traubenlese, heute: Vindemiatrix). Viele weitere Eigennamen hat der persische Astronom *Abd ar-Rahman as-Sufi* († 986) in seinem arabischen Hauptwerk *Buch der Fixsterne* (um 964) weitergegeben. Neueren Ursprungs ist etwa Cor Caroli („Karls Herz“), der hellste Stern in Canes Venatici, der 1660 durch Sir Charles

<sup>122</sup> Antinoos (Antinous, † 130) war ein Günstling und vermutlich Geliebter des römischen Kaisers Hadrian, der vor den Augen des Kaisers im Nil ertrank, ob durch Suizid oder Unfall, ist ungeklärt. Nach seinem Tod wurde er zum Gott erklärt und verehrt, schon unter Hadrian wurde ein neuer Stern in der Gegend des Sternbildes Adler (Komet oder Nova) nach ihm bekannt. Dort wurde auch sein Sternbild angesiedelt. Es wurde jedoch von der IAU dem darüber stehenden Bild Adler einverleibt.

<sup>123</sup> In Bayers *Uranometria* erschienen die neuen Sternbilder Apus (Aps, Paradiesvogel), Chamaeleon (Cha, Chamäleon), Dorado (Dor, Schwertfisch), Grus (Gru, Kranich), Hydrus (Hyi, Kleine Wasserschlange), Indus (Ind, Indianer/Inder), Musca (Mus, Fliege; bei Bayer ursprünglich Apis, die Biene genannt; von de Lacaille umbenannt); Pavo (Pav, Pfau), Phoenix (Phe, Phönix), Triangulum Australe (TrA, Südliches Dreieck, schon um 1500 vom spanischen Navigator Mestre João erwähnt und von Petrus Plancius 1589 gezeichnet, aber verkehrt herum), Tucana (Tuc, Tukan), Volans (Vol, Fliegender Fisch). Diese Bilder waren von den beiden Niederländischen Seefahrern Pieter Dirkszoon Keyser („Petrus Theodorus“) und Frederick de Houtman zwischen 1595 und 1597 auf einer Seefahrt über Madagaskar nach Ostasien südlich des Äquators gesichtet und auf Sternkarten eingezeichnet worden – im Auftrag von Petrus Plancius, der sie zuerst 1597/98 auf einen Himmelsglobus setzte. Bayer übernahm sie dann in seinen Himmelsatlas von 1603.

<sup>124</sup> In Hevelius' *Uranographia* erscheinen die Sternbilder (anders als in früheren Atlanten wie in Bayers *Uranometria*) in „Außenansicht“, d.h. so, wie sie auf einem Himmelsglobus erscheinen (also nicht wie sie uns erscheinen, sondern demgegenüber seitenverkehrt). Die neuen Sternbilder waren Canes Venatici (CVn, Jagdhunde), Lacerta (Lac, Eidechse), Leo Minor (LMi, Kleiner Löwe), Lynx (Lyn, Luchs), Scutum (Sct, Schild, ursprünglich *Sobieskischer Schild*), Sextans (Sex, Sextant; dessen Sterne waren 1643 von Anton Maria Schyrleus de Rheita zum Sudarium Veroniceae, *Schweißstuch der Veronica*, zusammengefasst worden), Vulpecula (Vul, Fuchs).

<sup>125</sup> Lacaille führte ein die Sternbilder Antlia (Ant, Luftpumpe), Caelum (Cae, Grabstichel), Circinus (Cir, Zirkel), Fornax (For, Chemischer Ofen), Horologium (Hor, Pendeluhr), Mensa (Men, Tafelberg), Mikroskopium (Mic, Mikroskop), Norma (Nor, Winkelmaß), Octans (Oct, Oktant), Pictor (Pic, Maler), Pyxis (Pyx, Schiffskompass), Reticulum (Ret, Netz), Sculptor (Scl, Bildhauer), Telescopium (Tel, Teleskop).

<sup>126</sup> Weitere Details: Es wurde manchmal für verschiedene Sterne derselbe Buchstabe verwendet, wobei dann hochgestellten Nummern zur Unterscheidung angefügt wurden. Teilweise handelt es sich dabei um Doppelsterne, die meist aber nur optisch zusammenstehen. Daneben gibt es aber auch Ausnahmen wie die sich über 8° am Himmel erstreckende Sternenkette  $\pi^1$ ,  $\pi^2$ ,  $\pi^3$ ,  $\pi^4$ ,  $\pi^5$  und  $\pi^6$  Orionis, die den „Bogen“ des Orion bildet. Zwei Sterne tragen eine doppelte Bayer-Bezeichnung:  $\beta$  Tauri =  $\gamma$  Aurigae und  $\alpha$  Andromedae =  $\delta$  Pegasi. Außerdem gibt es aufgrund der offiziellen Neueinteilung der Sternbildgrenzen durch die IAU eine Reihe von Sternen, deren Bayer-Bezeichnungen sie anderen als den heute üblichen Sternbildern zuordnen würden.

Scarborough benannt wurde und sich auf den hingerichteten englischen König Karl I. bezieht. Die Internationale Astronomische Union (IAU) hat seit 2016 eine sog. Working Group on Star Names (WGSN) eingesetzt: ein Gremium, das für besonders hellen und berühmten Sterne Eigennamen international festlegen soll. Für zahlreiche Sterne hat dieses Gremium inzwischen offizielle Namen festgelegt, von denen viele traditionell, manche aber auch neu sind.

**Katalogbezeichnungen:** Die meisten Sterne werden indessen bezeichnet durch die Abkürzung des Katalogs, in denen sie enthalten sind, gefolgt von der *Katalognummer* (oder einer anderen kataloginternen Bezeichnung). So bezeichnet HD 185037 den Stern mit der Nummer 185037 im Henry-Draper-Katalog (HD), der zwischen 1918 und 1924 in neun Bänden erschien und 225.300 Sterne mit zur 9-ten Größenklasse enthält; benannt ist er zu Ehren des US-Astronomen Henry Draper, dessen Witwe das Werk finanzierte. 1949 wurde der Katalog um weitere 133.783 auf insgesamt 359.083 Sterne ergänzt. Der erweiterte Katalog hat die Abkürzung HDE (Henry-Draper-Extended). Weitere wichtige Kataloge sind BD (Bonner Durchmusterung; Bezeichnungsformat BD +7° 1055 bedeutet: der 1055ste Stern auf dem 7. nördlichen Breitengrad des Himmels), CD (Cordoba Durchmusterung), GJ oder Gliese-Jahreiß (Katalog der Nachbarsterne, umfasst Sterne bis 25 Parsec = 81,5 Lj), HIP (Katalog, der durch den Vermessungs-Satelliten Hipparchos erstellt wurde).

**Helligkeit (Größenklasse, Magnitude)**, siehe auch S. 5: Die *scheinbare Helligkeit* eines Sterns seit der Antike in Größenklassen angegeben; dies geht vielleicht schon auf die Babylonier und den griechischen Astronomen Hipparch (ca. 190–120 v. Chr.) zurück, in jedem Fall findet man die Größenklassen bei Ptolemäus (ca. 100–175 n. Chr.) in seinem um 145 n. Chr. geschriebenen Almagest. Bei dieser Einteilung werden die Sterne nach ihrer (mit bloßem Auge wahrgenommenen) Helligkeit in sechs Größenklassen (Magnituden) einteilt. Die hellsten Gestirne wurden der ersten Größe zugerechnet, die schwächsten der sechsten Größe. Später wurde die Skala nach beiden Seiten hin erweitert, um sowohl hellere Objekte als auch – nach Aufkommen des Teleskops – schwächere Objekte einordnen zu können. Die Helligkeitsskala wurde 1850 von Norman Pogson logarithmisch definiert, so dass ein Stern erster Größe genau 100-mal so hell ist wie ein Stern sechster Größe. Sterne der ersten Größe sind dann ca. 2,5 (genau: die fünfte Wurzel aus 100) mal heller als Sterne der zweiten Größe. Die Eichung der Skala erfolgte an sogenannten Standardsternen. Anfänglich wurde die Skala am Polarstern mit 2,1 mag ausgerichtet, bis sich herausstellte, dass dessen Helligkeit geringfügig variiert. Dann diente als Referenz traditionell der Stern Wega, dessen Helligkeit mit der Magnitude *null* festgesetzt wurde. Zur Kalibrierung moderner photometrischer Systeme dient heute eine Gruppe genau gemessener Referenzsterne nahe dem Himmelspol, die so genannte „Polsequenz“ (96 konstant leuchtende Sterne, die den Helligkeitsbereich von +2 mag bis +17 mag abdecken und sich in einem Abstand von bis zu 2° um den Polarstern (Polaris) befinden. Inzwischen stehen für die Eichung über die Polsequenz hinaus einige hundert über den ganzen Himmel verteilte Standardsterne verschiedener Farbbereiche zur Verfügung.

Sehr große irdische Teleskope reichen heute bis etwa zur 22. Größe, moderne Astrofotografie zur 25. Größe. Im Hubble Extreme Deep Field sind noch Galaxien mit einer Helligkeit von 31,5 mag erkennbar. Hellere Objekte als 0. Größe erhalten ein negatives Vorzeichen, z.B. die Venus –4,4 mag oder die Sonne –26 mag.

Die scheinbare Helligkeit eines Gestirns hängt vom jeweiligen Beobachtungsband (Filter) ab. Für wissenschaftliche Beobachtungen wurden eine Reihe unterschiedlicher Filtersysteme definiert. In der beobachtenden Astronomie wird die scheinbare Helligkeit oft für den visuellen Spektralbereich um 550 Nanometer angegeben; man spricht dann von visueller Helligkeit.

Die absolute Helligkeit ist die scheinbare Helligkeit eines Sterns, die sich ergeben würde, wenn er 10 Parsec (36,2 Lj) entfernt wäre.

**Farbindex (FI)** ist eine von Karl Schwarzschild eingeführte Maßzahl für die Farbe von Sternen. Er ist die *Differenz* zwischen der scheinbaren Helligkeit eines Sternes im kurzwelligen Bereich (bläulich) und der Helligkeit im langwelligen Bereich (rötlich), so dass ein Stern umso rötlicher erscheint, je größer der Farbindex ist. An den jeweiligen Bezugswerten für den langwelligen und kurzwelligen Bereich unterscheiden sich die verschiedenen photometrischen Systeme. Am häufigsten angewendet wird heute das UBV-System (Dreifarbphotometrie) nach Harold L. Johnson und William Wilson Morgan. U steht für die Helligkeit im ultravioletten Licht mit der Schwerpunktwellenlänge von 365 nm, B für die Helligkeit bei 440 nm (Blau) und V für die Helligkeit bei 550 nm (Gelb). V steht dabei für *visuell*, da das menschliche Auge Sterne im gelblichen Bereich am stärksten wahrnimmt. Im UBV-System werden anhand dieser Bezugsgrößen drei Farbindizes gebildet: U-B, U-V und B-V, wobei **B-V** für visuelle Beobachter die größere Bedeutung hat.

Ein (B-V)-Farbindex von ±0,00 entspricht der Farbe bläulichweiß (Stern Rigel), +0,09 ist weiß (Stern Deneb), unsere Sonne hat einen Farbindex von +0,65 (gelblich), Beispiele für Extrema sind 119 Tauri mit Farbindex von +2,06 (tiefrot) und Spica mit –0,23 (blau).

Die **Metallizität** eines Sterns ist ein Maß für die Häufigkeit der schweren („metallischen“) Elemente in ihm. Als „Metalle“ werden dabei meist alle Elemente außer Wasserstoff und Helium bezeichnet, oder auch erst die Elemente ab Kohlenstoff.<sup>127</sup> Wasserstoff und Helium und geringe Mengen Lithium wurden im Urknall gebildet (sind also primordial), die schweren Elemente wurden erst durch Kernreaktionen in Sternen gebildet (die Nukleosynthese), deswegen hängt die Metallizität eng mit der Entstehungszeit eines Sternes zusammen: Sterne mit niedriger Metallizität (Population II) sind in einem früheren Entwicklungsstadium des Universums entstanden, als erst wenige „Metalle“ vorhanden waren; sie herrschen in den kugelförmigen weiteren Umgebungen der Galaxien (der „Halos“) vor; Sterne mit hoher Metallizität (Population I) sind zu einem späteren Zeitpunkt aus der mit schweren Elementen angereicherten „Asche“ früherer Sternengenerationen entstanden und halten sich vorwiegend in den Spiralarmen der Galaxien auf. Der Massenanteil schwerer Elemente an der Sonnenmasse liegt bei ca. 1,8 %. Dort beträgt das Verhältnis zwischen Eisen- und Wasserstoff-Atomen ( $N_{\text{Fe}} / N_{\text{H}}$ )  $\odot = 1/31.000$ . Als Metallizität [Fe/H] wird oft das auf die Sonne normierte, logarithmierte Verhältnis der Stärke der Absorptionslinien von Eisen und Wasserstoff angegeben. Es ist also demnach Metallizität =  $\lg(N_{\text{Fe}} / N_{\text{H}}) - \lg(N_{\text{Fe}} / N_{\text{H}})_{\odot}$ . Nach dieser

<sup>127</sup> Die Elemente Lithium, Beryllium und Bor, zwischen Helium und Kohlenstoff, kommen in sehr geringen Konzentrationen in Sternatmosphären vor. Sie können nicht aus Sternen stammen, denn sehr viel schnellere Syntheseschritte zerstören sie gleich wieder. Sie stammen einem geringen Teil des primordialen (beim Urknall entstandenen) Lithium 7 – aus der Spallation schwererer Elemente durch kosmische Strahlung im interstellaren Gas.

Definition ist die Metallizität der Sonne = 0.

**Spektralklassen:** „Offenbar benutzen Astronomen furchtbar gern komische Merksätze“  
 „O be a fine girl, kiss, me; love to you; right now sweetheart“

	Farbe	Oberflächentemperatur in Kelvin	Beispiel
normale Sterne	<b>O:</b> blau,	> 30.000	Nair al Saif <sup>128</sup>
	<b>B:</b> bläulich	10.000–30.000	Rigel <sup>129</sup>
	<b>A:</b> blaustichig	7500–10.000	Kaitain <sup>130</sup>
	<b>F:</b> weiß (minimal blaustichig)	6000–7500	Sadaltager <sup>131</sup>
	<b>G:</b> gelblich	5000–6000	unsere Sonne
	<b>K:</b> gelb-orange	3500–5000	Ran (oder: Sadira) <sup>132</sup>
	<b>M:</b> orange-rot	2000–3500	Wolf 359 <sup>133</sup>
-----			
Braune Zwerge	<b>L:</b> tiefrot-infrarot	1300–2000	Luhman 16A <sup>134</sup>
	<b>T:</b> tiefrot-infrarot	700–1300	Luhmann 16B <sup>135</sup>
	<b>Y:</b> infrarot	< 700	WISE 0855-0714 <sup>136</sup>
O,B,A: „frühe“ Klassen; F,G: „mittlere Klassen, „K,M,L,T,Y“: „späte Klassen“			
-----			
Kohlenstoffsterne (besondere rote Riesen)	<b>R:</b> orange-rot	3500–5400	
	<b>N:</b> orange-rot	2000–3500	
	<b>S:</b> rot	1900–3500	

Die Klassen R und N werden auch als **C**-Sterne zusammengefasst (wobei C6 = N0), also als CR und CN bezeichnet.

Weitere Klassen: **W** (Wolf-Rayet-Stern: keine Wasserstofflinien!), **WN** Stickstofflinien, **WC** Kohlenstofflinien, **WO** Sauerstofflinien;  
 Für weiße Zwerge gibt es die **D**-Klasse (D für „degenerate“): **DA, DB, DO, DQ, DZ**; außerdem **DC, DX**  
 Schließlich: **P** für Planetarischer Nebel, und **Q** für Nova.

Klasse	Farbe	Temperatur
O	Blau	> 30.000 K
B	Bläulich	10.000 - 30.000 K
A	Leicht blaustichig	7.500 - 10.000 K
F	Weiß-minimal blaustichig	6.000 - 7.500 K
G	Leicht gelblich	5.000 - 6.000 K
K	Gelb-Orange	3.500 - 5.000 K
M	Orange-Rot	2000 - 3.500 K
L	Tiefrot / Infrarot	1300 - 2000 K
T	Tiefrot / Infrarot	700 - 1300 K
Y	Infrarot	< 700 K

**Suffixe zur Spektralklassenangabe:**

a) eine Nummer, z.B. sind G1, G2, ... G9 Unterklassen der Spektralklasse G;

<sup>128</sup> Arab. „der Helle im Schwert“: Stern im Gürtel des Orion beim Orionnebel, 2,77 mag; auch  $\iota$  Orionis (Iota Orionis).

<sup>129</sup> Aran. „Fuß“, auch  $\beta$  Orionis (Beta Orionis), linker Fußstern (und hellster Stern) des Orion, 0,12 mag.

<sup>130</sup> Arab. „Knoten der zwei Bänder“, auch Okda (arab. „Knoten“) oder Alrescha (arab. „das Seil“);  $\alpha$  Piscium (Apha Piscium), der Hauptstern in den Fischen, 3,82 mag.

<sup>131</sup> Arab. „Glück des Händlers“, auch Altager („der Händler“) oder  $\zeta$  Aquarii (Zeta Aquarii), zentraler Stern im Wassertrog des Wassermanns, 3,65 mag.

<sup>132</sup> die Bayer-Bezeichnung des Sterns ist  $\epsilon$  Eridani (Epsilon Eridani), es ist der siebte Stern im Eridanus-Fluss links von Rigel im Orion, 3,72 mag. *Ran* ist der 2015 nach einem öffentlichen Wettbewerb von der IAU ausgewählte Name (es ist der Name der Meereshöttin in der aldnordischen Mythologie, der Frau des Meereshottens und Riesen Ägir, halb Mensch halb Fisch: Herrin über das Totenreich auf dem Meeresgrund, verkörpert sie die dunkle und gefährliche Seite des Meeres; der Riese Ägir dagegen die freundliche Seite; der Planet um Epsilon Eridani wurde von der IAU im Rahmen desselben Wettbewerbs *Aegir* genannt; „Ran“ bedeutet ursprünglich „Raub“ und „Aegir“ bedeutet „Meer“); arabische Siedler an der Ostküste Afrikas nannten den Stern im 14. Jh. *Sadira* (arab. Strauß, der zum Wasser zurückkehrt);

<sup>133</sup> Schwacher teleskopischer Stern im Sternbild Löwe (siehe unten).

<sup>134</sup> Siehe unten. Ein anderes Beispiel ist 2MASS J03521086+0210479, Entfernung vermutlich deutlich unter 100 Lj; Helligkeit 13,078 mag im J-Band (1,11 – 1,4  $\mu$ m) bzw. 18 mag im nahen Infrarot ab 685 nm bis zur Grenzwellenlänge üblicher CCD-Sensoren bei ca. 1,1  $\mu$ m. Im sichtbaren Licht liegt die scheinbare Helligkeit unterhalb der Nachweisgrenze der Luminanzaufnahme von ca. 20,2 mag.

<sup>135</sup> Siehe unten. Ein anderes Beispiel ist IPMS J013656.57+093347.3, Entfernung 20,9 Lj, Helligkeit 19,80 mag (bezogen auf IR 685 - 1100 nm).

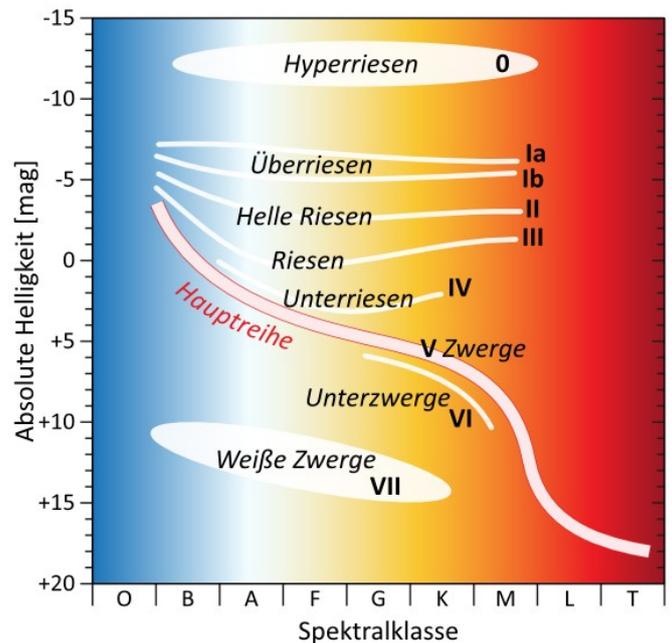
<sup>136</sup> Siehe unten.

- b) mit Dezimalpunkt angehängte weitere Nummer, z.B. sind „G1.1, G2.2,...“ Unterklassen von G1.
- c) Die Leuchtkraftklasse (siehe unten)
- d) Weitere Zusätze: v für variabel, e für Emissionslinien, n (nebulous) für diffuse Linien usw.

**Leuchtkraftklassen:** Innerhalb der einzelnen Spektralklassen unterscheiden sich die Spektren verschiedener Sterne oft dadurch, dass die Absorptionslinien unterschiedlich stark und scharf sind. Je schmaler und schärfer eine Linie ist, desto leuchtkräftiger ist der Stern. Das lässt sich dadurch begründen, dass Sterne, die dieselbe Temperatur besitzen, aber heller sind, also eine höhere Leuchtkraft besitzen, auch einen größeren Radius besitzen müssen. Wenn die Masse innerhalb der Klasse ungefähr gleich bleibt, muss die Dichte in den äußeren Schalen kleiner sein. Die verminderte Gravitationskraft führt dann zu einer schärferen Linie.<sup>137</sup> Entsprechend wurden die *Leuchtkraftklassen* 0 bis VII eingeführt:

- Leuchtkraftklasse 0 – Hyperriesen
- Leuchtkraftklasse I – Überriesen (Untereinteilung: a-0, Ia, Iab, Ib)
- Leuchtkraftklasse II – Helle Riesen
- Leuchtkraftklasse III – (normale) Riesen
- Leuchtkraftklasse IV – Unterriesen
- Leuchtkraftklasse V – Zwerge (Hauptreihensterne wie die Sonne)
- Leuchtkraftklasse VI (auch: sD) – Unterzwerge
- Leuchtkraftklasse VII (auch: D) – Weiße Zwerge

Nebenstehendes Diagramm heißt Hertzsprung-Russell Diagramm, abgekürzt H-R Diagramm or HRD.



**Leben eines Sterns:** Es gibt im Weltraum große Regionen mit niedriger Teilchendichte (ca. 1 Atom pro Kubikzentimeter) und kleinere Gebiete höherer Teilchendichte: Diese werden *interstellare Wolken* oder *Nebel* genannt, und dort können neue Sterne entstehen. Die meisten Atome in Nebeln sind H-Atome (Wasserstoffatome); dabei unterscheidet man relativ kalte H-I-Gebiete (mit neutralem atomarem Wasserstoff H und/oder molekularem Wasserstoff H<sub>2</sub> als Hauptbestandteil) und relativ heiße H-II-Gebiete (mit ionisiertem atomarem Wasserstoff H<sup>+</sup> als Hauptbestandteil).

Die meisten Sterne entstehen in H-I-Gebieten, und und zwar die allermeisten in Molekülwolken mit molekularem Wasserstoff H<sub>2</sub> als Hauptbestandteil. Sterne (und Sternsysteme) können dadurch entstehen, sich eine Molekülwolke durch Turbulenzen unter dem Einfluss der Gravitation verdichtet (wobei die Turbulenzen z.B. durch die Schockwelle einer Sternexplosion ausgelöst werden können). Dies führt im Inneren der Molekülwolke stellenweise zu einer Aufheizung, so dass dort an einer oder mehreren Stellen ein Vorläufer eines Sterns (ein sog. *Protostern*) entsteht, der von den weiter entfernten Teilen der Wolke, die jetzt die Form einer relativ flachen Scheiben annimmt, umkreist wird; in dieser Staubscheibe können sich dann die zugehörigen Planeten bilden, welche die Protosonne umkreisen. Erreicht der Protostern in seinem Kern eine Temperatur von mindestens etwa 5–10 Millionen Grad, so beginnt dort eine Kernfusion, das sog. *Wasserstoffbrennen* (Wasserstoffkerne fusionieren unter Abgabe von Energie zu Helium). Von diesem Moment an spricht man nicht mehr von einem Protostern, sondern von einem regulären „Stern“. Das Wasserstoffbrennen im Kern sorgt dafür, dass der jetzt starke innerem Gas- und Strahlungsdruck der anziehenden Gravitationswirkung so entgegenwirkt, dass die Effekte im Gleichgewicht sind und sich neutralisieren, d.h. es entsteht ein stabiler Zustand, bei dem der Stern im HRD auf der sog. Hauptlinie liegt und weder seine Masse noch seine Größe ändern; dieser Zustand füllt etwa 90 Prozent des Lebenszyklus eines Sterns aus und er hält so lang an, wie das Wasserstoffbrennen im Kern anhält, d.h. zwischen 2 Millionen und 20 Milliarden Jahren, je nach der Masse des Sterns: Bei den massereicheren Sterne geht das Wasserstoffbrennen schneller zu Ende als bei masseärmeren; bei unserer Sonne, die 4,5 Milliarden Jahre alt ist, wird erst nach weiteren 5,5 Milliarden Jahren der Wasserstoff im Kern in Helium verwandelt sein.

Gegen Ende des Sternenlebens hört das Wasserstoffbrennen im Kern auf, wenn der gesamte Kern in Helium umgewandelt ist. Der „Kern“ ist definiert als eine kugelförmige Zone, in der zuvor das Wasserstoffbrennen stattfand, diese ist bei größeren Sternen umgeben ist von einer Schale, welche die Strahlungszone genannt wird, in welcher die im Kern erzeugte Wärme vorwiegend durch Wärmestrahlung in Richtung Oberfläche transportiert wird, und diese ist wieder umgeben von einer bis zur Oberfläche reichenden äußeren Schale, welche die Konvektionszone genannt wird und in welcher die Wärme durch Konvektion (Materietransport) nach außen geleitet wird. Nach dem Ende des Wasserstoffbrennens im Kern verlagert sich bei größeren Sternen das Wasserstoffbrennen in eine äußere Schale (d.h. es beginnt das sog. „Schalenbrennen“), was zu einer Aufblähung und manchmal Abtrennung der äußeren Schale führt (so dass eine Wolke den Stern umgibt; solche von einer ringförmigen Wolke umgebene Sterne nennt man Planetarische Nebel); im Kern aber fällt zugleich der Strahlungsdruck als Kompensation der Gravitation weg: Die Gravitation gewinnt die Oberhand und somit kollabiert der Kern des Sterns, d.h. er schrumpft in sich zusammen. *Hat nun der Stern weniger als 0,3 Sonnenmassen*, wird er zu einem sog. **Weißen Zwerg**: d.h. zu einem kompakten Stern, in dem die ganze Masse auf die Größe eines Planeten (mit einem Radius

<sup>137</sup> Beim Abstrahlungs- oder Absorptionsvorgang ist die sog. Druckverbreiterung relevant. Wenn während der Lichtabstrahlung das Molekül durch einen Stoß mit einem anderen Teilchen wechselwirkt, dann kommt es zu einer kurzen Frequenzänderung, was den Effekt hat, dass die Phase der Schwingung nach dem Stoß nicht mehr zu der Phase davor passt. Bei hohem Druck gibt es viele Stöße. Dies führt zur Frequenzunschärfe, also zu breiteren Linien.

von Tausend Kilometern bis hin zu zwei Erdmassen) zusammengepresst ist, und der im weißen Licht strahlt. Dies tut er solange, bis er auskühlt und vollständig erlischt: Dann wird er zum sog. **Schwarzen Zwerg**. Der nächstgelegene Weiße Zwerg ist *Sirius B*: ein lichtschwacher Begleiter des 8,5 Lichtjahre entfernten, hellsten Fixsterns Sirius. Einen Schwarzen Zwerg hat man noch nicht entdeckt, wahrscheinlich ist das Universum auch noch zu jung, damit sie existieren können, denn bis die Temperatur auf 5 Kelvin abgefallen ist, vergehen schätzungsweise in etwa eine *Billion* Jahre, aber das All ist erst 14,8 *Milliarden* Jahre alt.

Nebenbemerkung: Von den Weißen und Schwarzen Zwergen sind noch andere „Zwerg“-Arten zu unterscheiden: **Braune Zwerge** entstehen aus leichten Protosternen mit einer Masse zwischen 13 und 75 Jupitermassen (also unter 0,08 Sonnenmassen); bei der Kontraktion eines so leichten Protosterns wird die erforderliche Temperatur für die Wasserstoff-Fusion nicht erreicht, aber es werden stattdessen andere Kernprozesse – das sog. Deuteriumbrennen und das Lithiumbrennen – in Gang gesetzt, bei denen unter Beteiligung von Deuterium bzw. Lithium ebenfalls Helium entsteht; Braune Zwerge nehmen eine Stellung zwischen Planeten und eigentlichen Sternen ein; ihre Oberfläche ist recht kalt und ihre Farbe Magenta bis Orange und Rot. Die uns nächstgelegenen Braunen Zwerge sind die beiden Komponenten des *Luhman 16*-Doppelstern-Systems in 6,5 Lichtjahren Entfernung im Sternbild Vela. **Rote Zwerge** sind die häufigsten Sterne im All (vermutlich etwa Drei Viertel): Kleine, rot leuchtende Hauptreihen-Sterne mit Spektralklasse M, mit einer Masse von ca. 0,07 bis 0,5 Sonnenmassen und relativ niedriger Oberflächentemperatur von ca. 2500 bis 2900 Grad Kelvin; der uns nächstgelegene Rote Zwerg ist unser Nachbarstern *Proxima Centauri* in 4,24 Lichtjahren Entfernung. **Orange Zwerge** sind Hauptreihensterne die im orangen Licht leuchten, Spektralklasse K und Leuchtkraftklasse V haben, mit einer Masse zwischen mit 0,5 bis 0,8 Sonnenmassen und einer Oberflächentemperatur zwischen 3900 und 5300 Grad Kelvin. **Gelbe Zwerge** sind Hauptreihen-Sterne wie unsere Sonne, die im weißen bis leicht gelben Licht leuchten, Spektralklasse G und Leuchtkraftklasse V haben, zwischen 0,84 und 1,15 Sonnenmassen und eine Oberflächentemperatur von 5300 bis 6000 K haben. **Blaue Zwerge** sind theoretisch konzipierte Sterne, die sich aus Roten Zwergen am Ende ihres Sternenlebens vorübergehend transformieren sollen, wenn ihr Wasserstoffbrennen aufhört: Sie werden dann zunächst sehr heiß (und damit Blau mit Spektralklasse O, während die Leuchtkraftklasse V ist), bevor sie abkühlen und zum Weißen Zwerg werden.

Bei Sternen mit mehr als 0,3 Sonnenmassen (zu denen also auch unsere Sonne gehört) führt die Zusammenschumpfung des Kerns nach dem Ende des Wasserstoffbrennens im Kern zu einer Erhitzung auf etwa 100 Millionen Grad, was ausreicht, um in dem nun aus Helium bestehenden Kern eine neue Kernfusion zu entfachen: das sog. **Heliumbrennen**: Helium wird unter Abgabe von Energie zu Kohlenstoff fusioniert (während in der äußeren Schale das Wasserstoffbrennen noch im Gang ist). Jetzt ist der Strahlungsdruck auch im Kern wieder da, und kompensiert die Gravitation, so dass wieder ein Gleichgewicht entsteht, wobei der Stern jetzt aber größere Leuchtkraft hat und die Schale in der das Wasserstoffbrennen sich fortsetzt, sich weiter aufgebläht; dort wird der Stern immer dünner, somit auch kühler, d.h. sein Spektrum verschiebt sich ins Rote: Er verlässt die Hauptlinie im HRD nach oben und wird zum **Roten Riesen**. Die äußere Schale wird abgestoßen und so kann ein „Planetarischer Nebel“ entstehen. Das Heliumbrennen im Kern dauert nur einige Millionen Jahre an. Ist auch das Heliumbrennen zu Ende, und *hat der Stern weniger als 2,3 Sonnenmassen*, so kollabiert er zu einem **Weißen Zwerg**, der schließlich zu einem Schwarzen Zwerg wird.

Bei Sternen mit mehr als 2,3 Sonnenmassen führt der Kollaps nach dem Ende des Heliumbrennens zu einer Erhöhung der Temperatur im Kern auf über 600 Milliarden Grad – und dann kommt es im Kern zum **Kohlenstoffbrennen**, während das Heliumbrennen in einer an den Kern anschließenden Schale des Stern weiterläuft, und das Wasserstoffbrennen in der äußersten Schale. Das Kohlenstoffbrennen dauert nur einige tausend Jahre und seine Endprodukte sind Sauerstoff, Magnesium und Neon. Dann kollabiert der Stern wieder und wird zum **Weißen Zwerg** und ultimativ Schwarzen Zwerg, es sei denn, er hat mindestens 8 Sonnenmassen und erreicht beim Kollaps Temperaturen von mindestens 1,2 Milliarden Grad und eine Dichte von 4 Milliarden Kilogramm pro Kubikmeter, wodurch das **Neonbrennen** beginnt, das im Sauerstoff-Magnesium-Neonkern nur ca. 10 Jahre anhält. Dadurch wird das Neon im Kern abgebaut, und zugleich wird der Kern angereichert mit neuem Sauerstoff (der durch Kernspaltung aus dem Neon entsteht) sowie mit neuem Magnesium (das durch Fusion von Neon mit Helium entsteht, wobei das Helium seinerseits durch Kernspaltung aus Neon entsteht). Nun entstehen nun nach dem Ende des Kohlenstoffbrennens durch den anschließenden Kollaps Temperaturen von mindestens 1,5 Milliarden Grad und eine Dichte von 10 Milliarden Kilogramm pro Kubikmeter, es beginnt das **Sauerstoffbrennen**, das im Sauerstoff-Magnesium-Kern nur wenige Jahre anhält. Dabei bildet sich wieder etwas Neon, aber auch Schwefel (S), Phosphor (P), Silicium (Si) und Magnesium (Mg). Am Ende besteht der Kern vorwiegend aus Silicium und Schwefel. Alsdann setzt durch den anschließenden Kollaps, falls dabei eine Temperatur von 2,7 bis 3,5 Milliarden Grad und eine Dichte von 30 Milliarden Kilogramm pro Kubikmeter erreicht wird, bei einem Stern von mindestens 8 bis 11 Sonnenmassen noch das **Siliciumbrennen** ein, das nur wenige Wochen dauert, im Extremfall nur einen einzigen Tag. Als Endprodukte entsteht durch komplizierte Kernreaktionen unter anderem Eisen. Bei Eisen ist aber das Ende der Fusionsprozesse erreicht, da bei Fusionen zu noch schwereren Elementen keine Energie mehr frei wird. Nach dem Ende des Siliciumbrennens im Kern hat der Stern einen inaktiven Eisenkern, darüber kommen noch Schalen, in die sich die eins im Kern abgelaufenen Fusionsprozesse verlagert haben: Von innen nach außen kann es noch eine Schale geben, in der das Siliciumbrennen weitergeht, dann eine Schale, in der das Neonbrennen weitergeht, dann eine Schale, in der das Kohlenstoffbrennen weitergeht, eine weitere, in der das Heliumbrennen weitergeht, und schließlich die äußere Schale, in der noch das Wasserstoffbrennen stattfindet. Während nun der Kern kollabiert, blähen sich die Schalen immer weiter auf und erhöhen die Leuchtkraft um etwa das 1.000- bis 10.000-fache: Der Stern wird zum **Roten Überriesen**.

### Drei Endstadien der Sternen:

1. Leichte und mittelschwere Sterne (zu denen auch unsere Sonne gehört) enden, wie schon gesagt (bei mittelschweren Sternen nach einem kurzen Stadium als Roter Riese) letztlich als **Weiße Zwerge**. Die meisten von ihnen haben einen Sauerstoffkern, der von einer Kohlenstoffschicht überlagert ist, und als äußere Schale eine dünne Heliumschicht. Dies erklärt sich aus dem beschriebenen Fusionen, die im Kern und Schalen nacheinander ablaufen. Einige Weißen Zwerge haben darüber noch eine Wasserstoffschicht. Theoretisch könnte es auch aus reinem Helium- oder Wasserstoff bestehende Weiße Zwerge geben, aber diese gehen aus sehr massearmen

Zwergsternen hervor, die so langlebig sind, dass sie im jetzigen 14,8 Milliarden Jahren alten Universum noch nicht an ihr Lebensende gekommen sind. Die letzte Leuchtphase als weißer Zwerg tritt ein, nachdem im Stern jegliche Kernfusion aufgehört hat. Die Restmasse beim weißen Zwerg liegt unterhalb von 1,44 Sonnenmassen (schwerere Sterne nicht als weiße Zwerge; dazu siehe unten). Der Weiße Zwerg wird gewöhnlich in einem sehr lange andauernden Prozess immer leuchtschwächer, bis er in einen Schwarzen Zwerg übergeht. Möglich ist aber auch ein anderes Ende des Weißen Zwergs: Nämlich seine völlige Zerstörung in einer sog. *Supernova-Explosion*. Als eine *Nova* (von lat. novus = neu) bezeichnete man ursprünglich das plötzliche Auftauchen eines vorher nicht sichtbaren sternähnlichen Objektes am Sternhimmel, das nach einiger Zeit wieder verschwindet und nicht von besonders auffälliger Helligkeit (also *keine* Supernova). Physikalisch ist es kein neuer Stern, sondern ein Stern, dessen Leuchtkraft (und somit Helligkeit) aufgrund von inneren Prozessen plötzlich stark zunimmt und dann wieder abnimmt.

Als eine *Supernova* bezeichnet man einen neu am Himmel erscheinenden Stern von besonders auffälliger Helligkeit, die physikalisch durch eine den Stern zerstörende Explosion hervorgebracht wird. Man unterscheidet zwei Arten: *Supernovae vom Typ 1* und *Supernovae vom Typ 2*, die sich durch verschiedene Mechanismen unterscheiden. Das mögliche Ende eines weißen Zwergs ist eine Supernova-Explosion vom Typ 1. Dieses Ende ist nur möglich, wenn der Weiße Zwerg Teil eines Sternsystems mit mindestens zwei Sternen ist, wobei Materie von einem anderen Stern des Systems auf den Weißen Zwerg überströmt. Dadurch entzündet sich der Kohlenstoff des Weißen Zwerges, wodurch gewaltige Energiemengen frei werden, die den Stern in einer thermonuklearen Explosion (die auf der Erde als Aufleuchten einer Supernova wahrgenommen wird) völlig zerstören.

2. Schwerere Sterne (mit mehr als 3 Sonnenmassen) können als *Neutronensterne* enden: Nach dem Kollaps des Eisenkerns (der innerhalb einer Millisekunde stattfindet) endet dieser in einem noch stärker komprimierten Zustand wie beim weißen Zwerg, in welcher die Atome zerfallen und nur noch Neutronen übrig bleiben, und in welcher der Stern nur noch einige Kilometer (etwa 10 bis 20 km) groß ist. Die Restmasse des Sterns wird in einer gewaltigen Explosion abgestoßen, die man eine *Supernova vom Typ 2* nennt: Ein sehr helles kurzzeitiges Aufleuchten des Sterns, bei dem gewaltige Energiemengen beteiligt sind, durch welche die schweren Elemente entstehen – diejenigen Elemente, die schwerer als Eisen sind, bis hin zum Uran – und die sich dann in neuen Molekülwolken sammeln, aus denen neue Sterne entstehen können. Der nach der Supernova-Explosion verbliebene Kern des Sterns ist der eigentliche Neutronenstern. Er hat eine Masse zwischen 1,44 und 2,5 Sonnenmassen. Er dreht sich sehr schnell und ist stark magnetisiert, weshalb er mit einer Frequenz im Bereich von einer Sekunde und darunter Pulse elektromagnetischer Wellen ausstoßen kann (wenn die Rotationsachse von der Symmetrieachse des Magnetfeldes abweicht); daher heißen Neutronensterne auch *Pulsare*. Die ausgesendeten elektromagnetischen Wellen können Radiowellen, aber auch sichtbares Licht oder Röntgenstrahlen sein; der Schwerpunkt der Emissionen liegt im Röntgenbereich. Optisch erscheint ein Neutronenstern im weißen oder weiß-blauen Licht. Der uns nächstgelegene Neutronenstern ist *RX J1856* im Sternbild südliche Krone hat eine Rotationsperiode von 7 Sekunden und ist ca. 500 Lichtjahre von uns entfernt.

3. Superschwere Sterne, in denen die Restmasse 2,5 bis 3 Sonnenmassen überschreitet, enden als *Schwarze Löcher*, hier ist der nach der *Supernova-Explosion vom Typ 2* übrigbleibende Reststern noch dichter komprimiert als es beim Neutronenstern der Fall ist. Theoretisch ist die Materie hier sogar in einem unendlich dicht komprimierten Zustand, in dem die gesamte Sternmaterie auf einen Punkt zusammenschrumpft ist. Hier entsteht eine Singularität, in dem mehrere physikalische Größen den Wert unendlich oder null annehmen – und die Gravitation so stark ist, dass es um das Schwarze Loch herum einen Bereich gibt (dessen Grenze der sog. *Ereignishorizont* ist), den Licht und Materie nicht verlassen können: Den Ereignishorizont kann man nur in eine Richtung – von außen nach innen – überschreiten, während vom Bereich innerhalb des Ereignishorizonts nichts mehr nach außen gelangt. Da selbst das Licht innerhalb des Ereignishorizonts festgehalten wird, ist der Stern von außen gesehen „schwarz“. Das Schwarze Loch hat aber nach wie vor drei physikalische Eigenschaften und Begleiterscheinungen, durch die es entdeckt werden kann: eine Masse, ein Drehmoment und eine Ladung, und um schwarze Löcher herum bilden sich vor allem sog. Akkretionsscheiben (leuchtende Gase und Materieteilchen, die das Schwarze Loch schnell umkreisen und es sichtbar umgeben). Die Restmasse des Sterns (nach der Supernova-Explosion) liegt hier über 2,5 Sonnenmassen. Schwarze Löcher können wachsen, indem weitere Sterne in sie hineinfallen. Extrem massive schwarze Löcher stehen auch im Mittelpunkt der sog. Galaxien (der großen Sternensinseln, in denen zahlreiche Sterne vereinigt sind, die den Mittelpunkt umkreisen). In unserer Galaxis hat das zentrale Schwarze Loch 4,3 Millionen Sonnenmassen; das Schwarze Loch in der Galaxie M 87 (in ca. 54 Millionen Lichtjahren Entfernung) hat sogar 7 Milliarden Sonnenmassen.



Schwarzes Loch in M87

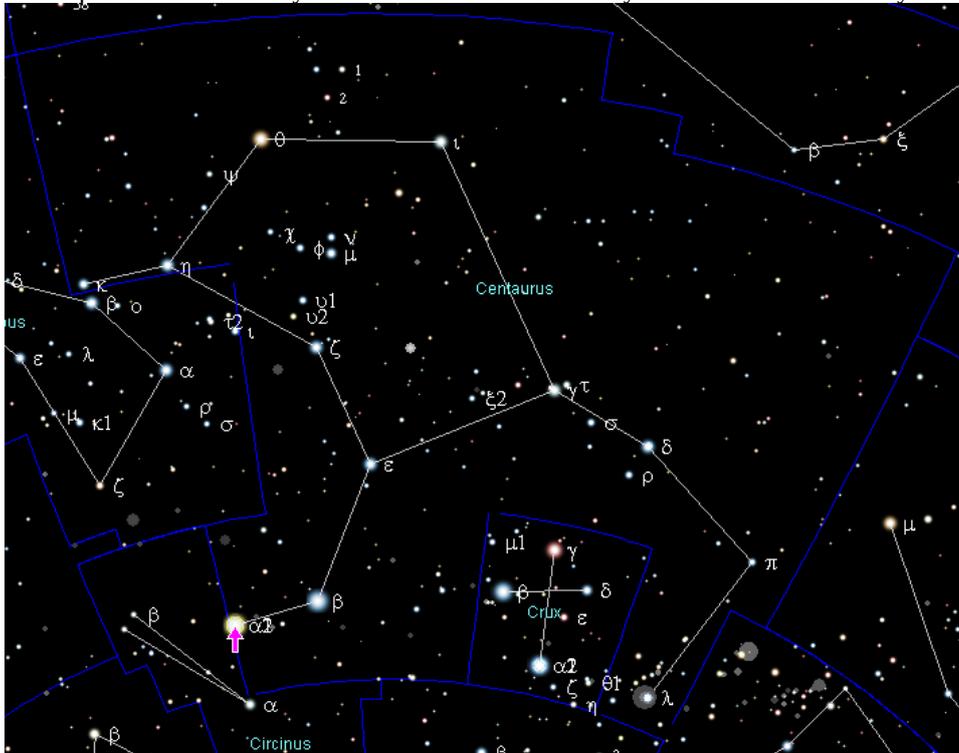
### Extrasolare Planeten (kurz Exoplaneten):

Mit dem Stand vom 18. August 2021 waren **4893 Exoplaneten** in 3578 Sternensystemen bekannt. Zur Angabe der Erdähnlichkeit wurde 2011 von Mitarbeitern des *Planetary Habitability Laboratory* (PHL) der Universität von Puerto Rico der Erdähnlichkeitsindex (Earth Similarity Index, ESI) vorgeschlagen (Schulze-Makuch *et al.* im *Journal Astrobiology*). Der Wert liegt zwischen 0 und 1, wobei die Erde den Wert 1 hat. Der ESI wird aus dem Radius, der Dichte, der kosmischen Geschwindigkeit und der Temperatur an der Oberfläche errechnet. Innerhalb unseres Sonnensystems ist der Mars mit 0,7 nach der Erde das Objekt mit dem zweitgrößten ESI. Der ESI ist allerdings nicht als alleiniges Maß für die Bewohnbarkeit geeignet.

## Das Alpha Centauri Sternsystem

Name: *Alpha Centauri* ( $\alpha$  Centauri), Eigennamen: *Rigil Kent* oder *Rigil Kentaurus* (arab. Rijl al Qanturis = Fuß des Zentauren), *Bungula* (von Beta und „Ungula“ = lat. Hufe, also Vorderhufe), *Toliman* (arab. al-Zulman, „Sträuße“).  $\alpha$  Centauri ist ein Dreifachstern-System mit drei Sonnen; offiziell ist nach den Bestimmungen der IAU „*Rigil Kentaurus*“ Eigenname für die hellste Komponente *Alpha Centauri A*, „*Toliman*“ Eigenname der zweithellsten Komponente Alpha Centauri B ist, und „*Proxima Centauri*“ Eigenname für die lichtschwache und von den beiden anderen Komponenten weit entfernte, aber uns am nächsten stehende dritte Komponente.

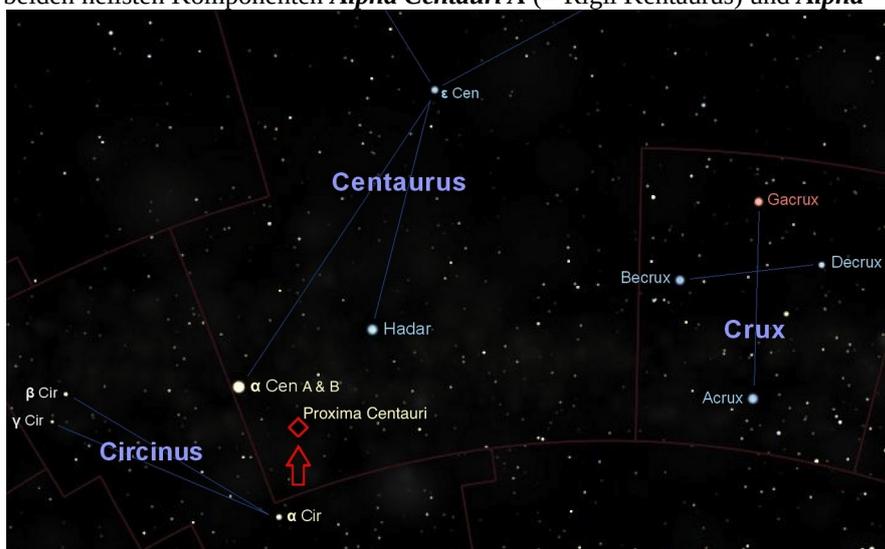
Das Alpha Centauri-Sternsystem ist das das dem Sonnensystem benachbarte Sternsystem.



Position und Erscheinung am Himmel: Alpha Centauri (ca. 4 Lj entfernt) ist der hellste Stern im Sternbild Centaurus am Südhimmel (sichtbar südlich des 27. Breitengrades) und markiert den vorderen Fuß des (über das „Kreuz des Südens“ springenden) Centauren. Blickt man richtig herum auf den Centauren, liegt rechts neben Alpha Centauri in 4,4° Entfernung der zweithellste Stern des Zentauren, der zweite Stern des Vorderfußes, Beta Centauri ( $\beta$  Centauri, Agena, Hadar, 350 Lj entfernter Dreifachstern). Der von Alpha in Richtung Beta Centauri laufende Strahl trifft auf das Kreuz des Südens; dessen drei hellsten Sterne bilden zusammen mit Alpha und Beta Centauri einige Ansammlung von fünf Sternen erster Größe innerhalb des von einer Handspanne abgedeckten Winkels (einmalig am Sternhimmel). Der Strahl Alpha/Beta Centauri dient zur Auffindung des Kreuzes des Südens, um es vom „faschen“ Kreuz zu unterscheiden (gebildet aus  $\kappa$  Valae,  $\delta$  Valae,  $\iota$  Carinae=Turais und  $\epsilon$  Carinae).

Alpha und Beta Centauri heißen daher auch die *Zeigersterne* (the pointers).

Es handelt sich um ein Dreifach-Sternsystem; die beiden hellsten Komponenten *Alpha Centauri A* (= Rigil Kentaurus) und *Alpha Centauri B* (= Toliman) stehen so eng zusammen, dass sie mit bloßem Augen nicht zu trennen sind; die dritte Komponente *Proxima Centauri* (= *Alpha Centauri C*, auch V645 Centauri genannt) steht zu AB in einer Distanz von 2,2° bzw. 0,24 Lj (= 15.000 AU = 400-fache Distanz Sonne-Neptun = 5% der Distanz der Sonne von Alpha Centauri AB).<sup>138</sup> Am 16. Oktober 2012 berichtete das Team Xavier Dumusque et al. von der Genfer Sternwarte von der Entdeckung eines erdgroßen Planeten um Alpha Centauri B (durch radiale periodische Bewegung des Sterns spektroskopisch erschlossen), was aber umstritten ist; dieser hypothetische Planet *Alpha Centauri Bb* soll 1,3-fache Erdmasse haben, nur 0,04 AU vom Stern entfernt sein (was Oberflächentemperaturen von 1200° zur Folge hätte) und ihn in 3,2 Tagen umkreisen. Am 25. März 2015 vertraten Demory et al. eine Deutung eines 2013 beobachteten Transits durch das Hubble



<sup>138</sup> Bei einer Untersuchung durch den *Faint Object Spectrograph* des Hubble Weltraumteleskops 1998 schien es, als ob ein Begleiter, der Proxima in einem Abstand von 0,5 AE umkreist, aufgespürt worden sei.[30] Bei der nachfolgenden Suche mit der *Wide Field Planetary Camera 2* fand man keine Hinweise mehr.

Weltraumteleskop, wonach ein erdgroßer Planet **Alpha Centauri Bc** mit Umlaufzeit < 20,4 Tagen existiert. 2021 wurde ein möglicher Exoplanet um Alpha Centauri A entdeckt, dem man **Candidate 1** (kurz C1) nennt, sein Orbit soll 1,1 AU sein mit einer Umlaufzeit von ca. einem Jahr; seine Masse soll zwischen derjenigen des Neptun und der Hälfte der Masse des Saturn liegen. Bestätigt sind alle diese Planeten aber noch nicht.



Proxima Centauri ist nur mit Teleskop sichtbar (nebenstehend ein Bild des Weltraumteleskops Hubble) und befindet sich unterhalb des vorderen Centauren-Fußes. Entfernung von Alpha Centauri A/B: 4,365 Lj (276.047 AU, 41.3 Billionen Kilometer), - Parallaxe 0,747" = 747 mas, („Milli-Arcseconds, Milli-Bogensekunden“); Entfernung von Proxima Centauri: 4,242 Lj (268.332 AU, 40,1 Bill. km), Parallaxe 0,769" = 769 mas. Proxima ist der nächste Nachbarstern der Sonne.

Am 24. August 2016 wurde die Entdeckung eines relativ „erdähnlichen“ Planeten um Proxima Centauri gegeben, der mit der Radialgeschwindigkeitsmethode entdeckt wurde und vorläufig **Proxima Centauri b** (kurz Proxima b) heißt. Der Planet soll 1,1 mal so groß sein wie die Erde, und eine Masse von mindestens 1,27 Erdmassen (mit 90% Wahrscheinlichkeit unter 3 Erdmassen) haben. Seine Entfernung vom Stern beträgt 0,05 AE, so dass er wahrscheinlich eine gebundene Rotation durchführt (also immer dieselbe Planetenseite von der Sonne beschienen ist), wobei die Umlaufdauer nur 11 Tage beträgt. Es wird mit einer Gleichgewichtstemperatur von -39° C gerechnet. Die Existenz von flüssigem Wasser ist nicht ausgeschlossen. Vom Planeten aus gesehen ist hat die Sonne Proxima einen dreimal so großen Durchmesser als unsere Sonne von der Erde aus, nämlich 1,5°, und erscheint weiß (nicht rötlich). Flares von Proxima könnten eine mögliche Atmosphäre und Leben leicht zerstören. Der ESI (Earth Similarity Index) des Planeten wird mit 0,87 angegeben und ist damit sehr hoch.

Im April 2019 wurde erstmals vom italienischen Astrophysiker Mario Damasso und seinen Kollegen ein weiterer Planet gemeldet, man hatte geringfügige Bewegungen von Proxima Centauri in den Radialgeschwindigkeitsdaten des HARPS-Instruments der Europäischen Südsternwarte (ESO) bemerkt, was auf einen möglichen zweiten Planeten hinwies, der Proxima Centauri umkreist. Der Planet wurde von Fritz Benedict und Barbara E. McArthur in ihrem Forschungsbericht 2019 (ohne Peer-Review) vorgestellt und in die Extrasolar Planets Encyclopaedia (EPE) eingetragen. Er wird **Proxima Centauri c** (kurz Proxima c) genannt. Es handelt sich um eine Supererde oder einen Mini-Neptun, denn der Planet ist etwa 7-mal so massereich wie die Erde. Er umkreist seinen Heimatstern alle 5,28 Jahre (ca. 1.928 Tage) in einer Entfernung von etwa 1,49 Astronomischen Einheiten (AE). Aufgrund der großen Entfernung von Proxima Centauri und der niedrigen Gleichgewichtstemperatur von etwa 39 K ( $\approx -234$  °C) ist der Exoplanet wahrscheinlich nicht bewohnbar. Die Entdeckung wurde im Januar 2020 veröffentlicht. Im Juni 2020 wurde die Existenz des Planeten mit Hilfe von Hubble-Astrometriedaten von ca. 1995 bestätigt, wodurch seine Bahnneigung und wahre Masse bestimmt werden konnten. Ebenfalls im Juni 2020 wurde ein möglicher direkter Bildnachweis (englisch *Direct imaging*) von Proxima c veröffentlicht. Da die entdeckte Quelle zu hell für einen Planeten der Masse und des Alters von Proxima c ist, deutet dies möglicherweise darauf hin, dass der Planet ein Ringsystem mit einem Radius von etwa 5 Jupiterradien haben könnte.

Anfang 2022 wurde gemeldet, dass möglicherweise ein dritter Planet entdeckt wurde: **Proxima Centauri d** (kurz Proxima d) soll nur 25 Prozent Erdmasse haben und eine Rotationsperiode von nur vier Tagen. Der neue Planetenkandidat wurde mittels des VLT (Very Large Telescope) in Chile und durch Gebrauch eines ESPRESSO genannten Geräts entweckt, welches winzige Bewegungen registriert, die auf Gravitationskräfte zwischen den um Proxima Centauri kreisenden Planeten zurückgehen. Der neue Exoplanet scheint der bisher leichteste zu sein, der mit der Methode der radialen Geschwindigkeit gefunden wurde.

Eine Reise zum Alpha-Centauri-System würde mit konventionellen Raumsonden 32.000 Jahre, mit Atomantrieb (*Projekt Longshot*) 100 Jahre. Nach der Breakthrough-Initiative des russischen Milliardärs Jurij Milner will man aber gemäß dem Konzept von Stephen Hawking und Mark Zuckerberg das Alpha Centauri-System mit einer Flotte von unbemannten Miniraumschiffen in nur 20 Jahren erreichen; die Raumschiffe sollen nur wenige Gramm schwer und mit riesigen Sonnensegeln ausgestattet sein, die von der Erde aus mit Lasern angeschossen werden, welche die Schiffe binnen 10 Minuten auf 1/5 oder 1/4 der Lichtgeschwindigkeit beschleunigen.

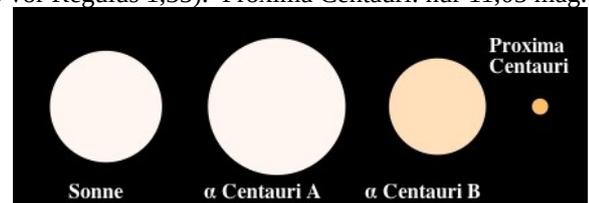
Scheinbare Helligkeit des Gesamtsystems Alpha Centauri A+B: -0,27 mag = dritthellster Stern des Himmels (nach Sirius -1,46 und Canopus -0,72, vor Arktur -0,04 und Wega +0,03, ... Beta Centauri ist der zehnthellste Stern mit +0,60). Alpha Centauri A allein: -0,01 (vierthellster Einzelstern); Alpha Centauri B: +1,33 (21. Rang, nach Deneb 1,25 vor Regulus 1,35). Proxima Centauri: nur 11,05 mag.

Absolute Helligkeit für Alpha Centauri A bzw. B bzw. für Proxima Centauri: +4,40 bzw. +5,74 bzw. +15,49 (vgl. Sonne: 4,83); für das Gesamtsystem Alpha Centauri AB ist die absolute Helligkeit +4,13.

Für A bzw. B bzw. Proxima Centauri gilt weiter: Leuchtkraft: 1,522 ☉ bzw. 0,503 ☉ bzw. 0,0017 ☉ (im sichtbaren Bereich nur mit 0,000056 ☉)

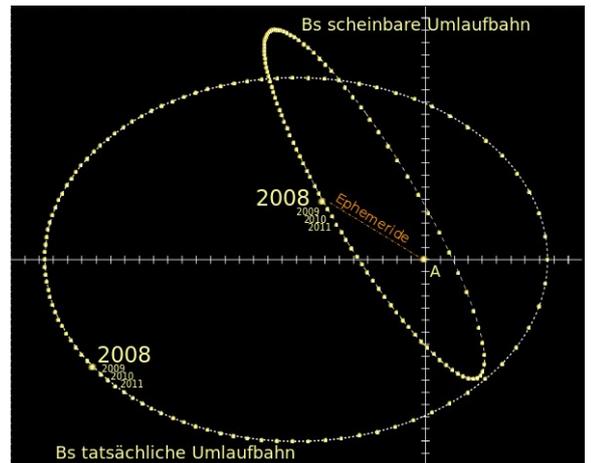
Größe: 1,224 ☉ bzw. 0,863 ☉ bzw. 0,141 ☉ (200.000 km = 1,5-fach Jupiter)

Masse: 1,105 ☉ bzw. 0,934 ☉ bzw. 0,123 ☉ (40 mal so dicht wie die Sonne)



Größenvergleich

Alpha Centauri A und B: Wir schauen auf den Rand der Ellipse, die daher sehr exzentrisch erscheint, es aber nicht ist. Die Exzentrizität der Bahnellipse beträgt 0,519; Die Umlaufzeit, in der beide Sterne um ihren gemeinsamen Schwerpunkt reisen, ist 79,9 Jahre. Die Große Halbachse beträgt 23,9 AU (Strecke von der Sonne bis zu einem Punkt zwischen Uranus- und Neptunbahn), die Sterne kommen sich bis auf 11,5 AU nahe (geringfügig größer als die Strecke Sonne-Saturn), entfernen sich dann aber wieder bis zu 36,3 AU (geringfügig kleiner als die Strecke Sonne-Pluto). Die Bahn hat von der Erde aus eine Inklination von  $79,23^\circ$ . Generell schwankt der Abstand von A und B am Himmel zwischen 1,7 und 22 Bogensekunden. Das letzte Periastron war 1955, die größte Distanz (Apoastron) war im Mai 1995 erreicht, das nächste Periastron wird im Mai 2035 sein. Der Winkelabstand war im Februar 1976 maximal, 1990 betrug der Abstand der beiden Sonnen  $19,7''$ , 1995  $17,3''$ , 2000  $14,1''$ , 2005  $10,5''$ , 2010  $6,8''$ , und im Februar 2016 folgt ein vorläufiges Minimum bei  $4''$ ; danach nimmt der Abstand wieder zu.



Alpha Centauri (linker heller Stern) und Beta Centauri (rechter heller Stern) sowie Proxima Centauri (kleiner roter eingekreister Punkt). Wenn Proxima Centauri an das System gebunden ist, beträgt die Umlaufzeit um Komponenten A & B ca. 100.000 bis 500.000 Jahre. Habitable Zone: 1,2 bis 1,3 AU bei Alpha Centauri A (entspricht der Mitte zwischen Mars- und Erdabstand von der Sonne; ein dortiger Planet hätte eine Umlaufzeit von ca. 1,34 Jahren) bzw. 0,73 bis 0,74 AU bei Alpha Centauri B (Venusabstand; ein dortiger Planet hätte eine Umlaufzeit von ca. 0,6 Jahren) bzw. 0,023 bis 0,054 AU bei Proxima Centauri (< Merkurabstand; ein dortiger Planet würde Proxima in 3,6 bis 13 Tagen umrunden und eine gebundene Rotation haben; die bei Proxima Centauri immer wieder vorkommenden Flareausbrüche würden die Leuchtkraft des Sterns innerhalb von wenigen Minuten verdoppeln oder verdreifachen, mit vermutlich verheerenden Folgen für Atmosphäre und Lebewesen auf diesem Planeten.

Spektralklasse (Farbe): G2V (genau wie unsere Sonne!: gelb, etwas größerer Zwillingstern der Sonne) bzw. K1V (oranger Stern) bzw. M6 Ve (roter Zwerg, Veränderlicher der UV-Ceti-Klasse, Flaresterne, Fackelsterne, eruptiv Veränderliche).

Alter: Alpha Centauri A und B entstanden vor ca. 6,5 Milliarden Jahren (knapp 1 Mrd. Jahre älter als die Sonne); Proxima ist mit 4,85 Jahren etwas jünger als die Sonne. Lebensaltererwartung von Sonne und Alpha Centauri AB etwa 10 Milliarden Jahre; Proxima Centauri dagegen wird sich erst nach 4 Billionen Jahren (300-faches Alter des Universums) in einen weißen Zwerg verwandelt.

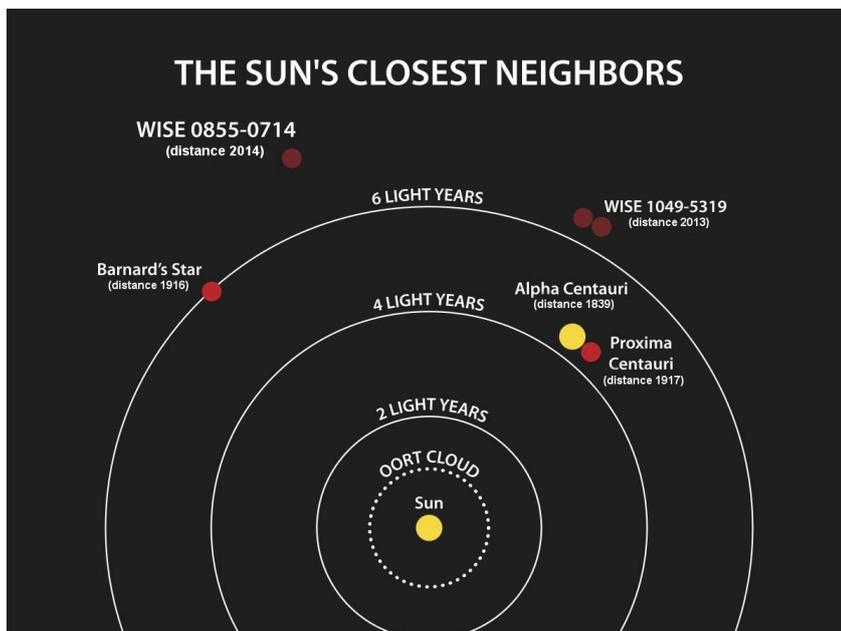
Bewegung: Alpha Centauri AB nähert sich mit 22 km/s der Sonne, Proxima Centauri nähert sich ihr mit 16 km/s. Jährlich legt das System 3,85" am Himmel zurück, in 500 Jahren also 0,5° (eine Vollmondbreite), und zwar in Richtung Beta Centauri, und wird in 4000 Jahren mit Beta Centauri einen scheinbaren Doppelstern bilden (Beta ist aber 520 Lj entfernt; seine Eigenbewegung beträgt nur etwa 1 % jener von Alpha). In etwa 29.700 n. Chr. wird das Alpha-Centauri-System mit einer Entfernung von 3,26 Lj (1 Parsec) zum Sonnensystem (bei -0,86 mag) seine größte Annäherung erreichen und danach den Abstand wieder vergrößern. Es wird an der Grenze der Sternbilder Wasserschlange (Hydra) und Segel des Schiffs stehen und bis -1,28 mag hell werden (nur wenig schwächer als Sirius); in ferner Zukunft wird das Gestirn langsam unter den Sternen der Milchstraße verschwinden. Dann wird der ehemals so dominante Stern im unscheinbaren Sternbild Teleskop unter die freizügige Sichtbarkeit fallen. Diese ungewöhnliche Position wird durch Alpha Centauris eigene unabhängige galaktische Bewegung erklärt, die eine hohe Neigung in Bezug auf die Milchstraße aufweist. Beim Umlauf um die Galaxis variiert die Entfernung von Zentrum zwischen 8,313 bis 9,546 kpc (27.100 bis 31.120 Lj), Extentrität ist 0,069.

Geschichte: 1. Schon im antiken Griechenland war Alpha Centauri bekannt, wegen der Präzession der Erdachse aber heute nur noch in südlicheren Breiten zu sehen.

2. Jean Richaud SJ entdeckte im Dezember 1689 in Pondicherry (Indien), während er einen in der Nähe vorbeiziehenden Kometen mit einem Teleskop beobachtete, dass Alpha Centauri ein Doppelstern ist.

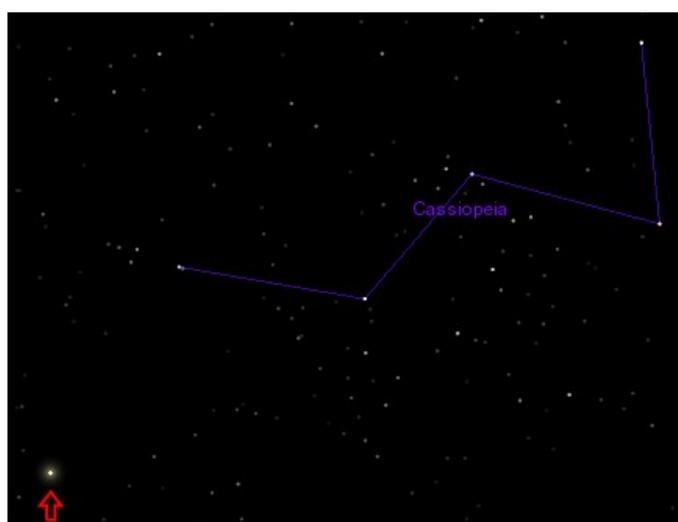
3. Thomas James Henderson berechnete die Distanz zu Alpha Centauri. Er maß zwischen April 1832 und Mai 1833 eine jährliche trigonometrische Parallaxe von  $1,16 \pm 0,11$  Bogensekunden, was bedeutet dass Alpha Centauri etwas weniger als 1 Parsec (3,26 Lj) entfernt wäre (der Wert war 33,7 % zu niedrig). Henderson publizierte die Ergebnisse aber noch nicht, weil er sie wegen der hohen Werte ernsthaft anzweifelte. Erst 1839, nachdem Friedrich Wilhelm Bessel 1838 seine Messungen der Parallaxe von 61 Cygni veröffentlichte, publizierte auch er. Alpha Centauri ist daher offiziell der zweite Stern, dessen Abstand berechnet wurde.

4. Robert Innes entdeckte 1915 am Observatorium in Johannesburg Proxima Centauri; 1917 wurde die Parallaxe gemessen und entdeckt, dass Proxima Centauri der nächste Stern nach der Sonne ist; daraufhin schlug Innes den Namen „Proxima Centauri“ vor. Zum Zeitpunkt der Entdeckung war dieser Stern mit mag 11 der Lichtschwächste bekannte Stern, 1951 gab Harlow Shapley bekannt, dass es sich bei Proxima Centauri um einen Flarestern handelt, mit einer Aktivitätsperiode (Solarzyklus) von 442-Tagen; 88% der Oberfläche könne aktiv sein. Untersuchungen früherer photographischer Aufnahmen zeigten, dass die Helligkeit des Sterns in 8 % der Beobachtungen heller als gewöhnlich war. Dies machte ihn zum aktivsten Flarestern, der bis dahin entdeckt worden war.



Himmel von Alpha, Beta oder Proxima Centauri aus:

Stünde Proxima Centauri an der Stelle der Sonne, würde der Stern 1/50 der Sonnenfläche einnehmen und je nach Vollmondentfernung etwa 17- bis 27-mal heller als der Vollmond leuchten. Die Planeten wären unsichtbar, ausgenommen Venus, die mag 6 hätte. Der Vollmond wäre eine matte rote Scheibe mit -2 mag. Von Proxima aus hätte unsere Sonne 0,4 mag und stünde in der Cassiopeia, deren W zum  $\wedge\wedge$  würde. Sirius läge 2° nordöstlich von Beteigeuze und wäre 1,2 mag schwächer, Prokyon wäre im Fuß der Zwillinge (heller als Pollux), Wega und Atair wäre so verschoben, dass das Sommerdreieck gleichzeitig wird; sonst wäre der Himmel fast gleich. A bzw. B bzw. kombiniert AB Centauri hätte -6,5 bzw. -5,2 bzw. -6,8 mag, wobei A und B meist (aber kurzzeitig nicht) vom Auge trennbar sind. Von A&B Centauri hätte Proxima nur 4,5 mag. Ein Beobachter auf einem Planeten in der habitablen Zone um Alpha Centauri A bzw. B sieht den jeweils umkreisten Stern wie wir die Sonne, während die „Zweitsonne“ Alpha Centauri B bzw. A schwächer erscheint, nämlich 5,7 bis 8,6 mag „dunkler“ (-21 bis -18,2 mag) bzw. 4,6 bis 7,3 mag „dunkler“ (-22,1 bis -19,4 mag). In beiden Fällen hat man bei der Beobachtung den Eindruck, als ob die „Zweitsonne“ im Laufe eines Planetenjahres den Himmel umkreist. Einmal im Laufe eines „Jahres“ stege beide Sonnen eng beieinander; ein halbes Jahr später ist die „Zweitsonne“ als Mitternachtssonne zu sehen. Die zweite Sonne ist nicht hell genug, um das Klima oder die Photosynthese der Pflanzen noch zu beeinflussen, erhellt aber ein halbes Jahr lang den Nachthimmel so weit, dass er statt pechschwarz eher dunkelblau aussieht (wie bei einer irdischen Sonnenfinsternis). Man könnte problemlos herumwandern und sogar ohne zusätzliches Licht lesen, auch wenn zugleich helle Sterne sichtbar sind.



**Barnhards Pfeilstern** (1916 von dem Astronomen Edward Emerson Barnard entdeckt).<sup>139</sup>

Entfernung 5,98 Lj (Parallaxe 545,5 mas); zweitnächstes Sternsystem nach dem Alpha-Centauri-Dreifachsystem: nächster Stern des Nordhimmels.

Position: Sternbild Schlangenträger bei 66 Oph (rechts von der rechten Schulter des Schlangenträgers).

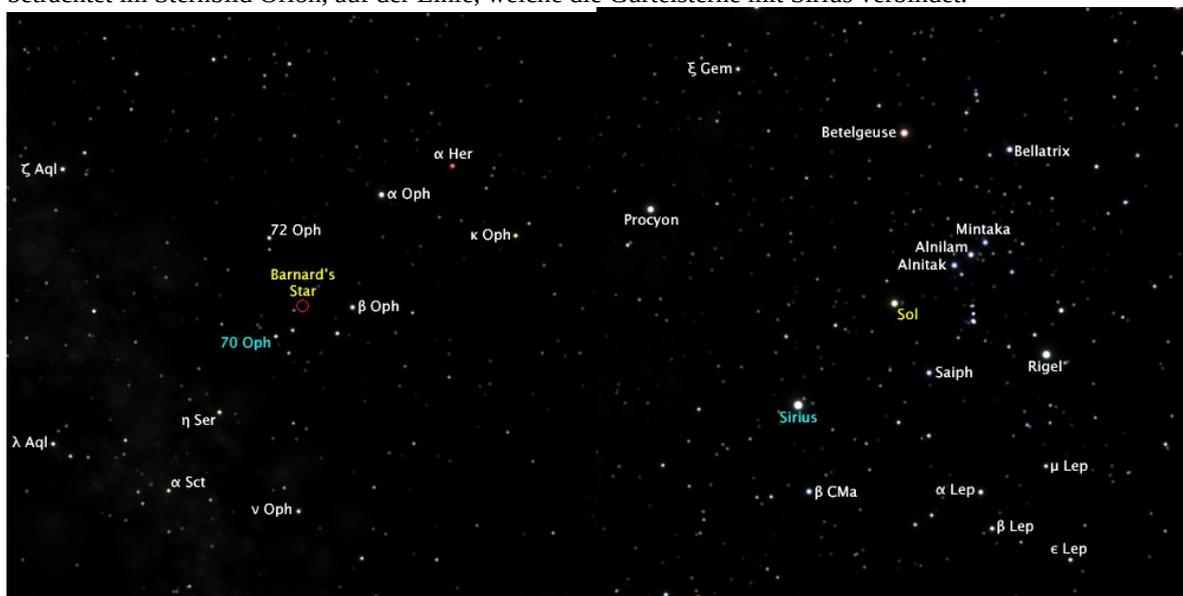
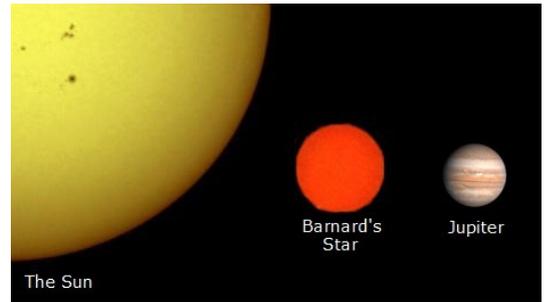
Radius: 0,2 ☉, 2 Jupiter

Masse: 14% ☉, 150 Jupitermassen

Helligkeit: scheinbar 9,54 mag (viel heller im Infraroten), absolut 13,3 mag; Leuchtkraft 0,0035 ☉; Spektralklasse M4 (roter Zwerg).

Schnellläufer mit schnellster scheinbarer Eigenbewegung: 10,34" pro Jahr (in der Lebenszeit eines Menschen ¼°, d.h. eine halbe Vollmondbreite) mit hoher Relativgeschwindigkeit zu unserer Sonne (auf uns zu mit 106,8 km/s 1967 und 110,8 km/s heute; und in nördlicher Richtung mit 90 km/s; resultierend von 139,7 km/s bzw. 142,7 km/s), die ihn in 11.800 Jahren 3,75 Lichtjahren an unsere Sonne heranführen wird, was seine scheinbare Helligkeit auf 8,56 mag erhöhen wird. 2003 wurde an ihm als erstem Stern eine Änderung der radialen Geschwindigkeit registriert (bewirkt z.B. durch Verschiebung der Anziehungskräfte aber auch durch Eruptionen).

In den Jahren nach seiner Entdeckung glaubte man aufgrund seiner schnellen Relativbewegung, dass dieser Stern unser nächster stellarer Nachbar sei. Position: Im Sternbild Schlangenträger; umgekehrt befindet sich die Sonne von Barnhards Pfeilstern aus betrachtet im Sternbild Orion, auf der Linie, welche die Gürtelsterne mit Sirius verbindet.



Alter: Die geringe Metallizität (ca. 10% ☉) lässt auf ein sehr hohes Alter schließen (7-12 Mrd Jahre, wohl 11 Mrd. Jahre einer der ältesten Sterne der Milchstraße). Rotationsperiode nur noch 130 Stunden. Trotzdem (wie 1998 entdeckt wurde) magnetisch aktiv (große Eruptionen, Flares und eine sehr heiße Korona).

Habitable Zone in 9 Mio km Entfernung (Planeten hätten hier 3-wöchigen Umlauf mit gebundener Rotation). Die Existenz erdähnlicher Gesteinsplaneten ist aufgrund des geringen Alters des Universums bei seiner Entstehung fraglich, denn damals wurden noch nicht genügend schwerere Elemente von anderen Sternen erbrütet.

Peter van de Kamp (der den Stern seit 1938 beobachtet hatte) erklärte 1963, Schleifenbewegungen des Sterns erkannt zu haben, die auf ein Planetensystem (ein oder mehrere Planeten von der Art des Jupiter) schließen lassen; so galt er als Ziel des Projekts Daedalus (eine 1973–1978 von der British Interplanetary Society durchgeführte Studie über die Realisierbarkeit künftiger unbemannter interstellarer Raumsonden mit nuklearem Fusionsantrieb); diese Bewegungen konnten seit 1973 nicht bestätigt werden. Peter van de Kamp († 1995) hielt zeitlebens an seiner Behauptung fest, die er 1982 wiederholte.

Im November 2018 wurde allerdings die Entdeckung eines Planeten veröffentlicht, der **Barnards Stern b** genannt wird. Er umkreist Barnards Pfeilstern alle 233 Tage im Abstand von 0,4 AE, ist eine „Supererde“ mit 3,3 Erdmassen und hat eine Temperatur von -170 °C. All dies wurde aus 771 Einzelmessungen, die sie im Laufe von 20 Jahren gesammelt wurden, mittels der Radialgeschwindigkeitsmethode ermittelt. Die Existenz des Planeten ist allerdings noch unsicher, 2021 wurden Bedenken geäußert.

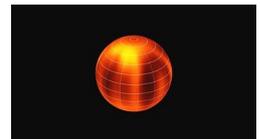
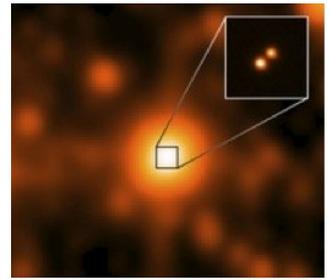
Beobachtungshinweise: Barnards Pfeilstern ist bereits in einem kleinen Teleskop mit 60 mm Öffnung zu erkennen. Durch das Okular eines 10-Zollers ist Barnards Stern mit seiner kräftig roten Farbe sehr leicht zu erkennen. Er befindet sich in der Mitte zwischen dem 4,64 mag hellen Oph 66 und einer hellen, recht auffälligen, trapezförmigen Sterngruppe.

Die Sonne wäre von Barnhards Pfeilstern aus ein Stern 1-ter Größe (von der Helligkeit des Pollux) im Sternbild Monoceros, und der zweitnächste Stern nach dem roten Zwerg Ross 154 (9,69 Lj von uns aus).

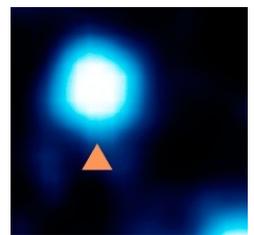
<sup>139</sup> Der Stern war schon auf Platten der Harvard College University 1888 and 1890 aufgetaucht; aber Barnard entdeckte seine schnelle Bewegung.

## Braune Zwerge in der Nähe der Sonne:

**Luhman 16** oder **WISE 1049–5319** (ausführlich: **WISE J104915.57-531906.1**)<sup>140</sup> ist ein Doppelsystem von Braunen Zwergen (**Luhmann 16A** und **Luhmann 16B**) im Sternbild Vela nahe der galaktischen Ebene. Der Abstand vom Sonnensystem beträgt 6,59 Lj, so dass es das drittnächste Sternsystem nach Alpha Centauri und Barnards Pfeilstern ist. Das System wurde 2013 von Kevin Luhman mit Hilfe von Daten des NASA-Weltraumteleskop *Wide-Field Infrared Survey Explorer* (*WISE*) entdeckt, das am 14. Dezember 2011 gestartet und in einen Erdorbit platziert worden ist. Die beiden Braunen Zwerge umkreisen sich in einer Entfernung von 3 AE (scheinbare Entfernung 1,5") einmal innerhalb von 25 Jahren. Ihre Helligkeitsunterschied beträgt 0,45 mag. Scheinbare Helligkeit 14,94 mag, absolute Helligkeit 18,4 mag.<sup>141</sup> Die Masse von Luhmann 16 A ist 0,04-0,05  $\odot$ , die Temperatur 1077°; die Masse von Luhmann 16B ist 0,03-0,04  $\odot$ , Spektralklasse A: L7; B: T1. die Temperatur 937°. Im Dezember 2013 wurden Indizien für einen planetaren Begleiter eines der Braunen Zwerge mit einer Umlaufzeit in Bereich von Monaten entdeckt. Auch Luhmann 16B wurden verschieden helle und dunkle Gebiete entdeckt, was durch Wolken erklärt wird.



**WISE 0855-0714** (ausführlich: **WISE J085510.83-071442.5**)<sup>142</sup> ist ein im März 2013 mit dem NASA-Weltraumteleskop *WISE* entdeckter Brauner Zwerg; die Entdeckung wurde im April 2014 von Kevin Luhman bekanntgegeben. Dieser sub-braune Zwerg der Klasse Y (ein planetenartiges Objekt) von den bisher bekannten Sternsystemen das viertnächste mit nur 7,53 Lichtjahren Entfernung (Parallaxe 433 mas) vom Sonnensystem. Auf ihm herrschen Temperaturen von -48 bis -13°, es ist also auf ihm so kalt wie in den Polarregionen der Erde. Damit liegt hier der kälteste Braune Zwerg vor, den man bislang gefunden hat. Es findet keine Deuterium-Fusion statt; seine Masse beträgt zwischen 3 und 10 Jupitermassen; Spektralklasse Y; scheinbare Helligkeit 13,89 im W2- Band bei 4,6  $\mu\text{m}$ . In der Atmosphäre wurden Eiswolken entdeckt.



**Wolf 359 (CN Leonis)** roter Zwerg (UV Ceti - flare Stern) auf der Ekliptik im Sternbild Löwe, entdeckt von Max Wolf (1917; erschien 1919 in Wolfs Katalog), Entfernung 7,8 Lj (fünftnächstes Sternsystem), scheinbare Helligkeit 13,54 mag, absolute Helligkeit 16,56 mag, Oberflächentemperatur 2527°, Spektralklasse M6.5 VE; Leuchtkraft 0,1 %  $\odot$  (schwächster Stern unter unseren nächsten Nachbarn und einer der schwächsten aller bekannten Sterne überhaupt), Masse 0,9 %  $\odot$ , Durchmesser 16%  $\odot$ . Würde die Sonne durch Wolf 358 ersetzt, würde man ein Teleskop benötigen, um den Sonnenball scharf zu sehen. Wolf 359 leuchtet nur 10 mal so stark wie das Mondlicht.

Ein hypothetischer Planet mit flüssigem Wasser müsste Wolf 359 in nur 628.000 km Abstand umkreisen (weniger als die doppelte Distanz Erde-Mond), die Folge wäre eine gebundene Rotation. Ein „Wolf-Jahr“ würde demnach nur rund acht Stunden dauern.



Wolf 359 ist der rote Punkt oberhalb der Mitte

**Lalande 21185** (nach dem Katalog von Jérôme Lalande, 1732–1808; nach anderen Katalogen **Gliese 411** oder **BD +36°2147** oder **HD 95735 genannt** oder **Argelanders Zweiter Stern**)<sup>143</sup> ist ein Roter Zwerg (ein wenig größer, wärmer und heller als die anderen bisher genannten) im Sternbild des Großen Bären (zwischen seinen Hinterfüßen), Entfernung 8,31 Lj (sechstnächstes Sternsystem), Helligkeit 7,5 mag, absolut 10,5 mag, Oberflächentemperatur 3130°, Spektralklasse M2V, Leuchtkraft 0,25 %  $\odot$ , Masse 46 %  $\odot$ , Durchmesser 0,4%  $\odot$  (1,46 mas), relativ ruhiger veränderlicher Stern vom BY Draconis - Typ, sendet aber Röntgenstrahlen aus; kommt mit 85.6 km/s auf uns zu und wird in 19.900 Jahren den Minimalabstand von 4,65 Lj zur Sonne erreichen und sich dann wieder entfernen. Alter: 5-10 Mrd. Jahre. Er bewegt sich mit auch mit hoher Geschwindigkeit (5" pro Jahr) auf einem Orbit senkrecht zur Galaktischen Ebene. Der Stern wurde verdächtigt, einen Planeten zu haben: 1951 von Peter van de Kamp und seiner Studentin Sarah Lippincott; 1960 wiederholte Lippincott die Behauptung, aber mit anderen Parametern. Diese Behauptungen wurden 1974 von George Gatewood zurückgewiesen; aber Gatewood fand 1996 seinerseits Indizien für die Existenz eines Planetensystems. Dies bleibt aber umstritten.

<sup>140</sup> Die Zahl in der Bezeichnung gibt die Koordinaten an: Rektaszension 10<sup>h</sup> 49<sup>m</sup> 15.57<sup>s</sup>, Deklination -53°19'06.1" (Epoche J2000); dieser Ort liegt im Sternbild Vela unweit der Spitze des Segels in Fahrtrichtung.

<sup>141</sup> Die Helligkeitsangaben beziehen sich auf das I-Band (700-890 nm, nahes Infrarot).

<sup>142</sup> Die Zahl in der Bezeichnung gibt die Koordinaten an: Rektaszension 08h 55m 10.83s, Deklination -07° 14' 42.5" (Epoche J2000); dieser Ort liegt im Sternbild Hydra nahe dem Kopf der Wasserschlange.

<sup>143</sup> „Argelanders (erster) Stern“ ist Groombridge 1830, ein 29,9 Lj entfernter gelber Stern im Großen Bären; nachdem Friedrich Wilhelm August Argelander (1799-1875) im Jahre 1842 seine Eigenbewegung mit bestimmte, hatte er unter den bis dahin bekannten stellaren Eigenbewegungen die größte. Argelander bestimmte 1857 auch die ebenfalls hohe Eigenbewegung von Lalande 21185.

**Sirius ( $\alpha$  Canis Minoris, Alpha Canis Minoris, Sothis oder der Hundsstern)**<sup>144</sup> ist der Hauptstern im Sternbild Großer Hund, mit -1,46 mag der hellste Fixstern des Himmels und in Wahrheit ein Doppelstern mit einer Schwachen Komponente , 8,60 Lj von uns entfernt (siebtnächstes Sternsystem).

Sirius A, blauweiß und mit doppelt so großem Durchmesser wie die Sonne ist der hellste, heißeste (ca. 10.000° Oberflächentemperatur) and der massenreichste (ca. 2,2 Sonnenmassen) aller Nachbarsterne der Sonne (der nächste Stern, der heißer und leuchtkräftiger als Sirius ist, ist Wega in einer Entfernung von 25 Lj), mit absoluter Helligkeit 1,42.

Sirius B (1844 von Friedrich Bessel aufgrund von Veränderungen der Eigenbewegung von Sirius erschlossen, 1862 von Alvan Graham Clark, dem Sohn des Bostoner Instrumentenbauers Alvan Clark erstmals beobachtet) hat 8,3 mag und ist der nächste Weiße Zwerg: ein ultradichter, kollabierter Kern eines Sterns, der seine energieproduzierenden Nuklear-Prozesse eingestellt hat. Er hat bloß, Erdgröße aber 94% des Sonnengewichts, also extreme Dichte.

Ein auf ihm stehender 100 kg schwerer Mensch würde 10.000 Tonnen wiegen, und die Temperatur beträgt 25.381° (der nächste Weiße Zwerg kreist um den 11,5 Lj entfernten Stern Procyon in Kleinen Hund). Beide Komponenten sind blauweiß und umkreisen einander in 50 Jahren in einem mittleren Abstand von 20 AU. Alter des Systems: 225-250 Millionen Jahre, vor ca. 124 Millionen Jahren wurde B zum weißen Zwerg. Der nächste Nachbarstern Prokyon ist von Sirius A+B 5,24 Lichtjahre entfernt. Sirius weist eine relativ große Eigenbewegung von 1,3" im Jahr auf. Davon entfallen etwa 1,2" auf die südliche und 0,55" auf die westliche Richtung. Sirius und Arktur waren die ersten Sterne, an denen eine Eigenbewegung festgestellt wurde, nachdem sie über Jahrtausende hinweg als unbeweglich („Fixsterne“) galten. Im Jahre 1717 bemerkte Edmond Halley beim Vergleich der von ihm selbst gemessenen Sternpositionen mit den im Almagest überlieferten antiken Koordinaten, dass Sirius sich seit der Zeit des Ptolemäus um etwa ein halbes Grad (einen Vollmonddurchmesser) nach Süden verschoben hatte. Sirius bewegt sich mit 8,6 km/s auf uns zu. In etwa 64.000 Jahren wird Sirius zu unserem Sonnensystem mit ca. 7,86 Lichtjahren die größte Annäherung erreicht haben und die scheinbare Helligkeit wird bei -1,68 mag liegen. In den Folgejahren wird sich die Entfernung zu unserem Sonnensystem wieder stetig erhöhen.

**Sirius C:** In den 1920er Jahren beobachteten mehrere Astronomen wiederholt einen schwachen Stern etwa der zwölften Größenklasse in unmittelbarer Nähe zu Sirius A, verloren diesen möglichen neuen Begleiter dann aber wieder. Französische Astronomen konnten 1999 auf einer Aufnahme mit abgeblendetem Sirius A dessen Umgebung näher auf schwache Sterne untersuchen. Sie fanden einen Hintergrundstern passender Helligkeit, an dem Sirius in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts vorbeigezogen war und der offenbar von den damaligen Beobachtern gesehen worden war. Beim Vergleich mit einer früheren Aufnahme konnten die Astronomen außerdem bis in eine Nähe von 30 Bogensekunden keinen Begleitstern finden, der sich durch eine mit Sirius A gemeinsame Eigenbewegung verraten hätte. Eine Untersuchung von Unregelmäßigkeiten in der Umlaufbewegung von Sirius A und B deutet allerdings darauf hin, dass sich im Sirius-System eine dritte Komponente, deren Masse auf nur etwa 0,06 Sonnenmassen eingeschätzt wird, mit einer Umlaufdauer von etwa sechs Jahren befinden könnte. Da es um Sirius B keine stabile Umlaufbahn mit einer Umlaufzeit von mehr als vier Jahren gibt, kann der potenzielle Sirius C nur um Sirius A kreisen.

**Sirius als roter Stern:** Sirius erscheint dem Betrachter grell bläulichweiß. Im Sternkatalog des von Claudius Ptolemäus um 150 n. Chr. verfassten Almagest findet sich Sirius, der Hauptstern des Sternbilds Großer Hund, dennoch mit dem Eintrag: Der Stern im Maule, der hellste, der Hund[sstern] genannt wird und rötlich ist. Während nach Beschreibung und Koordinaten eindeutig Sirius gemeint ist, stimmt die genannte rötliche Färbung nicht mit Sirius' blau-weißer Farbe überein. Fünf andere von Ptolemäus als rot bezeichnete Sterne (u.a. Beteigeuze, Aldebaran) sind auch für den heutigen Betrachter rötlich. Es gibt außer dem Ptolemäus-Text noch weitere antike Texte, die Sirius unter die roten Sterne einreihen: Ein ein assyrischer Text aus dem Jahre 1070 v. Chr. beschreibt Sirius als „rot wie geschmolzenes Kupfer.“ Sirius wird von Aratos in seinem Lehrgedicht *Phainomena* sowie von dessen späteren Bearbeitern als rötlich bezeichnet. Bei Plinius ist Sirius „feurig“ und bei Seneca sogar röter als Mars. Auch der frühmittelalterliche Bischof Gregor von Tours bezeichnet Sirius in seinem Werk *De cursu stellarum ratio* (ca. 580 n. Chr.) noch als roten Stern. Andererseits bezeichnet Manilius Sirius als „meerblau“, und vier antike chinesische Texte beschreiben die Farbe einiger Sterne als „so weiß wie [Sirius]“. Darüber hinaus wird Sirius oft als stark funkelnd beschrieben; ein eindrucksvolles Funkeln setzt aber die vollen Spektralfarben eines weißen Sterns voraus, während das mattere Funkeln eines roten Sterns kaum Aufmerksamkeit erregt hätte.

Seit dem 18. Jahrhundert knüpfen sich an die antiken Angaben Spekulationen, ob Sirius tatsächlich während der letzten 2000 Jahre seine Farbe geändert haben könnte. Aber nach heutigem Verständnis ist ein Zeitraum von 2000 Jahren bei weitem nicht ausreichend, um bei den betreffenden Sterntypen sichtbare Veränderungen bewirken zu können. Demnach ist weder ein Aufheizen von Sirius A von einigen tausend Kelvin auf die heutigen knapp 10000 K, noch eine Sichtung von Sirius B in seiner Phase als Roter Riese denkbar. Alternative Erklärungsversuche konnten bislang allerdings auch nicht vollständig überzeugen:

1. Eine zwischen Sirius und der Erde durchziehende interstellare Staubwolke könnte eine erhebliche Rötung des Lichts durchscheinen-



Sirius A und B

<sup>144</sup> Die früheste überlieferte Erwähnung von Sirius (griechisch Σείριος, *Seirios*) findet sich im 7. Jahrhundert v. Chr. bei Hesiods Lehrgedicht *Werke und Tage*. Die Herkunft des Namens unterliegt mehreren Deutungen: Leukosia (*Die Weiße*) ist in der griechischen Mythologie eine der Sirenen (*Seirenes*). Eine mögliche Verbindung zu Sirius mit der Benennung als *Das gleißend weiße Licht* ist ebenso Inhalt kontroverser Diskussionen wie auch die Anwendung der Begriffe *gleißend heiß* und *sengend* für *Seirios*. Schließlich wird eine weitere Gleichsetzung mit der indogermanischen Wurzel \**tueis-ro* für „erregt sein“ oder „funkeln“ angenommen. Einige Wissenschaftler bestreiten allerdings diese Ableitung.

der Sterne verursacht haben. Eine solche Wolke hätte aber Sirius' Licht auch so stark schwächen müssen, dass er allenfalls als unauffälliger Stern dritter Größenklasse erschienen wäre und seine Helligkeit nicht ausgereicht hätte, um im menschlichen Auge einen Farbeindruck hervorzurufen. Spuren einer solchen Wolke wurden nicht gefunden.

2. Die irdische Atmosphäre rötet das Licht tiefstehender Gestirne ebenfalls, schwächt es aber nicht so stark ab. Da der heliakische Aufgang des Sirius für viele antike Kulturen ein wichtiger kalendarischer Fixpunkt war, könnte die Aufmerksamkeit besonders dem tiefstehenden und dann rötlich erscheinenden Sirius gegolten haben. Diese Farbe könnte Sirius dann als kennzeichnendes Attribut beibehalten haben. Theoretische Rechnungen deuten an, dass die Atmosphäre in der Tat das Licht eines Sterns ausreichend röten kann, ohne die Helligkeit unter die Farbwahrnehmungsschwelle zu drücken. Praktische Beobachtungen konnten bisher aber keinen ausgeprägten Rötungseffekt feststellen.

3. „Rötlich“ könnte ein lediglich symbolisches Attribut sein, das Sirius mit der von seinem heliakischen Erscheinen angekündigten Sommerhitze in Verbindung bringt.

#### **Sirius in den Kulturen:**

Die **Ägypter** sahen Sirius zunächst in ihrer Sprache nicht als Einzelstern, sondern im Zusammenhang mit dem Dreieckssternbild Sopdet („die Spitze“) das aus Seba-en-Sopdet („Stern der Spitze“ = Sirius) und wahrscheinlich aus den Sternen Adhara und Wezen bestand. später, im 1. Jahrtausend v. Chr., wechselte die Aussprache zu sote und gelangte über diesen Weg zu der heute bekannten gräzisierten Form Sothis (griechisch: Σωσις, Σωτις), die auch als Namensgeber für den Sothis-Zyklus fungierte.

Ob die Bedeutung „die Spitze“ ausschließlich mit dem Sternbild Sopdet in Verbindung gebracht wurde, bleibt dabei unklar. Während sich die Verehrung auf Sirius konzentrierte, verblassten die beiden anderen Sterne in ihrer Bedeutung immer mehr. Bezüglich der Nilflut nahm Sirius im Verlauf der ägyptischen Geschichte einen wichtigen Rang ein. Herodot gibt die Zeit um den 22./23. Juni als Beginn der Nilflut an. Einträge in ägyptischen Verwaltungsdokumenten bestätigen Herodots Angaben. Historische und astronomische Rekonstruktionen belegen, dass die erste morgendliche Sichtbarkeit von Sirius im Nildelta um 2850 v. Chr. und im südlichsten Ort Assuan um 2000 v. Chr. mit dem 22./23. Juni zusammenfiel. Sirius galt deshalb im 3. Jahrtausend v. Chr. als *Verkünder der Nilflut* und genoss in der ägyptischen Religion eine noch größere Bedeutung. Im weiteren Verlauf der ägyptischen Geschichte erfolgten die heliakischen Aufgänge von Sirius erst nach dem Eintreffen der Nilflut. In der griechisch-römischen Zeit Ägyptens wurde den veränderten Bedingungen mythologisch Rechnung getragen. Nun war es *Salet, die mit einem Pfeilschuss die Nilflut auslöste; ihre Tochter Anukket sorgte anschließend für die Abschwellung des Nils*. Der heliakische Aufgang des Sirius erfolgt in der heutigen Zeit in Assuan am 1. August und im Nildelta am 7. August. Bei den **Sumerern, Assyriern** und **Babyloniern** fungierte Sirius als Kalenderstern.

Bei den **Griechen und Römern** war Sirius mit Hitze, Feuer und Fieber verbunden. Die Römer nannten die heißeste Zeit des Jahres (üblicherweise vom frühen Juli bis Mitte August) die „Hundstage“ (lat. *dies caniculares*, Tage des Hundsterns). Im **deutschen** Volksglauben wurden die Hundstage ab dem 15. Jahrhundert als Unglückszeit angesehen. Sirius galt bei den Griechen als Wegbereiter der Tollwut. Auch bei vielen **nordamerikanischen Volksstämmen** wird Sirius mit Hunden oder Wölfen assoziiert. Bei den Cherokee beispielsweise sind Sirius und Antares die Hundsterne, welche die Enden des „Pfades der Seelen“ (der Milchstraße) bewachen: Sirius das östliche Ende am Winterhimmel, Antares das westliche Ende am Sommerhimmel. Eine aus der Welt scheidende Seele muss genug Futter mit sich tragen, um beide Hunde zu besänftigen, wenn sie nicht ewig auf dem Pfad der Seelen herumirren will. Die Pawnee bezeichnen Sirius als Wolfstern. Bei den **Chinesen** bildeten Sterne der heutigen Konstellationen Achterdeck und Großer Hund ein Pfeil und Bogen darstellendes Sternbild. Der Pfeil zielte direkt auf den „Himmelswolf“, nämlich Sirius.

Der französische Ethnologe Marcel Griaule studierte ab 1931 zwei Jahrzehnte lang die Volksgruppe der **Dogon** im westafrikanischen **Mali**. Die umfangreichen Schöpfungsmythen der Dogon, die Griaule hauptsächlich per Dolmetscher geführten Gesprächen mit vier hochrangigen Stammesangehörigen sammelte, enthalten angeblich Angaben über einen merkwürdigen Begleiter von Sirius:

- der Stern Sirius (*sigu tolo*) wird vom kleineren Begleiter *po tolo* umkreist. *Po tolo* hat seinen Namen von *po*, dem kleinsten den Dogon bekannten Getreidekorn (*Digitaria exilis*).

- *Po tolo* bewegt sich auf einer ovalen Bahn um Sirius; Sirius steht nicht im Zentrum dieser Bahn, sondern exzentrisch.

- *Po tolo* braucht 50 Jahre, um die Bahn einmal zu durchlaufen und dreht sich einmal im Jahr um sich selbst.

- Wenn *po tolo* nahe bei Sirius steht, wird Sirius heller. Wenn der Abstand am größten ist, flackert Sirius und kann als mehrere Sterne erscheinen.

- *Po tolo* ist der kleinste Stern und überhaupt das kleinste für die Dogon denkbare Ding. Er ist aber gleichzeitig so schwer, dass alle Menschen nicht ausreichen würden, ihn hochzuheben.

- Ein drittes Mitglied des Siriuissystems ist der Stern *emme ya tolo* (benannt nach einer Sorghumhirse), der etwas größer als *po tolo* aber nur ein Viertel so schwer ist. Er umkreist Sirius auf einer größeren Bahn und ebenfalls einmal in 50 Jahren.

Die Ähnlichkeit dieser Beschreibungen mit Sirius B und einem eventuellen Sirius C ist umso erstaunlicher, als nichts davon mit bloßem Auge erkennbar ist. Zahlreiche unterschiedliche Spekulationen versuchen die Herkunft dieser angeblichen Kenntnisse zu erklären. In der Populärliteratur finden sich zwei Hauptströmungen: eine hauptsächlich in afrozentrischer Literatur vertretene Ansicht sieht die Dogon sogar als Überbleibsel einer einstigen hochentwickelten, wissenschaftlich geprägten schwarzafrikanischen Zivilisation. R. Temple andererseits vertrat in seinem Buch *The Sirius Mystery* die Vermutung, außerirdische Besucher aus dem Sirius-System hätten vor etwa 5000 Jahren den Anstoß für den Aufstieg der ägyptischen und der sumerischen Zivilisation gegeben. Die in wissenschaftlichen Kreisen bevorzugte Erklärung geht von der Kontaminierung der Dogon-Mythologie mit modernen astronomischen Erkenntnissen aus. Die anthropologische Variante nimmt an, dass die Kontamination (wenn auch nicht absichtlich) durch Griaule selbst geschehen sei. Der niederländische Anthropologe Walter van Beek arbeitete selbst mit den Dogon und versuchte Teile des Materials von Griaule zu verifizieren. Er konnte jedoch große Teile der von Griaule wiedergegebenen Mythen nicht bestätigen, unter anderem Sirius als Doppelsternsystem. Van Beek vertritt die Ansicht, dass die von Griaule publizierten Mythen nicht einfach Wiedergaben von Erzählungen seiner Gewährsleute seien, sondern in einem komplexen Zusammenspiel zwischen Griaule, seinen Informanten und den Übersetzern zustande gekommen seien. Ein Teil von ihnen sei das Ergebnis von Missverständnissen sowie Überinterpretation durch

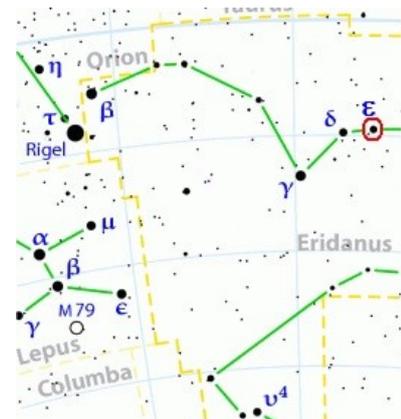
Griaule. Eine mögliche Erklärung bezieht sich auf angenommene Kontakte der Dogon mit europäischen Besuchern. Sie weist darauf hin, dass die Dogon-Erzählungen den astronomischen Kenntnisstand ab etwa 1926 widerspiegeln (während Griaule erst ab 1931 bei den Dogon zu arbeiten begann): die Umlaufperiode, der elliptische Orbit und die große Masse von Sirius B waren bereits im 19. Jahrhundert bekannt, sein geringer Durchmesser ab etwa 1910, ein möglicher dritter Begleiter wurde in den 1920er Jahren vermutet, die hohe Dichte von Sirius B wurde 1925 nachgewiesen. Die Beobachtung der gravitativen Rotverschiebung an Sirius B ging als Aufsehen erregende Bestätigung der Allgemeinen Relativitätstheorie durch die populäre Presse. Als Quellen kommen beispielsweise Missionare in Betracht, worauf auch biblische und christliche Motive in der Dogon-Mythologie hinweisen. Missionarische Aktivitäten bei den Dogon fanden ab 1931 statt, allerdings sind bisher keine Missionare nachweisbar, die konkret als Quelle in Frage kämen.

**Luytens Stern** (oder **Luyten 726-8** oder **BL & UV Ceti** oder **Gliese 65**) im Sternbild Walfisch wurde 1948 von Wilhelm Luyten entdeckt und ist ein Doppelstern, dessen Komponenten BL Ceti (hellere Komponente) und UV Ceti (dunklere Komponente) genannt werden. UV Ceti ist der Prototyp der Flare-Sterne, die plötzlich sehr viel heller als gewöhnlich werden können (gewöhnlich sieben mal so hell) und dann innerhalb von Minuten oder Stunden auf ihre normale Helligkeit zurückfallen. Diese Helligkeitsausbrüche werden durch intensive Eruptionen (Sonnenfackeln, flares) hervorgerufen. Zu den Flare-Sternen gehören z.B. auch Proxima Centauri, Wolf 359, and Ross 154. Auch die Komponente BL Ceti ist ein Flare-Stern, allerdings mit einer geringeren als der typischen Helligkeitsamplitude. Die Komponenten A und B sind 2,1 bis 8,8 AU (im Mittel 5,45 AU) voneinander entfernt sind und umkreisen sich in 26,5 Jahren. Die Entfernung beträgt 8,73 Lj (achtnächstes Sternsystem), scheinbare Helligkeit 12,0 (12,54/12,99) mag, absolute Helligkeit 14,9/15,35 mag, Spektralklasse M50 Ve / M60 Ve, beide Komponenten haben zusammen nur 20% der Sonnenmasse (jede Komponente 10%), Radius jeder Komponente ist 0,14 % ☉; die Leuchtkraft beträgt 0,006%/0,004% ☉. Der nächste Nachbarstern des Systems Luyten 726-8 ist der sonnenähnliche Einzelstern Tau Ceti in einer Entfernung von 3,2 Lichtjahren. Luyten 726-8 war bis vor 32.000 Jahren der sonnennächste Stern; damals wurde er in dieser Rolle durch Proxima Centauri abgelöst. Der Stern enternt sich von uns mit 29 km/s.

**Ross 154** (als Veränderlicher **V1216 Sagittarii**, entdeckt 1925 von Frank Elmore Ross, 1874-1960, Nachfolger von Barnard am Yerkes-Observatorium nordwestlich von Chicago, der 400 Veränderliche und über 1000 Sterne mit schneller Eigenbewegung entdeckte) im Sternbild Schütze ist mit einer Entfernung von 9,69 Lj der entfernteste von den maximal 10 Lj von uns enternten bisher bekannten Sternen (neuntnächster Stern), ein Roter Zwerg, scheinbare Helligkeit 10,37 mag, absolute Helligkeit 13,01 mag, Leuchtkraft 0,38% ☉, Oberflächentemperatur 2427° (2700 K), Spektralklasse M3.5Ve, Röntgenstrahlen-Quelle, Masse 17% ☉, Durchmesser 24 % ☉, UV-Ceti-Flaresterne. Alter: unter 1 Milliarde Jahre. Der Stern bewegt sich mit 10,7 km/s auf uns zu und wird der Sonne in ca. 157.000 Jahren bis auf 6,39 Lj nahe kommen und sich dann wieder entfernen.

**Ross 248** (als Veränderlicher **HH Andromedae**, entdeckt 1926 von Frank Elmore Ross in Sternbild Andromeda) ist mit einer Entfernung von 10.30 Lj das zehntnächste Sternsystem, ein Roter Zwerg, scheinbare Helligkeit 12,23-12,34 mag, Leuchtkraft 0.2% ☉, Masse 12% ☉ und Durchmesser 16% ☉, Spektralklasse M6 V, Flare-Stern mit Periode 4.20a. 1950 war diese der erste Stern, von dem man annahm, dass eine Variation seiner Helligkeit durch Flecken auf seiner Oberfläche bewirkt wird.

**Epsilon Eridani (ε Eridani**, offizieller Name **Ran**, früher auch **Sadira**; siehe Fußnote 132) ist mit 10,49 Lichtjahren Entfernung das elftnächste Sternsystem, von den mit bloßem Auge sichtbaren Sternen aber der drittnächste Stern (nach Alpha Centauri und Sirius); von den Nachbarsternsystemen ist es das dem Solssystem ähnlichste, Scheinbare Helligkeit 3,72 mag, absolute Helligkeit 6,18 mag, Leuchtkraft 28% ☉, Masse 85% ☉, Durchmesser 74% ☉, Oberflächentemperatur 4811° (5084 K), Spektralklasse K2V (ähnlich Alpha Centauri B mit K1V), etwas „kleiner, kühler und oranger“ als unsere die Sonne, Rotation 11,2 Tage. Nächster Stern, bei dem ein Planetensystem mit mindestens einem Planeten eindeutig festgestellt werden konnte (Planet Epsilon Eridani b, mit offiziellem Namen **Aegir** – siehe Fußnote 132 – entdeckt im Jahr 2000 von Artie Hatzes durch Radialgeschwindigkeits-Schwankungen, hat 1,55-fache Jupitermasse, Umlaufzeit 2502 Tage = 6,85 Jahre, Gr. Halbachse 3,4 AU, Exzentrizität 0,7). Im fiktiven *Star-Trek*-Universum wurde Epsilon Eridani als Sonnd von Spocks Heimatwelt Vulkan angesehen, doch wird diese Rolle meist 40 Eridani A zugeschrieben (siehe dort).



Es gibt Indizien für mindestens einen weiteren Planeten Epsilon Eridani c (0,1 Jupitermassen, Umlaufzeit 102200 Tage = 280 Jahre, Gr. Halbachse 40 AU, Exzentrizität 0,3). Den Stern umgibt außerdem ein Staub- und Gasscheibe im Kuipergürtel-Abstand (Kometengürtel). Weiter besitzt er zwei Asteroidengürtel; einen, der unserem Hauptgürtel entspricht, bei 3 AU und einen zwischen diesem Hauptgürtel und dem Kometengürtel bei 30 AU.<sup>145</sup>

Alter: 0,5-1 Milliarde Jahre (relativ jung), daher größere magnetische Aktivität als die Sonne (30mal stärkerer Sonnenwind). Er gehört zur Ursa Maior Bewegungsgruppe, bewegt sich mit 16,3 km/s von uns weg, sein nächster Nachbar ist mit einem Abstand von 5,22 Lj Luyten 726-8.



Größenvergleich Ran & Sonne

<sup>145</sup> Bei Star Trek wird Epsilon Eridani als Sonne beschrieben, in welcher Spocks Heimatplanet Vulkan liegt.

**Lacaille 9352** (in der Südwestecke des Südlichen Fisches, aufgelisten von Abbé Nicholas Louis de Lacaille, 1713-1762, der 14 Südsternbilder benannte, in seinem 1762 posthum veröffentlichten Katalog von 9766 Sternen) ist mit einer Entfernung von 10.7 Lj das zwölftnächste Sternsystem, roter Zwerg, scheinbare Helligkeit 7,34 mag, absolute Helligkeit 9,75, Leuchtkraft 1,1% ☉, Masse 50% ☉ und Durchmesser 46% ☉, Spektralklasse M0.5, Temperatur 3353° (3626 K). Es war die erste Sonne, deren Winkeldurchmesser direkt gemessen werden konnte. Entfernt sich von uns mit 9,5 km/s.

**Ross 128 (FI Virginis**, nahe der Ekliptik, Sternbild Jungfrau), Roter Zwerg (Flare) M4.0Vn, 10,9 Lichtjahre (dreizehntnächstes Sternsystem), Scheinbare Helligkeit 11,15 mag, absolute Helligkeit 13,49 mag; der Stern ist ein ruhiger Zwerg; mit 17 % der Masse und 20 % des Radius der Sonne. Er hat eine Temperatur von 3.192 K, eine Leuchtkraft von 0,00362 Sonnen und ein Alter von  $9,45 \pm 0,60$  Milliarden Jahren. Er bewegt sich auf uns zu und wird in 79.000 Jahren unser Nachbarstern sein. Sein Nachbarstern ist Wolf 359.

2017 wurde mit der Radialgeschwindigkeitsmethode der ihn umkreisende möglicherweise erdähnliche Planet **Ross 128b** entdeckt; er ist nach Proxima Centauri B der nächste möglicherweise erdähnliche Planet. Er umkreist den Stern in einem Abstand von etwa 0,05 AE mit einer Umlaufperiode von 9,9 Tagen und liegt wahrscheinlich am inneren Rand der habitable Zone. Der Planet besitzt ein schwaches Magnetfeld, ist etwa 35 % massereicher als die Erde, und erhält etwa 38 % mehr Sonnenlicht, so dass dort flüssiges Wasser existieren könnte. Seine Gleichgewichtstemperatur wird auf -60 bis 20° C geschätzt.

2. Mai 2017 wurden am Arecibo-Observatorium in Puerto Rico ungewöhnliche, breitbandige Radiosignale aus der Richtung von Ross 128 b empfangen. Es handelte sich um ein annähernd periodisches Signal mit abnehmender Frequenz. Doch ließ sich diese Beobachtung nicht wiederholen. Das rätselhafte Signal könnte von einem Satelliten in der Erdumlaufbahn gestammt haben.

**EZ Aquarii** oder **Luyten 789-6** oder **Gliese 866**, Dreifachsystem mit drei roten Zwergen, 11,109 Lj (vierzehntnächstes System). Komponenten A & C bilden einen nur spektroskopisch trennbaren Doppelstern mit Abstand 0,03 AU und Umlaufzeit 3,8 Tage; Komponente B umkreist diese beiden Komponenten in 823d (2,25a).

**61 Cygni** ist ein Doppelstern im Sternbild Schwan (mit einem Prismenglas in Einzelsterne auflösbar), der 11,401 Lichtjahre von der Sonne entfernt ist: das fünfzehntnächste Sternsystem; viertnächster mit bloßem Auge sichtbarer Stern, scheinbare Helligkeit 5,21/6,03 mag, Spektralklasse K5V/K7V, erster Fixstern, dessen Entfernung direkt durch Bestimmung seiner Parallaxe gemessen wurde, und zwar in den Jahren 1837 und 1838 von dem Astronomen Friedrich Wilhelm Bessel an der Sternwarte Königsberg. Bessel hatte seinerzeit (nur mäßig korrekt) berechnet, „daß von diesem Sterne das Licht zu uns erst in  $9\frac{1}{4}$  Jahren gelangt“. (Zitiert nach Humboldt, Kosmos, S. 43, Eichborn-Edition 2004), seine Parallaxe beträgt 0,3", Bessel hatte seine geringe Distanz wegen der großen Eigenbewegung von über 5" jährlich schon vermutet.

Leuchtkraft 15/8,5% ☉,

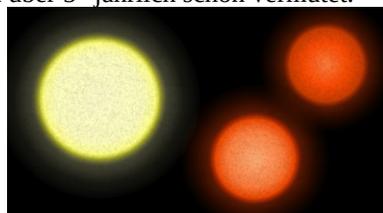
Masse 70/63% ☉,

Durchmesser: 66,5/59,5% ☉,

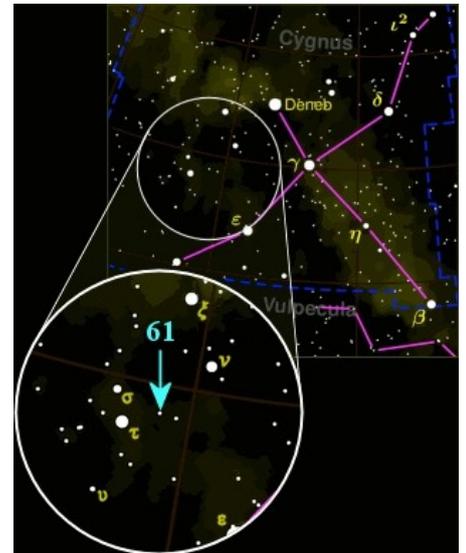
Umlaufzeit 678a, mittlere Entfernung 84 AU (zwischen 44 und 124 AU).

Alter: 6 Mrd Jahre.

Bewegt sich mit 64 km/s auf uns zu.



Größe von Sol und 61 Cyni A & B



**Prokyon** (griech. „Vor dem Hundsstern Sirius“,  **$\alpha$  Canis Minoris**, Hauptstern im kleinen Hund über dem großen Hund, auch: **Antecanis** = lat. Vorhund; **Elgomaisa**, **Algomeisa**, **Gomeisa** = arab. vom Weinen verklebte Augen; altägyptisch **Imi-chet-Sopdet** = verwandter Pfeilstern des Sirius) ist mit einer Entfernung von 11,402 Lichtjahren das sechzehntnächste System, und der viertnächste mit bloßem Auge sichtbare Stern, mit bloßem Auge nicht auflösbarer Doppelstern, dessen schwächere Komponente wie bei Sirius ein weißer Zwerg ist; scheinbare Helligkeit 0,34/10,7 (achthellster Stern), absolute Helligkeit 2,66/13,0, Leuchtkraft  $6,93 \times / 0,05\%$  ☉, Masse  $1,24 \times / 60\%$  ☉, Radius  $2 \times / 1\%$  ☉, Radius des weißen Zwerges 8600 km (Sirius B nur 5800 km); Spektralklasse F5 IV-V, Temperatur 6530 K / 7740 K, Alter 3 / 1,37 Mrd. Jahre, starker UV und Röntgenstrahler (lebensfeindlich).

Entfernung der beiden Komponenten im Mittel 15 AU (zwischen 8,9 und 21 AU), Umlaufzeit 40,82a.

**Struve 2398 (Gliese 725)** ist ein Doppelsternsystem im Sternbild Drache, das mit 11,488 Lj das siebzehntnächste Sternsystem ist; beide Komponenten sind Rote Zwerge; Umlaufzeit 295a, mittlerer Abstand 56 AU, Exzentrizität 0,7.

**Groombridge 34** ist ein Doppelsternsystem im Sternbild Andromeda, das mit 11,618 Lj das achtzehntnächste Sternsystem ist; beide Komponenten sind rote Zwerge (und Flare-Sterne) mit scheinbarer Helligkeit 8,09/11,06 mag, die im 147 AU umeinander kreisen.

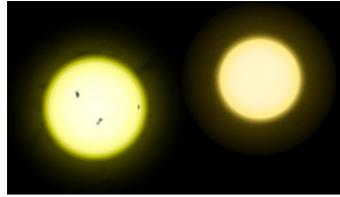
**DX Cancri** ist ein variabler Roter Zwerg im Krebs der Größe 14,81 mag in 11,678 Lj Entfernung; das neunzehntnächste Sternsystem.

**Tau Ceti** ( **$\tau$  Ceti**, auch „**Al Naymat II**“, d.h. der zweite Strauß genannt) ist ein 11,753 Lichtjahre entfernter gelber Hauptreihenstern Spektralklasse G8 im Sternbild Walfisch. Das Tau Ceti-System ist das 20-nächste Sternsystem und das sechsnächste mit bloßem Auge sichtbare. nach Alpha Centauri und Epsilon Eridani ist es das dritte sonnenähnliche System, von diesen ist Tau Ceti (im Gegensatz zu

Alpha Centauri) als Einzelstern und (im Gegensatz zu Epsilon Eridani vom Spektrum her) das sonnenähnlichste.

Scheinbare Helligkeit 3,49 mag (die Sonne von Tau Ceti aus stünde mit 2,6 mag im Sternbild Bärenhüter), absolute Helligkeit 5,69 mag, Spektralklasse G8V, Oberflächentemperatur 5344 K, Leuchtkraft 52 % ☉, Masse 77 % ☉, Durchmesser 77,3 % ☉, Rotation 34d, Alter 10 Mrd. Jahre.

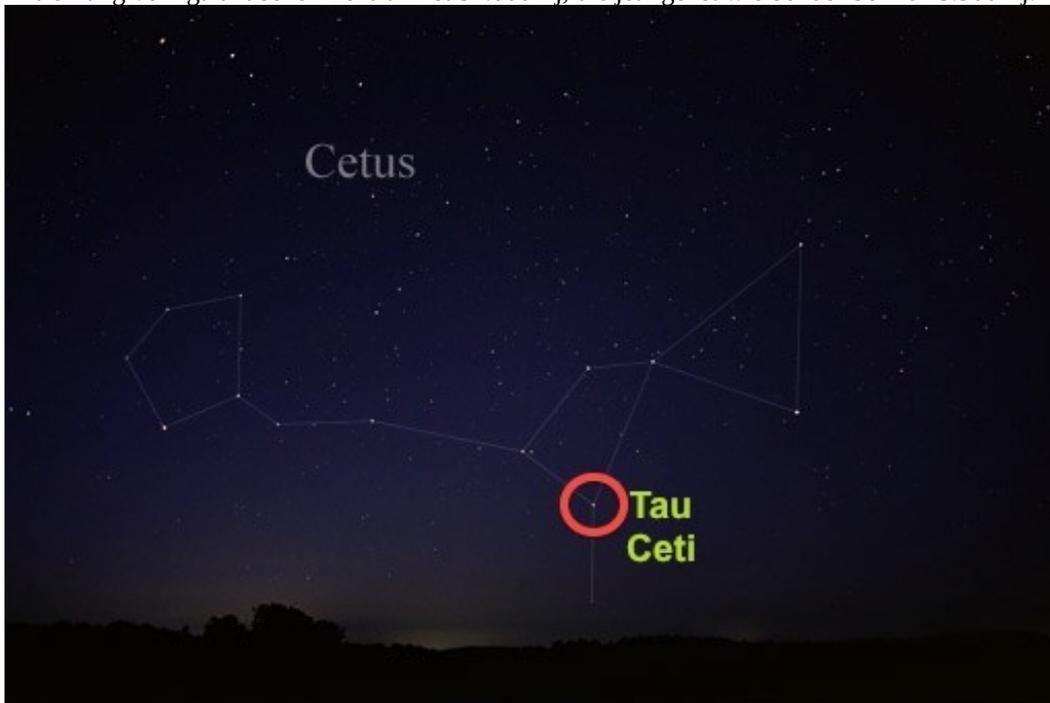
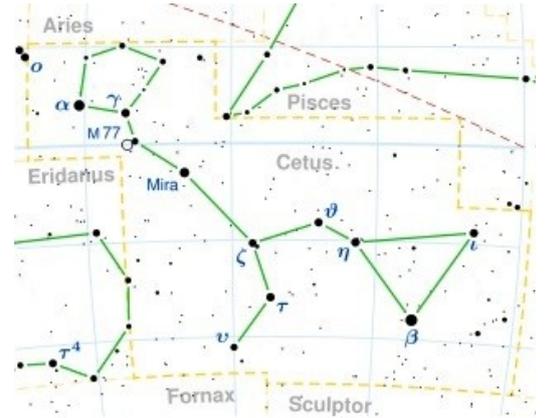
Mit Hilfe astrometrischer Methoden und Beobachtung der Radialgeschwindigkeit fand man Hinweise auf die Existenz von fünf Planeten mit der doppelten bis sechsfachen Masse der Erde, einer davon in der habitablen Zone. Tau Ceti ist von mehr als 12 mal so viel Staub umgeben wie unsere Sonne.



Sonne (rechts) und Tau Ceti

Die fünf Planeten Tau Ceti b,c,d,e,f haben Umlaufzeiten von 13,9 / 35,4 / 94 / 168 / 640 Tagen, besitzen die Massen von 2,0 / 3,1 / 3,6 / 4,3 / 6,6 Erdmassen, und sind 0,105 / 0,195 / 0,374 / 0,552 / 1,35 AU vom Zentralgestirn entfernt.

Der vierte Planet (Tau Ceti e) befindet sich in der habitablen Zone. Tau Ceti gehört zum Kreis der fünf geeignetsten Sterne, die mit dem Terrestrial Planet Finder untersucht werden sollen. Der Stern bewegt sich mit 16,8 km/s auf uns zu. Die Raumgeschwindigkeit relativ zur Sonne ist 37 km/s; die Bahn hat eine für einen Stern der galaktischen Scheibe hohe Exzentrizität von 0,2; Durchschnittliche Entfernung vom galaktischen Zentrum ist 32.000 Lj, die jetzige ist wie bei der Sonne 25.900 Lj.



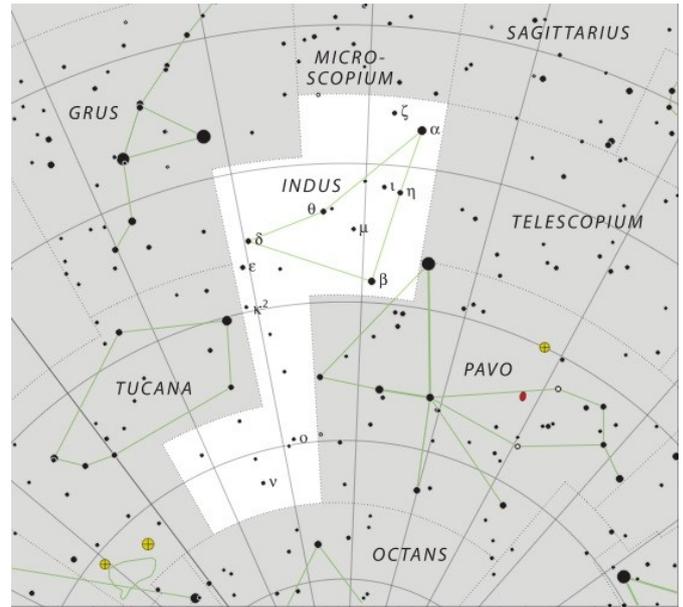
**Epsilon Indi (ε Indi)** ist mit 11,869 Lj Entfernung das 21-nächste Sternsystem, das siebtenächste mit bloßem Auge sichtbare; ein Dreifachsystem, bestehend aus einem K4.5V-Stern ε Indi A, und zwei braunen Zwergen ε Indi Ba (bzw. B) and ε Indi Bb (bzw. C), ein T1 bzw. T6 Stern, die 0,6" (< 2 AU) separiert sind und zusammen (sich umkreisend) in einem Abstand von 1460 AU um ε Indi A kreisen, von 50/30 Jupitermassen und Jupitergröße und Oberflächentemperatur 1200/870 K.

Scheinbare Helligkeit 4,83, absolute Helligkeit 6,89, Leuchtkraft 22% ☉, Masse 76 / 6,6 / 4,7 % ☉, Radius 73 / 8 / 8 % ☉, Temperatur 4630 K, Alter 13 Mrd. Jahre, bewegt sich mit 40,4 km/s auf die Sonne zu.

Es gibt Indizien für die Existenz eines Planeten von 1.6 Jupitermassen die den Zentralstern im Abstand von 6,5 AU in ca. 20 Jahren umkreisen.

Von Epsilon Indi aus gesehen ist die Sonne ein Stern von 2 mag im Sternbild Großer Bär. Epsilon Indi ist nach Barnards Pfeilstern und Kapteyns Stern der Fixstern mit der drittgrößten Eigenbewegung. Seine Eigenbewegung am Nachthimmel beträgt 4,7 Bogensekunden pro Jahr - ein Monddurchmesser in 400 Jahren.

In ca. 1000 Jahren wird das Sternsystem ins benachbarte Sternbild Tukan hinüberwechseln.



**Gliese 1061 (LHS 1565)** im Sternbild Horologium mit 11.980 Lj Entfernung das 22-nächste Sternsystem, mit 13 mag scheinbarer Helligkeit. Der rote Zwerg roter hat Spektralklasse M5.5V, die Leuchtkraft beträgt das 0,1-fache der Sonne, die Masse 11,3 Prozent der Sonnenmasse. Das „Red Dots“ Projekt entdeckte 2019 ein Planetensystem mit drei Planeten: Gliese 1061b (1,4 Erdmassen, Entfernung 0,021 AU, Umlaufzeit 3,2 Tage), Gliese 1061c (1,75 Erdmassen, Entfernung 0,035 AU, Umlaufzeit 6,7 Tage) und Gliese 1061d (1,7 Erdmassen, Entfernung 0,05 AU, Umlaufzeit 13 Tage), wobei der letzte in der habitablen Zone liegt (Gleichgewichtstemperatur  $-55^{\circ}$ ).

**YZ Ceti** ist mit 12,109 Lichtjahren Entfernung das 23-nächste System: ein roter Zwergstern (Flare Stern) mit 12 mag scheinbarer Helligkeit, 13 Prozent Sonnenmasse und 17 Prozent Sonnenradius in der Nähe von Tau Ceti (Distanz nur 1,6 Lichtjahre). 2017 wurde ein Planetensystem mit drei Planeten entdeckt – YZ Ceti b (0,75 Erdmassen, 0,016 AU, Umlaufzeit 2 Tage), YZ Ceti c (1 oder 0,6 Erdmasse, 0,02 AU, Umlaufzeit 3 Tage oder nur 1/4 Tag), YZ Ceti d (1,14 Erdmasse, 0,028 AU, Umlaufzeit 4 Tage) – und möglicherweise noch ein vierter YZ Ceti e, der noch nicht bestätigt ist, und wesentlich kleiner (!) als die Erde sein könnte (sub-earth planete candidate): 0,5 Erdmassen, 0,01 AU, Umlaufzeit 1 Tag.

**Luytens Stern (GJ 273) im Großen Hund** ist mit 12,36 Lichtjahren Entfernung das 24-nächste System: Spektrum M3.5V, scheinbare Helligkeit 9,87 mag, 26 Prozent Sonnenmasse, 35 Prozent Sonnenradius. Der Stern ist 1,2 Lichtjahre von Prokyon entfernt, und entfernt sich derzeit von uns. 2017 wurden zwei Planeten entdeckt, 2019 zwei weitere gemeldet (deren Existenz aber noch nicht bestätigt wurde). Der äußere von den bestätigten Planeten, GJ 273b, ist eine Super-Erde in der habitablen Zone (ca. 3 Erdmassen, 0,09 AU, Umlaufzeit 18,65 Tage); in innere, GJ 273c hat 2 Erdmassen, 0,04 AU und eine Umlaufzeit von 4,7 Tagen). Die noch nicht bestätigten Planeten sind GJ 273d (10,9 Erdmassen, 0,7 AU, 414 Tage) und GJ 273e (0,3 Erdmassen, 0,85 AU, 542 Tage).

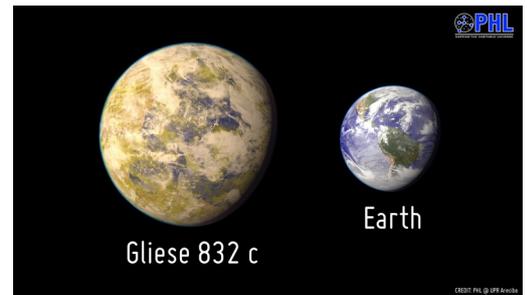
**Teegardens Stern** ist mit ca. 12,5 Lichtjahren Entfernung das 25-nächste System; Es handelt sich um einen 2003 im Sternbild Widder entdeckten roten Zwergstern (Spektralklasse M7), nahe am Limit für braune Zwerge, er strahlt vor allem im infraroten Spektrum. Wie Barnards Pfeilstern hat er eine sehr schnelle Eigenbewegung. Er wurde benannt nach dem Astrophysiker Bonnard J. Teegarden, dem Leiter des Entdeckerteams am Goddard Space Flight Center der NASA. Zunächst wurde die Entfernung auf nur 7,5 Lichtjahre geschätzt, dann aber auf ca. 12,5 Lichtjahre korrigiert. Der Stern hat nur 0,08 Sonnenmassen, eine Temperatur von unter 3000 K und ist vermutlich mehr als 8 Milliarden Jahre alt. Seine scheinbare Helligkeit liegt bei 15 mag, die absolute nur bei 17 mag.

Im Juni 2019 wurde die Existenz von zwei etwa erdgroßen (1,1 bis 1,3 Erdenmassen) Exoplaneten bekanntgegeben Teegarden b (> 1,05 Erdmassen, Entfernung 0,025 AU, Rotationsperiode 5 Tage) und Teegarden c (> 1,11 Erdmassen), Entfernung 0,044 AU, Rotationsperiode 11,5 Tage). Beide Planeten, die den Stern in seiner habitablen Zone umkreisen (b am inneren Rand wie die Venus, c am äußeren Rand wie der Mars), wurden in einer ersten Einschätzung als potentiell lebensfreundlich eingestuft, da Teegardens Stern aufgrund von Beobachtungen und seines hohen Alters als relativ ruhig gilt. Teegarden b wurde 2016 als der Planet mit dem nächst der Erde selbst höchsten bekannten ESI (Earth Similarity Index) bezeichnet (ESI = 0,95).

Hier endet die vollständige Reihe der nächsten Sternsysteme. Im Weiteren werden einige besonderen Sternen betrachtet, die weiter weg sind:

**Gliese 832** (auch GJ 832 oder HD 204961 oder LHS 3685) ist ein 16 Lichtjahre entfernter roter Zwergstern (Spektrum M1.5) im Sternbild Grus, der einen 2009 entdeckten kalten Jupiter-artigen Planeten Gliese 832b enthält, außerdem einen 2014 entdeckten Gesteinsplaneten (Super-Erde) Gliese 832c mit Umlaufzeit 35,68 Tage und 5,4 facher Erdmasse. Temperaturen könnten erdähnlich sein (oder auch venusähnlich, wenn der Planet eine dichtere Atmosphäre hat).

Kommentar auf Sci-News.com vom 29. Juni 2014: „The Earth Similarity Index of Gliese 832c (0.81) is comparable to exoplanets Gliese 667Cc (0.84) and Kepler-62e (0.83). This makes it one of the top three most Earth-like planets according to the ESI and the closest one to Earth of all three, a prime object for follow-up observations.“



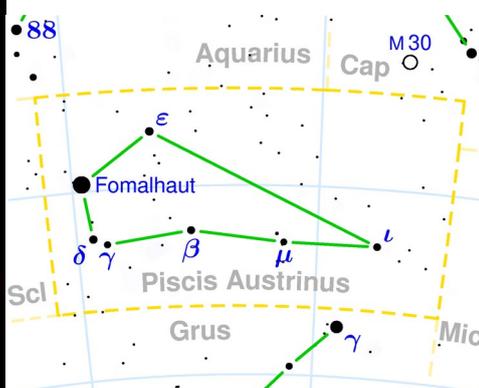
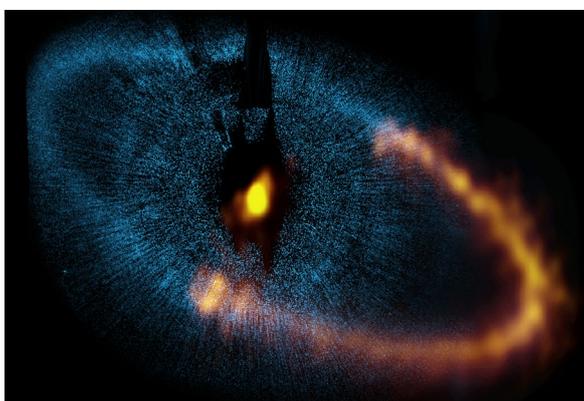
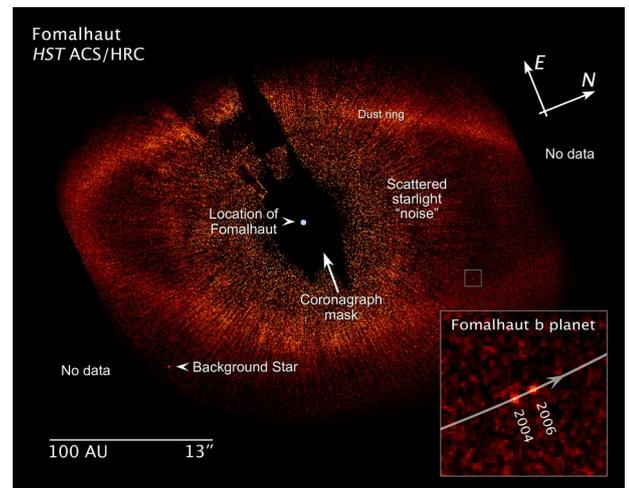
**40 Eridani** (als  $\alpha^2$  Eridani oder **Keid**, arab. Eierschale) genannt, 16,3 Lichtjahre entfernter Dreifachstern: Komponente A ist ein orangefarbener Hauptreihenstern vierter Größe der Spektralklasse K0 V. Er besitzt eine etwa 10 % geringere Masse als die Sonne und etwa ein Drittel ihrer Leuchtkraft. Komponente B ist ein Weißer Zwerg neunter Größe (Spektralklasse DA2.9) und besitzt etwa die Hälfte der Sonnenmasse. Er war dieser Stern der erste kompakte Zwergstern, der entdeckt wurde. C ist ein Roter Zwerg elfter Größe mit der Spektralklasse M4.5 V und gehört zu den Flare-Sternen. Als Veränderlicher trägt er auch die Bezeichnung DY Eridani. Die Komponenten B und C umkreisen den Primärstern in etwa 400 AE innerhalb von etwa 7200 Jahren. Das enge Paar B und C bewegt sich auf einem Orbit mit einem Radius von etwa 35 AE, wobei ein Umlauf etwa 252 Jahre dauert. 2018 wurde ein Planet im Orbit von 40 Eridani A in der habitablen Zone mit einer Masse von  $8,47 \pm 0,47$  Erdmassen entdeckt und damit als Supererde eingestuft. Im fiktiven *Star-Trek*-Universum ist 40 Eridani A die Sonne von Spocks Heimatwelt Vulkan (obwohl auch Ran = Epsilon Eridani als diese Sonne angesehen wurde).

**Gliese 667 Cc** (auch **GJ 667 Cc**) umrundet den Roten Zwerg Gliese 667 C im Dreifach-Sternsystem Gliese 667 im Sternbild Skorpion. Der Planet hat eine Mindestmasse von wenigen Erdmassen und liegt in der habitablen Zone. Mit einem bestätigten ESI-Wert von 0,84 ist er der bislang (Stand April 2015) dritterdähnlichste jemals entdeckte Planet. Das System ist 22,1 Lichtjahre von der Erde entfernt und enthält neben Gliese 667 Cc noch mindestens einen weiteren Planeten: Gliese 667 Cb.

**Fomalhaut** (von arab. Fam al-Hut, Maul des Waals,  $\alpha$  Piscis Australis) ist ein 25 Lichtjahre entfernter Dreifachstern, der Hauptstern im Sternbild südlicher Fisch, der mit seiner scheinbaren Helligkeit von 1,71 mag in der Liste der von der Erde aus am hellsten leuchtenden Sterne den Platz 18 einnimmt, die absolute Helligkeit ist 1,7 mag, Spektralklasse A3V, Oberflächentemperatur 8500 K, Leuchtkraft  $17,1 \odot$ , Masse  $2,59 \odot$ , Durchmesser  $1,86 \odot$ , B-V-Farbindex 0,09, Alter ca. 200 Mill. Jahre.

Eigentlich ein Dreifachsystem: Mit dem 0,85 Lichtjahre von Fomalhaut (= Fomalhaut A) entfernten Stern TW Piscis Austrini (= Fomalhaut B; Spektralklasse K4-5V, 6,48 mag, absol 7,07 mag, Leuchtkraft 12-13 %  $\odot$ , Masse 81 %  $\odot$ , Durchmesser 76-85 %  $\odot$ ) und dem 3,2 Lichtjahre (von der Erde aus 6°!) entfernten roten Zwerg LP876-10 (Fomalhaut C) bildet Fomalhaut ein Dreifachsystem.

Der Stern besitzt ein Staubring und in diesem einen Planeten Fomalhaut b, der dem Jupiter ähnlich ist, und vom dem direkte Aufnahmen existieren.



**GJ 367b** Einen der leichtesten und kleinsten bisher bekannten extrasolaren Gesteinsplaneten haben Astronomen nun in rund 31 Lichtjahren Entfernung im Sternbild Vela entdeckt. Die Sonne **Gliese 367 (Añañuca)** ist ein 30,7 Lichtjahre entfernter roter Zwerg mit

0,35 Sonnenmassen und 0,5-fachem Sonnenradius (Spektralklasse M1.0, Temperatur 3587 K). Der Planet GJ 367b (**Tahay**)<sup>146</sup> ist etwa so groß wie der Mars und hat nur gut die halbe Masse der Erde. Aus dem Verhältnis von Masse und Größe schließen die Forscher, dass der Eisenkern dieses Exoplaneten den größten Teil seines Inneren einnehmen muss – ähnlich wie beim Merkur macht der Kern gut 80 Prozent des Durchmessers aus. Seine Umlaufzeit beträgt 7,7 Stunden. Lebensfreundlich ist GJ 367b allerdings nicht: Weil er sehr nahe an seinem Stern, einem Roten Zwerg, kreist, liegt seine Oberflächentemperatur bei gut 1500 Grad.

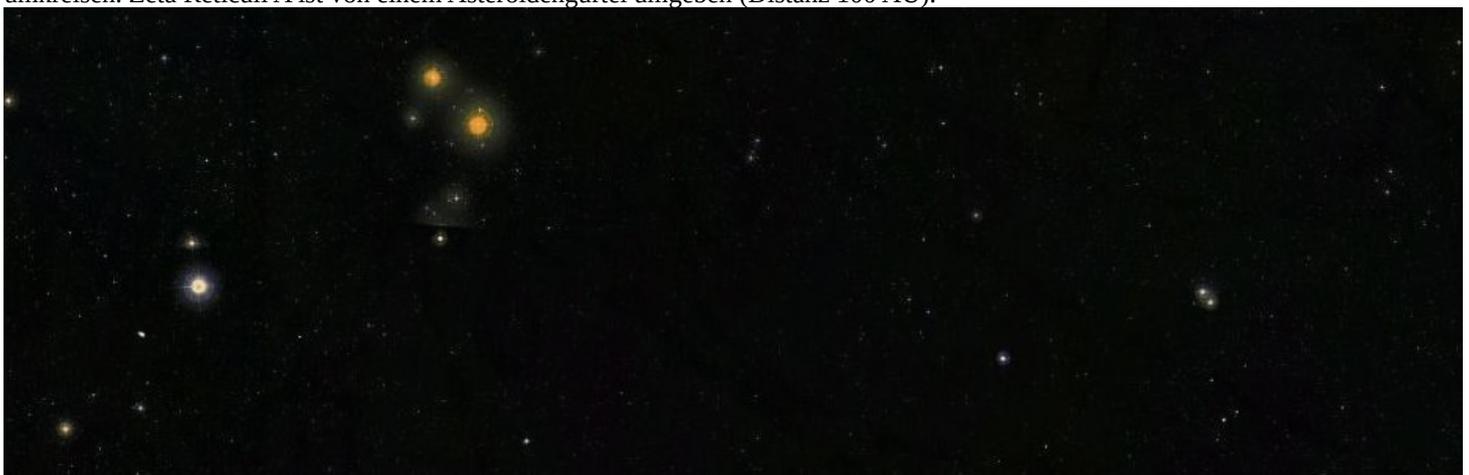
**GJ 357** ist ein 31 Lichtjahre entfernter Stern im Sternbild Hydra, der ein Drittel der Masse und Größe unserer Sonne aufweist. Der innerste, GJ 357b, wurde durch die Transit-Methode entdeckt: Er bedeckt auf seiner Umlaufbahn von uns aus gesehen den Stern und schwächt sein Licht dadurch ab. Er ist etwa 22 Prozent größer als die Erde und umkreist seinen Stern elfmal näher als der Merkur die Sonne: Er hat eine berechnete Temperatur von rund 250 Grad Celsius, und so spricht man von einer „heißen Erde“.

Der mittlere Planet, GJ 357 c, hat eine Masse, die mindestens das 3,4-Fache der Erde beträgt, und eine Gleichgewichtstemperatur um 130 Grad Celsius. Der äußerste Planet, GJ 358d, hat eine Masse von mindestens dem 6,1-Fachen der Erde und umkreist seinen Stern alle 55,7 Tage in einem Abstand von etwa 20 Prozent der Entfernung zwischen Erde und Sonne. Er hat eine Gleichgewichtstemperatur von -53 Grad Celsius; aber wenn der Planet eine dichte Atmosphäre hat, könnte er genügend Wärme einfangen, um den Planeten zu erwärmen und flüssiges Wasser auf seiner Oberfläche zuzulassen.

**Gliese 436** (Eigenname **Noquisi**, d.h. in der Cherokee-Sprache „Stern“) ist ein 31,9 Lichtjahre entfernter Stern im Sternbild Löwe der Größenklasse 10,7 mit der 0,4-fachen Masse und dem 0,4-fachen Durchmesser der Sonne (aber nur 2,5-prozentiger Leuchtkraft der Sonne): ein 7,4 bis 11 Milliarden Jahre alter (orange-roter) roter Zwergstern (der Spektralklasse M). Er hat einen Planeten Gliese 436b (Eigenname: **Awohali**, d.h. in der Cherokee-Sprache „Adler“): Ein im Jahre 2004 entdeckter Planet, der als erster mit Sicherheit als „heißer Neptun“ klassifiziert werden konnte. Er hat ähnlich wie unserem Sonnensystem Neptun die 22-fache Erdmasse und einen Durchmesser von ca. 55.000 km; seine Umlaufzeit beträgt 2,6 Tage, und er verdeckt infolge seines Umlaufs von der Erde aus gesehen regelmäßig Teile des Zentralsterns Noquisi (führt also einen sog. Stern-Transit“ aus). Sein Abstand vom Zentralstern beträgt nur 4 Millionen km (= 1/15 des Merkur-Abstands von der Sonne).

**GJ** (od: **Gliese**) **1132b** ist ein Venus-ähnlicher felsiger Exoplanet um den roten Zwergstern **Gliese 1123** in 39 Lichtjahren Entfernung. Er kreist alle 1,6 Tage in nur 2,25 Millionen Kilometern Entfernung um den Heimatstern (ist seinem Heimatstern 25 Mal näher als der Merkur der Sonne nahe ist) und schattet ihn damit ein wenig ab (verdunkelt ihn um 0,3 %), Temperatur in oberer Atmosphäre 230 Grad, auf Oberfläche vielleicht heißer als Venus, gebundene Rotation; 1,2-facher Erddurchmesser, 1,6-fache Erdmasse.

**Zeta Reticuli** ist die Bezeichnung für ein Doppelsternsystem zweier sonnenähnlicher gelber Sterne im Sternbild Netz in der Nähe des Himmelssüdpols:  $\zeta^1$  Reticuli =  $\zeta$  Reticui B (nicht: A!) und  $\zeta^2$  Reticuli =  $\zeta$  Reticui A (nicht: B!). Die Sterne sind rund 12,1 Parsec (ca. 39,5 Lichtjahre) von uns entfernt. Scheinbare Helligkeit: 5,24 mag (A) bzw. 5,54 mag (B), absolute Helligkeit: 4,83 mag (A) bzw. 5,12 mag (B), Spektralklasse G1V (A) bzw. G2.5V (B), Oberflächentemperatur 5840 K (A) bzw. 5720 (B), Leuchtkraft 1,02  $\odot$  (A) bzw. 79 %  $\odot$  (B), Masse 99 %  $\odot$  (A) bzw. 93 %  $\odot$  (B), Durchmesser 99 %  $\odot$  (A) bzw. 91 %  $\odot$  (B), Metallizität: -0,42 (A) bzw. -0,35 (B), also nur ca. 60% der Metallhäufigkeit der Sonne (besonders niedrig ist der Beryllium-Anteil), B-V-Frabinde 0,59 (A) bzw. 0,63 (B), Alter ca. 8 Mrd. Jahre (nach anderen Indizien nur 2 Mrd. Jahre), das System kommt mit 12 km/s auf uns zu. Der Winkelabstand zwischen beiden Sternen beträgt 310" (Bogensekunden), so dass Zeta Reticuli, ähnlich wie Mizar und Alkor, schon mit bloßem Auge getrennt werden kann. Dieser Winkelabstand entspricht einem Abstand von etwa 3.750 AU, so dass sie sich in mehr als 170.000 Jahren umkreisen. Zeta Reticuli A ist von einem Asteroidengürtel umgeben (Distanz 100 AU).

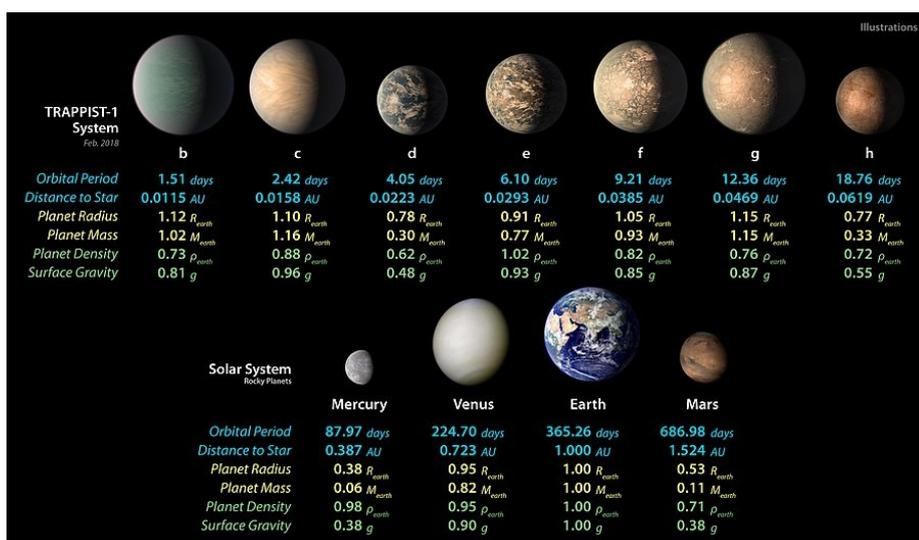


Größere Bekanntheit erlangte Zeta Reticuli in der Entführungsgeschichte von Betty und Barney Hill, in der eine von Betty Hill handgezeichnete Sternenkarte den Ursprungsort der außerirdischen Entführer zeigen soll. So entstand die Hypothese, dass eine

<sup>146</sup> Zu den Namen Añañuca und Tahay: beides sind spanische Blumennamen von chilenischen Blumen. Añañuca (*Phycella cyrtanthoides*) ist eine rote Blume, deren Farbe der Farbe des Sterns gleicht. Der Legende nach war Añañuca eine schöne junge Frau, die sich in einen Goldgräber verliebte, der in der Wüste verschwand. Sie starb aus Gram, sie wurde an einem regenreichen Tag betrauert, und als die Sonne auf ihr Grab schien, sah man dort schöne rote Blumen, die nach ihr benannt wurden. Tahay (*Calydorea xiphioides*) ist eine blaue Blume, die nur 7 bis 8 Stunden im Jahr blüht, entsprechend der Umlaufzeit des Planeten von 7,7 Stunden.

außerirdische Spezies, die als Greys bezeichnet wird, von Zeta Reticuli stammen könnte. Das Planetensystem von Zeta<sup>2</sup> Reticuli ist in den Science-Fiction-Filmen *Alien – Das unheimliche Wesen aus einer fremden Welt*, *Aliens – Die Rückkehr* und *Prometheus – Dunkle Zeichen* der Schauplatz des Geschehens.

**Trappist-1** ist ein etwa 40 Lichtjahre von der Erde entferntes Planetensystem im Sternbild Wassermann knapp nördlich der Ekliptik. Nachdem zunächst nur der Zentralstern, ein massearmer Roter Zwerg (ein ultrakühler Zwerg), 1999 beim Two Micron All Sky Survey entdeckt worden war und die Katalogbezeichnung 2MASS J23062928-0502285 erhalten hatte, wurde das Planetensystem nach der weiteren Erforschung mit dem *Transiting Planets and Planetesimals Small Telescope* (TRAPPIST) am La-Silla-Observatorium in Chile *Trappist-1* benannt. Der Zentralstern hat Größenklasse 18,8 mag, Er besitzt nur etwa ein Zwölftel der Masse und ein Neuntel des Durchmessers der Sonne. Seine Oberflächentemperatur liegt bei etwa 2550. Sein Alter wird auf  $7,6 \pm 2,2$  Milliarden Jahre geschätzt. Ein Team von Astronomen unter der Führung von Michaël Gillon vom *Institut d’Astrophysique et Géophysique* an der Universität Lüttich in Belgien fand 2016 heraus, dass dieser dunkle und kühle Stern in regelmäßigen Abständen leicht an Helligkeit abnimmt, was darauf hindeutet, dass mehrere Objekte zwischen dem Stern und der Erde vorbeiziehen. Erste Untersuchungen ergaben über die Transitmethode zunächst Hinweise auf drei erdähnliche Planeten, die den Stern umkreisen. Am 22. Februar 2017 gab die NASA die Entdeckung weiterer vier erdähnlicher Planeten bekannt. Die Entdeckung war das Ergebnis wochenlanger Beobachtung von Trappist-1 mit Hilfe des Spitzer-Weltraumteleskops. Da von uns aus gesehen seine sieben Planeten vor ihm durchgehen können, steht unser eigenes Sonnensystem sehr präzise in der Bahnebene seiner Planeten (das gleiche gilt zufälligerweise auch umgekehrt, denn der Stern steht ganz in der Nähe der Ekliptik, aber nicht so nahe, dass er um den 5. März für Beobachter auf der Erde von der Sonne verdeckt würde) und damit stehen wir wahrscheinlich auch näherungsweise in der Äquatorebene des Sterns. Eine weitere Besonderheit ist, dass Trappist-1 für Beobachter auf der Erde mit einer relativ schnellen Eigenbewegung von 1,04 Bogensekunden/Jahr über den Himmel wandert. In Verbindung mit seiner Radialgeschwindigkeit von  $-56$  km/s bedeutet dies, dass der Stern sich im Raum mit einer Geschwindigkeit von 82 km/s relativ zu unserer Sonne schräg an uns vorbei bewegt. Unter Beibehaltung dieser Bewegung wird der Stern nach etwa 100.000 Jahren seine größte Annäherung an die Sonne erreichen und dann nur noch etwa 29 Lichtjahre entfernt sein. Er wird in seiner größten Nähe aber nur unwesentlich um 0,6 mag heller erscheinen. Die beiden innersten Planeten haben Umlaufperioden von etwa 1,5 und 2,4 Tagen, die des siebten Planeten liegt im Bereich von 20 Tagen. Die Entfernungen zu ihrem Stern liegen zwischen einem Hundertstel und einem Zwanzigstel des Abstands der Erde zur Sonne. Der Aufbau dieses Planetensystems ähnelt somit eher dem System der Jupitermonde als unserem Sonnensystem. Die Planeten umkreisen Trappist-1a vermutlich in einer gebundenen Rotation. Neben einer 1:1-Konstellation wie beim System Erde-Mond, bei welcher der Satellit seinem Muttergestirn stets die gleiche Seite zuwendet, sind aber auch Konstellationen einer Spin-Orbit-Resonanz, z.B. 3:2 oder 5:3, denkbar. Bei einer 1:1-Konstellation würde ein Planet der Sonne stets die gleiche Seite zeigen, was zu extremen Temperaturdifferenzen führen kann. Bei einer dichten Atmosphäre würden diese durch starke Winde wieder etwas ausgeglichen werden und Leben wäre vor allem an der Tag-Nacht-Grenze möglich. Eine Spin-Orbit-Resonanz hätte nicht so gravierende Auswirkungen. Da der Stern jedoch wesentlich lichtschwächer als die Sonne ist, erhalten die inneren zwei Planeten trotz ihrer Nähe zum Stern nur das Vier- bzw. Zweifache der Menge an Strahlung, die auf die Erde trifft. Dennoch befinden sich diese beiden näher am Stern als die habitable Zone dieses Systems. Es ist jedoch möglich, dass auf ihren Oberflächen bewohnbare Regionen existieren. Das kombinierte Transmissionsspektrum von Trappist-1 b und c ergab eine wolkenfreie, wasserstoffbasierte Atmosphäre für diese beiden Planeten. Bei den Planeten Trappist-1 e, f und g geht die NASA davon aus, dass sie sich in der habitablen Zone befinden. Da Rote Zwerge weitaus älter werden als sonnenähnliche Sterne, hätte Leben auf Planeten von ihnen auch weitaus mehr Zeit, sich zu entwickeln. Der an der Entdeckung beteiligte Astronom Michaël Gillon sieht mit Trappist-1 vergleichbare Systeme als die vielversprechendsten Kandidaten für mögliches Leben.



**Copernicus (= 55 Cancri)** ist ein 40,9 Lichtjahre entferntes Doppelsternsystem im Sternbild Krebs, wobei beide Sterne relativ sonnenähnlich sind:

55 Cancri A hat Spektralklasse G8V, Durchmesser 0,96  $\odot$  Masse 0,95  $\odot$ , Leuchtkraft 0,69  $\odot$ , scheinbare Helligkeit 5,59 mag.

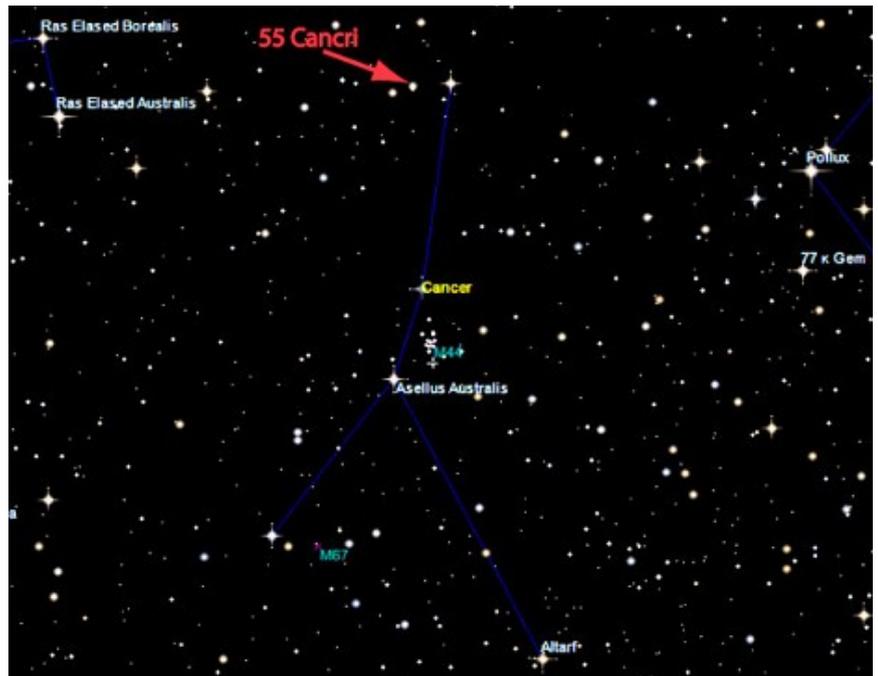
55 Cancri B hat M3,5-4V, Durchmesser 0,30  $\odot$  Masse 0,13  $\odot$ , Leuchtkraft 0,0076  $\odot$ , scheinbare Helligkeit 13,15 mag.

Komponente A wird von fünf Planeten umkreist: Der innerste Planet 55 Cancri e (entdeckt 2004) ist eine Supererde (Gesteinsplanet, größer als die Erde: in diesem Fall doppelt so groß und achtmal so massiv) mit extremen Temperaturschwankungen: Temperaturen auf der Tageseite schwanken zwischen 1000 und 2700° C; der Planet steht seiner Sonne so nahe (0,02 AE), dass er sich in 18 Stunden (0,7365 Tagen) umkreist. Er besteht weitgehend aus Kohlenstoff, so dass man über einen „Diamandplaneten“ spekuliert hat; dazu passen aber die Temperaturschwankungen nicht.

Der zweitinnerste Planet 55 Cancri b (entdeckt 1996) hat 0,8 Jupitermassen, Entfernung 0,12 AE

und Umlaufzeit 14,65 Tage; der dritte Planet 55 Cancri c (entdeckt 2002) hat 0,2 Jupitermassen, Entfernung 0,24 AE und Umlaufzeit 44 Tage; der vierte Planet 55 Cancri f (entdeckt 2007) hat 0,1 Jupitermassen (halbe Saturnmasse), Entfernung 0,78 AE und Umlaufzeit 260 Tage; er liegt in der habitablen Zone, d.h. des könnte auf ihm (oder einem ihn unkreisenden Mond) flüssiges Wasser geben.

Der fünfte Planet 55 Cancri d (entdeckt 2002) hat 3,8 Jupitermassen, Entfernung 5,77 AE und Umlaufzeit 5218 Tage (14 Jahre). ER ist ein „echter Jupiter“ wie der Jupiter in unserem Sonnensystem und könnte eine stabilisierende Wirkung wie dieser haben.



**51 Pegasi** ist ein Gelber Zwerg, der 50,9 Lichtjahre entfernt ist, und welcher der erste sonnenähnliche Stern war, um den ein Planet (sog. Hot Jupiter) entdeckt wurde (1995). Scheinbare Helligkeit: 5,49 mag, absolute Helligkeit: 4,51 mag, Spektralklasse G5V, Oberflächentemperatur 5571 K, Leuchtkraft 1,3  $\odot$ , Masse 1,11  $\odot$ , Durchmesser 1,237  $\odot$ , Metallizität: 0,2, B-V-Frabindeks 0,67, Alter ca. 6,1-8,1 Mrd. Jahre, das System kommt mit 33,7 km/s auf uns zu.

Die Entdeckung des 51 Pegasi umkreisenden Planeten 51 Pegasi b (inoffiziell Bellerophon genannt, nach dem Bezwinger des Pegasus) wurde am 6. Oktober 1995 von den Schweizer Astronomen Michel Mayor und Didier Queloz bekannt gegeben. Er ist der Prototyp der Klasse der „heißen Jupiter“, hat die Hälfte der Jupitermasse, aber einen doppelt so großen Durchmesser wie Jupiter, er umreist seine Sonne in 4,23 Tagen in



einem Abstand von 0,05 AU (7,8 Mill. km, kleiner als der Abstand des Merkur von der Sonne). Seine Temperatur ist ca. 1000°. Mit dem HARPS-Instrument (dem „High Accuracy Radial velocity Planet Searcher“ - Spektrographen) am 3,6 m La Silla-Teleskop der Europäischen Südsternwarte (ESO = European Southern Observatory) wurde 2015 erstmal sein Spektrum im sichtbaren Licht bestimmt. Die Umlaufbahn ist um 9° gegenüber der Ekliptik geneigt.

**HD 189733 (V452 Vulpeculae)** ist ein Gelber Zwerg, der 63 Lichtjahre entfernt ist und um den der uns am nächsten gelegene nachgewiesene nicht zu unserem Sonnensystem gehörige Planet (alias Exoplanet) kreist, bei dem sich ein Transit beobachten lässt. Er befindet sich in dem Sternbild Vulpecula (Fuchs) und wird von mindestens einem Planeten, HD 189733 b, umkreist. Scheinbare Helligkeit 7,67 mag, absolute Helligkeit 6,2 mag, Spektralklasse G5, Oberflächentemperatur 5000 K, Leuchtkraft 33 %  $\odot$ , Masse 81 %  $\odot$ , Durchmesser 76 %  $\odot$ , Rotation 34d, Alter über 600 Mill. Jahre, kommt mit 2,7 km/s auf uns zu.

Er hat als Begleiter einen roten Zwerg HD 189733 B mit 10 mag, der ihn in 216 AU Abstand in 3200 Jahren umkreist. Nachgewiesen ist auch ein planetarer Begleiter HD 189733 b mit 1,15-facher Jupitermasse, der in einem Abstand von 0,04 AU in 2,2 Tagen den Zentralstern umkreist.

HD 189733 b ist der erste Planet außerhalb des Sonnensystems (Exoplanet), auf dem Wasser und Methan – und damit eine organische Verbindung – gefunden wurden. Durch die hohe Temperatur an der Oberfläche (etwa 900 Grad Celsius) befindet sich das Wasser aber in gasförmigem Zustand. Über kaum einen Exoplaneten ist so viel bekannt wie über den Gasriesen HD 189733 b, was daran liegt, dass der Planet – von der Erde aus gesehen – regelmäßig vor seinem Stern vorbeizieht, es sich bei dem Planeten also um einen Transitplaneten handelt. Durch eine Infrarotuntersuchung während des Transits konnte mit dem Spitzer-Weltraumteleskop bei einem Infrarotband von 3,6 Mikrometern eine geringere Absorption festgestellt werden als erwartet (IR-Spektroskopie mit dem IR-Spektrometer Nicmos, von englisch *Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer*). Dieses Verhalten kann nur durch das

gleichzeitige Vorhandensein von Wasser- und Methanmolekülen in der Planetenatmosphäre erklärt werden. Die Ergebnisse von Spitzer wurden durch das Hubble-Weltraumteleskop mittlerweile bestätigt.

Astronomen haben mithilfe des Weltraumteleskops Hubble auch erstmals die tatsächliche Farbe eines extrasolaren Planeten bestimmt: Aus der Nähe betrachtet, würden wir den Planeten HD 189733b als dunkelblaue Welt wahrnehmen. Das Aussehen des Gasriesen ähnelt also dem der Erde. Allerdings hören damit die Gemeinsamkeiten auch schon auf. Der Transit hat es den Astronomen erlaubt, die Atmosphäre der fernen Welt zu untersuchen, die sich als sehr exotisch herausstellte. Zudem vermutet man heftige Winde mit Geschwindigkeiten von bis zu 7.000 Kilometern pro Stunde und einen stürmischen Regen aus kleinen Glaspartikeln.

**TOI-270** ist ein 73 Lichtjahre entferntes Sternsystem im Südsternbild Maler, in dem drei Planeten entdeckt wurden:<sup>147</sup> Die Sonne ist ein ruhiger (eruptionsarmer) Zwergstern der Spektralklasse M der Größenklasse 8,3; der innerste Planet, TOI-270b, benötigt ca. 3 Tage für einen Umlauf um seinen Stern und könnte mit einer Größe von rund 1,2 Erdradien zu den steinigen Supererden gehören. Der nächstäußere Planet, TOI-270c, hat eine Orbitalperiode von 5,6 Tagen und eine Größe von 2,4 Erdradien. Der äußerste Planet, TOI-270d, benötigt elf Tage für einen Umlauf und ist 2,13 Erdradien groß. Die beiden letzten Planeten sind sog. Sub-Neptune.

**HR 8799** (= HD 218396 = V342 Pegasi) ist eine 129 Lichtjahre entfernte Sonne mit scheinbarer Helligkeit 5,96 mag, absoluter Helligkeit: 3,0 mag, Spektralklasse A5V, Oberflächentemperatur 7430 K, Leuchtkraft 4,9  $\odot$ , Masse 1,56  $\odot$ , Durchmesser 1,5  $\odot$ , Metallizität: -0,47, Alter 30 Mill Jahre.

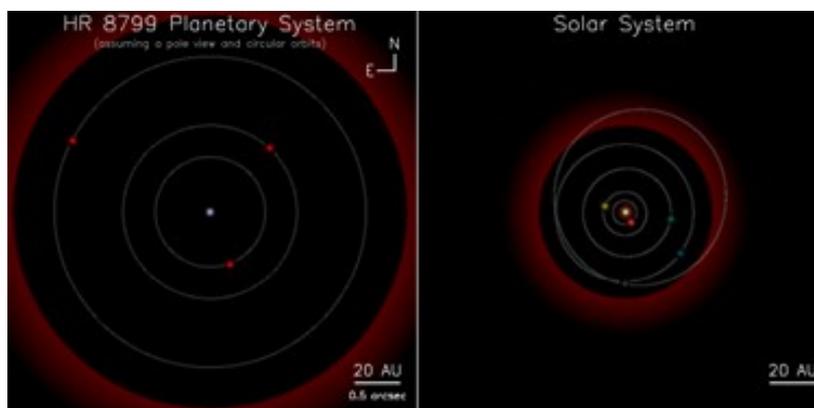
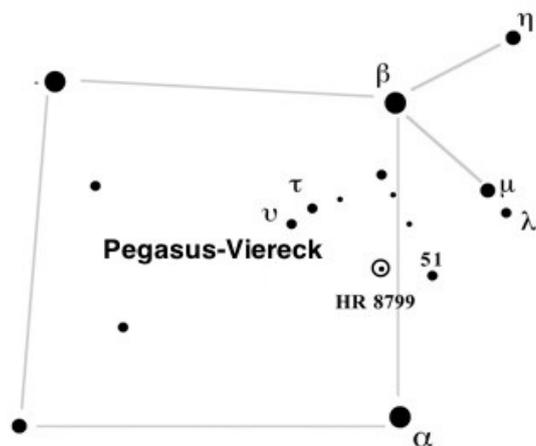
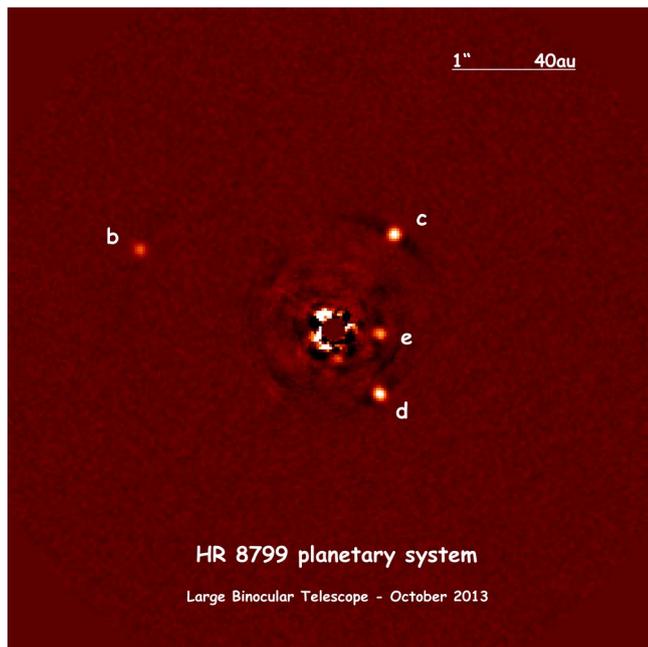
Der Stern besitzt vier jupiterähnlichen Planeten, die direkt optisch (im Infraroten) abgebildet werden konnten. Bisher (Mai 2015) konnten 54 Exoplaneten in 50 Sternsystemen durch direkte Abbildungen nachgewiesen werden.

HR 8799 b (entdeckt 2008) hat 7 Jupitermassen und 1,2-fachen Jupiterdurchmesser und umkreist den Stern in 68 AU Abstand in 449,7 Jahren. Dieser Planet wurde spektroskopisch untersucht und man fand Moleküle von Methan, Acetylen, Ammoniak, Wasser und Kohlenmonoxid.

HR 8799 c (entdeckt 2008) hat 5-10 Jupitermassen und einen 1,2-1,3-fachen Jupiterdurchmesser, umkreist den Stern in 38 AU Abstand in 190 Jahren. Im Spektrum fand man Ammoniak, Acetylen, Wasser und Kohlenmonoxid, aber kein Methan.

HR 8799 d (entdeckt 2008) hat 5-10 Jupitermassen und einen 1,2-1,3-fachen Jupiterdurchmesser, umkreist den Stern in 24 AU Abstand in 100 Jahren. Im Spektrum fand man Acetylen, Methan und Kohlendioxid, aber kein Ammoniak.

HR 8799 e (entdeckt 2010), der innerste Planet, hat 7-9 Jupitermassen und einen 1,2-fachen Jupiterdurchmesser, umkreist den Stern in 14,5 AU Abstand und umkreist den Stern in 50 Jahren. Im Spektrum fand man Methan und Acetylen, aber kein Ammoniak. 2019 konnte mit Interferometrie-Technik ein direktes Spektrum aufgenommen werden (das Licht von vier 8-m-Teleskopen der Europäischen Südsternwarte wurde zusammengebracht, was ein Teleskop mit einem 100-m-Spiegel simuliert; die Spektren von Stern und Planet werden zugleich beobachtet, und dann das Spektrum des Planeten herausgerechnet). Es zeigte sich, dass der Planet mehr Kohlenmonoxid als Methan enthält, was unerwartet ist. Zur Erklärung wird spekuliert, dass heftige Stürme in der Atmosphäre existieren, die Wolken aus Silikat- und Eisenpartikeln heruntreiben, die sich auflösen und ins Innere regnen. Die Temperatur liegt bei 880 Grad Celsius.



**PSR 1257+12**, ist ein 980 Lichtjahre entfernter am 9. Februar 1990 durch den polnischen Astronomen Aleksander Wolszczan

<sup>147</sup> Vgl. <https://www.nature.com/articles/s41550-019-0845-5> / gelesen am 31. Juli 2019

entdeckter Pulsar im Sternbild Jungfrau mit Rotationsperiode 6,219 Millisekunden, 1,4 Sonnenmassen, 0.002 % Sonnendurchmesser, und einem Altern von 800 Millionen Jahren. 1992 entdeckte Wolszczan zwei Planeten, die ihn umkreisen; dies waren die ersten Planeten außerhalb unseres Sonnensystems (Exoplaneten) überhaupt. Einen dritten Planet des Pulsarsystems entdeckte er 1994. Auch gab es Anzeichen für einen weiteren Planeten, Zwergplaneten oder Kometen, aber dies ist nicht sicher. Im einzelnen sind gesichert:

1. PSR 1257 + 12 A oder PSR 1257 + 12 b (am 22. April 1994 entdeckter Planet): 0,02 Erdmassen, Entfernung 0,19 AU, Umlaufzeit 25,3 Tage, Exzentrizität 0, Inklination 50°;
2. PSR 1257 + 12 B oder PSR 1257 + 12 c (am 22. Januar 1992 entdeckter Planet): 4,3 Erdmassen, Entfernung 0,36 AU, Umlaufzeit 66,5 Tage, Exzentrizität 0,02, Inklination 53°.
3. PSR 1257 + 12 B oder PSR 1257 + 12 c (am 22. Januar 1992 entdeckter Planet): 3,9 Erdmassen, Entfernung 0,46 AU, Umlaufzeit 98,2 Tage, Exzentrizität 0,03, Inklination 47°.

**Kepler-62e** und **62f** sind zwei vielleicht mehr oder weniger erdähnliche Planeten von insgesamt 4 Planeten, die den Stern Kepler-62 im Sternbild Leier in 1200 Lichtjahren Entfernung in der habitablen Zone umkreisen und durch das Kepler-Weltraumteleskop mit der Transitmethode entdeckt wurden.

### 3. Galaxien und größere Einheiten

Viele Sterne bilden größere Einheiten, mehrere oder weniger dichte „Sterninseln“, von denen viele mit bloßem Auge oder auch mit Teleskopen wie kleine Nebel aussehen; man spricht auch von „Stern-Nebeln“. Charles Messier († 1817) stellte einen ersten Katalog von Nebeln am Sternhimmel zusammen, von denen manche tatsächlich aus Gas- und Staubpartikeln zusammengesetzte Nebel sind, andere aber Sternansammlungen. Die insgesamt 110 Messier-Objekte werden mit „M 1“ bis „M 110“ bezeichnet. Genauer unterscheidet man echte Nebel, Galaxien (große Sternensinseln im All) und Sternhaufen (mehr oder weniger dichte Anhäufungen von Sternen *innerhalb* einer Galaxis). Eine umfassendere Katalogisierung enthält der *New General Catalogue of nebulae and clusters of stars* (NGC) von 1888, der 7840 Objekte auflistet, die mit „NGC 1“ bis „NGC 7840“ bezeichnet werden, darunter auch die meisten Messier-Objekte.

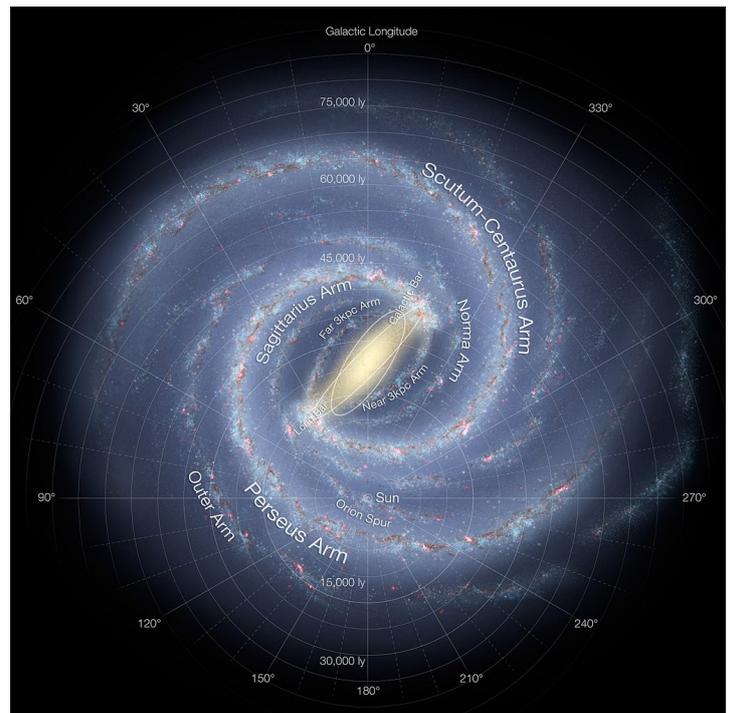
Das bekannteste mit bloßem Auge nebelartig wirkendes Objekt am Sternhimmel ist indes das sog. „Band der Milchstraße“, die sich über den ganzen Himmel zieht (benannt nach der griechischen Mythologie, wonach der Held Herakles, als er einst Säugling von der Göttin Hera gesäugt wurde, so stark sog, dass Hera Schmerzen empfand und das Kind von sich stieß; dabei spritzte die Milch über den Himmel und bildete das Band der himmlischen „Milchstraße“, griech: „ho Galaxias“).



Milchstraßenband (Zeichnung)

Das Band am Himmel, das wir wie die Griechen als „Band der Milchstraße“ bezeichnen, hat von der Erde aus gesehen die Gestalt eines schmalen konzentrischen Ringes, der die Erde umgibt; dies ist in Wirklichkeit die Hauptebene einer riesigen Sternens-Insel, zu der auch unsere Sonne samt der Erde dazu gehört, und mit der Sonne auch alle anderen mit bloßem Auge sichtbaren Sterne. Diese Sternens-Insel nennen wir „die Milchstraße“ oder „*unsere Galaxie*“ oder „*unsere Galaxis*“; dazu gehören insgesamt ca. 200–400 Milliarden Sterne.

Unsere Galaxie ist von außen gesehen eine flache Scheibe mit einem dichten Kern oder Wulst (*Bulge* genannt, d.h. engl. „Ausbauchung“), der die Form eines langgestreckten Balkens hat; und mit vier großen nebst einigen kleineren von diesem Balken ausgehende *Spiralarmen*. Bulge und Spiralarme bestehen aus Sternansammlungen; alle diese Sterne kreisen um den Mittelpunkt der Galaxis. Ihre Durchmesser beträgt ca. 100.000 Lichtjahre, während die Dicke der galaktischen Scheibe nur 1000 Lichtjahre (am Rand) bis 15.000 Lichtjahre (in der Mitte) beträgt. Das Sonnensystem befindet sich in einem Abstand von 25.000 – 28.000 Lichtjahren vom Zentrum in einem Neben-Spiralarm, dem sog. *Orion-Arm*, inmitten einer weitgehend staubfreien Zone, der *Lokalen Blase*, nördlich der Mittelebene der Galaxis. Das Zentrum der Galaxis liegt im Sternbild Schütze, dort ist ein supermassives schwarzes Loch (genannt Sagittarius A\*), um welches die Sterne der Galaxis kreisen (allerdings nicht in störungsfreien Ellipsenbahnen, sondern eher wie ein Bienenschwarm, da diese Bahnen durch gegenseitige Anziehung der Sterne gestört werden. Unsere Sonne braucht für einen Umlauf ca. 225 Millionen Jahre (sog. *galaktisches Jahr*). Da die Sonne vor 4,567 Milliarden Jahren entstand, befindet sie sich jetzt in ihrem 20-ten galaktischen Jahr. Zur Milchstraße gehört neben Bulge und Spiralarmen noch der sog. *Halo* (griech. Lichthof): der Bereich über und unter der galaktischen Scheibe innerhalb einer Kugel mit dem Bulge als Mittelpunkt, welche einen Durchmesser von 150.000 Lichtjahren hat und somit auch die ganze Scheibe vollständig umfasst. In diesem Halo sind nur wenige Sterne, und die meisten von ihnen gehören zu sog. *Kugelsternhaufen*:



Milchstraße, Aufsicht (rekonstruiert)



Milchstraße, Seitenansicht (rekonstruiert)  
Kugelsternhaufen M22 (Sternbild Schütze)

Innerhalb der Galaxis gibt es zwei unterschiedliche Arten von Sternhaufen (besonders dichten Anhäufungen von Sternen auf einem Raum von ca. 20 bis 150 Lichtjahren): Kugelsternhaufen und offene Sternhaufen.

**Kugelsternhaufen** sind kugelförmige Sternhaufen, die sehr dicht mit sehr vielen Sternen (typischerweise etwa 100.000) angefüllt sind; die Sterndichte im Zentrum eines Kugelsternhaufens ist 20.000 mal größer als die Sterndichte in der Umgebung unserer Sonne. In der Milchstraße kennt man ca. 150 solche Sternhaufen, die meisten befinden sich im Halo in der Nähe des galaktischen Bulges. Die Sterne eines Kugelsternhaufens sind gleich alt (also zugleich entstanden) und zwar sehr alt, weil es in ihnen kein oder nur sehr wenig interstellares Gas gibt, aus dem neue Sterne entstehen. Freiaugig sind als sternähnliche Objekte sichtbar sie Kugelsternhaufen M 22 im Schützen und M 13 im Herkules.

**Offene Sternhaufen** sind lockere Sternverbände (mit einigen 10 bis einigen 1000 Sternen), die sehr jung (Alter nur einige Millionen Jahre) sind und sich in den Sternentstehungsgebieten der Galaxis, also in den Spiralarmen, befinden. In der Milchstraße kennt man bisher ca. 1000, aber die Gesamtzahl könnte um das Zehnfache größer sein.



Kugelsternhaufen M22  
im Schützen



Kugelsternhaufen M13  
im Herkules



offener Sternhaufen M 45:  
die Plejaden im Stier



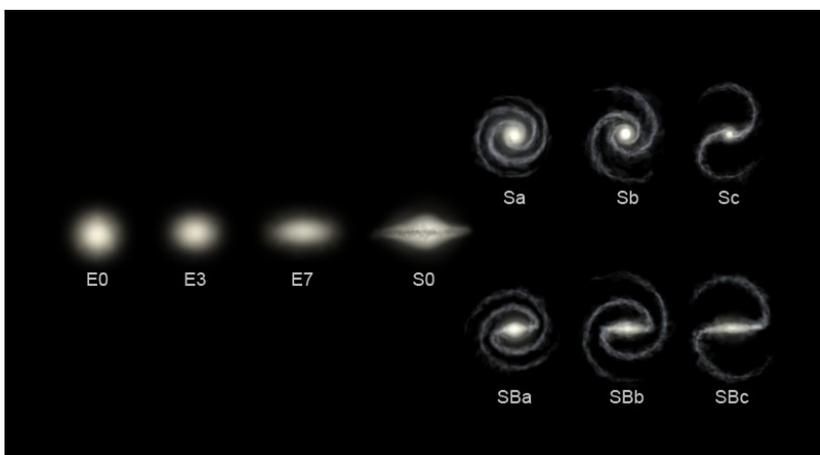
offener Sternhaufen M44:  
die Praesepe (Krippe) im Krebs

Beispiele für freiaugig sichtbare offene Sternhaufen sind die *Plejaden* (das sog. *Siegengestirn* M 45 im Stier: von ihm sind ca. sieben Sterne mit bloßem Auge zu sehen), die *Hyaden* (ebenfalls im Stier, sie bilden zusammen mit dem Hauptstern des Stieres, Aldebaran – der selbst nicht zu den Hyaden gehört – das „V“ des Stierkopfes) und die *Praesepe* (M 44 im Krebs, bei klarem Nachthimmel freiaugig als Nebel sichtbar). Nach einigen Millionen Jahren lösen sich offene Sternhaufen wieder auf; die Sterne sind nicht mehr gravitativ aneinander eng gebunden; sie bilden aber immer noch eine Gruppe, die sich in etwa in dieselbe Richtung bewegt; man spricht dann von einem *Bewegungshaufen*; Beispiel ist der *Bärenstrom* (zu dem die meisten hellen Sterne im großen Wagen/Bären gehören – bis auf den ersten und letzten Stern im Großen Wagen, nämlich Alpha und Eta, d.h. Dubhe und Alkaid)).

Im All gibt es ca. 1 Billion unserer Milchstraße ähnliche Sternensinseln, die man **Galaxien** nennt; neben *Spiralgalaxien* (die unserer Milchstraße gleichen) gibt es *elliptische Galaxien* ohne Spiralarme und auch ohne jede andere deutliche innere Struktur (da Spiralarme die Sternentstehungsgebiete sind, gibt es in elliptischen Galaxien keine oder kaum noch solchen Gebiete und folglich nur oder überwiegend alte, langsam ausbrennende Sterne; elliptische Galaxien sind mit durchschnittlich 160.000 Lichtjahren Durchmesser die größten Galaxien im All, sie sind in der Regel größer als unsere Milchstraße) sowie *irreguläre Galaxien* ohne besondere Form. Eine genauere Klassifikation der Galaxien nach der 1936 von Edwin Hubble aufgestellten Hubble-Sequenz ist die Folgende:

1. elliptische Galaxien E0, E1, E2, E3, E4, E5, E6 und E7, wobei die Zahl angibt, wie weit die elliptische Form der Galaxie von der Kreisform abweicht (E0 = kreisförmig bis E7 = langgestreckte Ellipsenform);
2. normale Spiralgalaxien Sa, Sb, Sc, nach Hubble fügte man noch Sd hinzu: Bis zur Sd-Galaxie wird der kreisförmige Bulge immer kleiner und unauffälliger, die Spiralarme lockern sich auf und werden bruchstückhaft, bis sie kaum mehr zu erkennen sind
3. Balken-Spiralgalaxien SBa, SBb, SBc, und später auch SBd: sie entsprechen Sa, Sb, Sc, Sd, abgesehen davon, dass der Bulge nicht kreisförmig, sondern balkenförmig (oder zylinderförmig) ist. Es gibt noch die Sonderform S0 oder SB0, bei denen der Bulge linsenförmig ist; dies ist eine Übergangsform von Spiralarmgalaxien zu elliptischen Galaxien;
4. mit Ir oder Irr werden die irregulären Galaxien abgekürzt:

Unsere Milchstraße ist vermutlich vom Typ zwischen SBc und SBd, wofür man auch schreibt: „Typ SBcd“



In einem Umkreis von ca. 30 Millionen Lichtjahren um die Milchstraße herum sind ca. 34 Prozent der Galaxien Spiralgalaxien, 13 Prozent elliptische Galaxien und 53 Prozent irreguläre Galaxien und Zwerggalaxien.

Im Mittelpunkt bzw. Kernbereich großer Galaxien befindet sich ein supermassives Schwarzes Loch.

**Aktive Galaxien:** Zur Klasse der aktiven Galaxien gehören die schwächeren **Seyfertgalaxien** (von Carl K. Seyfert erstmals 1943 beobachtet) und die stärker leuchtenden **Quasare** (1960 entdeckt: „Quasi-stellar radio sources“, „Quasi-stellare Radioquellen“; Quasare heißen so, weil sie im sichtbaren Bereich des Lichts wie ein Stern nahezu punktförmig erscheinen und große Energiemengen in anderen Wellenlängenbereichen ausstrahlen, z.B. Radiowellen; Quasare sind weit entfernte aktive Galaxien, die nächsten sind ca. 600 Millionen Lichtjahr entfernt). Nur kurzzeitig hell leuchtende Phänomene wie Supernovae und die bisher nicht einheitlich und allgemein überzeugend erkläraren **Gammastrahlen-Blitze** können noch heller sein als Quasare. Eine aktive Galaxie unterscheidet sich von anderen Galaxien dadurch, dass das Schwarze Loch in ihrem Mittelpunkt mit der Zeit an Masse zunimmt, da Materie aus der umgebenden Galaxie (interstellares Gas oder zerrissene Sterne) durch die Gravitation des Schwarzen Loches angezogen wird. Dieser Vorgang des Anammelns von Materie wird in der Astronomie Akkretion genannt. Um das Schwarze Loch herum bildet sich dabei eine Akkretionsscheibe, die sich durch Reibung aufheizt, wobei gleichzeitig Teile der Materie Drehimpuls verlieren und so in das Schwarze Loch fallen können. Die Emission der aufgeheizten Akkretionsscheibe ist das, was man als typische Strahlung des Quasars beobachtet. Sie kann eine Leuchtkraft ähnlich der von vielen Milliarden Sternen erreichen und somit mehr Licht abstrahlen als die gesamte umgebende Wirtsgalaxie. Die leuchtkräftigsten Quasare erreichen bis über  $10^{14}$ -fache Sonnenleuchtkraft.

Von den Galaxien sind viele zu **Galaxienhaufen** (engl. **Clusters**) zusammengefasst; und viele dieser Galaxienhaufen sind wiederum zu **Superhaufen** (engl. **Superclusters**) zusammengefasst; und viele Superhaufen schließlich zu **Superhaufen-Komplexen** (engl. **Supercluster-Complexes**) oder **Filamenten**.

Der kleine Galaxiehaufen, zu dem unsere Milchstraße gehört, heißt der **Lokale Haufen** (*Local Cluster*) und bestehend aus **drei großen Galaxien** und ca. **sechzig Zwerg-Galaxien**; die Form des Lokalen Haufens ist ein Ellipsoid mit einem Durchmesser von ca. 5 bis 8 Millionen Lichtjahren.

Die **drei großen Galaxien** darin sind unsere Milchstraße, die ca. 2,5 Millionen Lichtjahre entfernte etwas größere **Andromeda-Galaxie** (M 31 = NGC 224), die mit bloßem Auge als kleiner elliptischer Nebelfleck im Sternbild Andromeda sichtbar ist (es ist aber wie die Milchstraße eine Spiralgalaxie, keine elliptische Galaxie), und der etwas kleinere ebenfalls spiralförmige **Triangulum-Nebel** im Sternbild Dreieck (M 33 = NGC 598). Die von der Ausdehnung der größte Galaxis der Lokalen Gruppe ist Andromeda, aber die massereichste ist die Milchstraße.

Von den **Zwerggalaxien** umkreisen die meisten eine der großen drei Galaxien und heißen deshalb deren **Satelliten-Galaxien**; die wichtigsten Sateliten-Galaxien der Milchstraße sind die zwei im Südhimmel mit bloßem Augen sichtbaren irreguläre galaktischen Sternnebel, die man „**Große Magellansche Wolke**“ (170.000 Lichtjahren entfernt mit ungefähr 15 Milliarden Sternen, die viertgrößte Galaxis der lokalen Gruppe, im Sternbild Schwertfisch/Tafelberg), und die „**kleine Magellansche Wolke**“ (= NGC 292, 200.000 Lichtjahre entfernt mit ungefähr 5 Milliarden Sternen, im Sternbild Tucan) nennt.

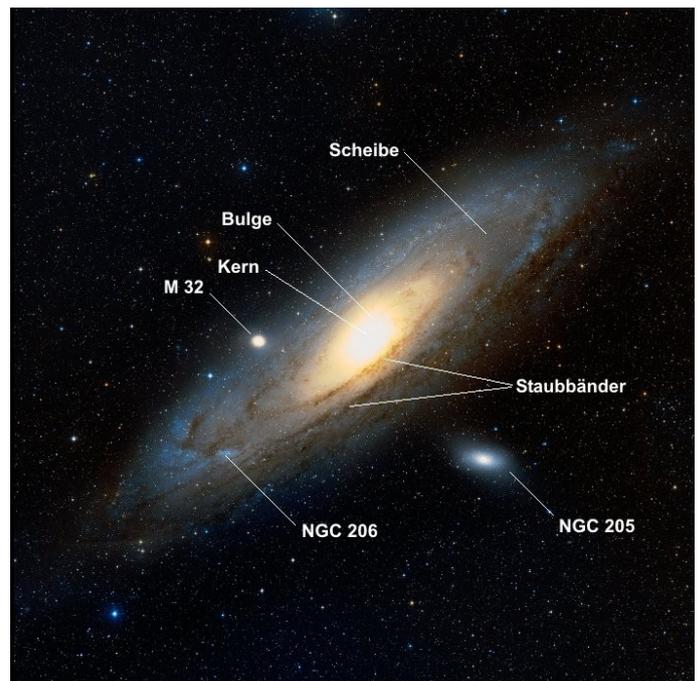
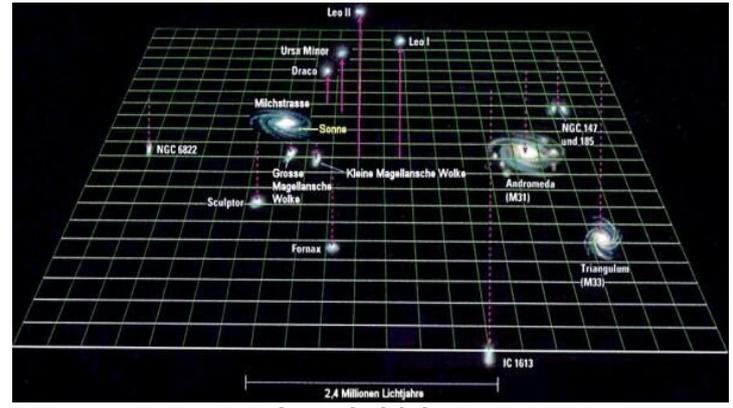


Foto unserer Nachbargalaxie M 31, die der Milchstraße sehr ähnlich ist. NGC 205 und M 32 sind kleinere Satelliten-Galaxien in der Nähe der Andromeda-Galaxie, die diese umkreisen. NGC 206 ist ein dichtes Sterngebiet innerhalb der Andromeda-Galaxie.

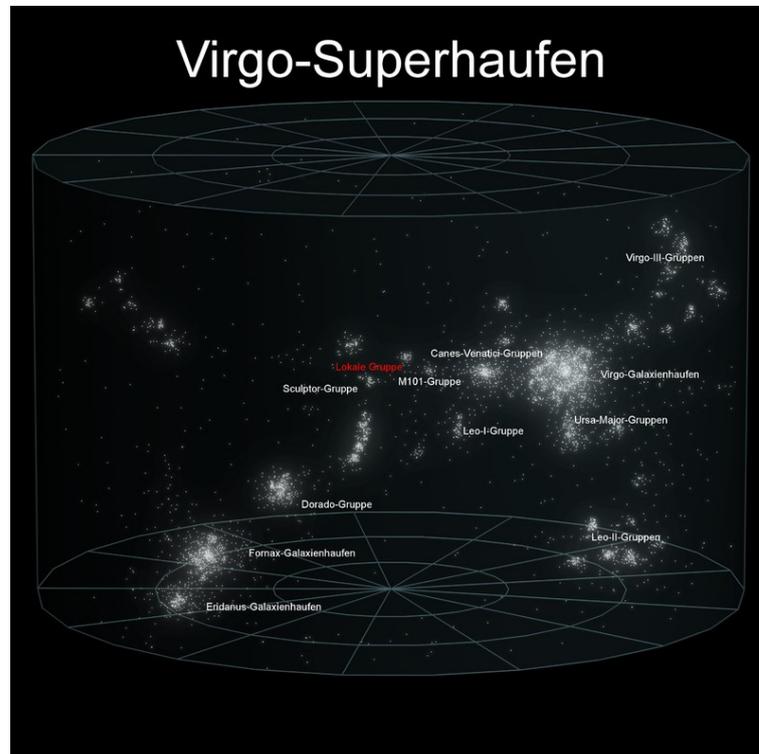


Die zwei Magellanschen Wolken von der Erde aus



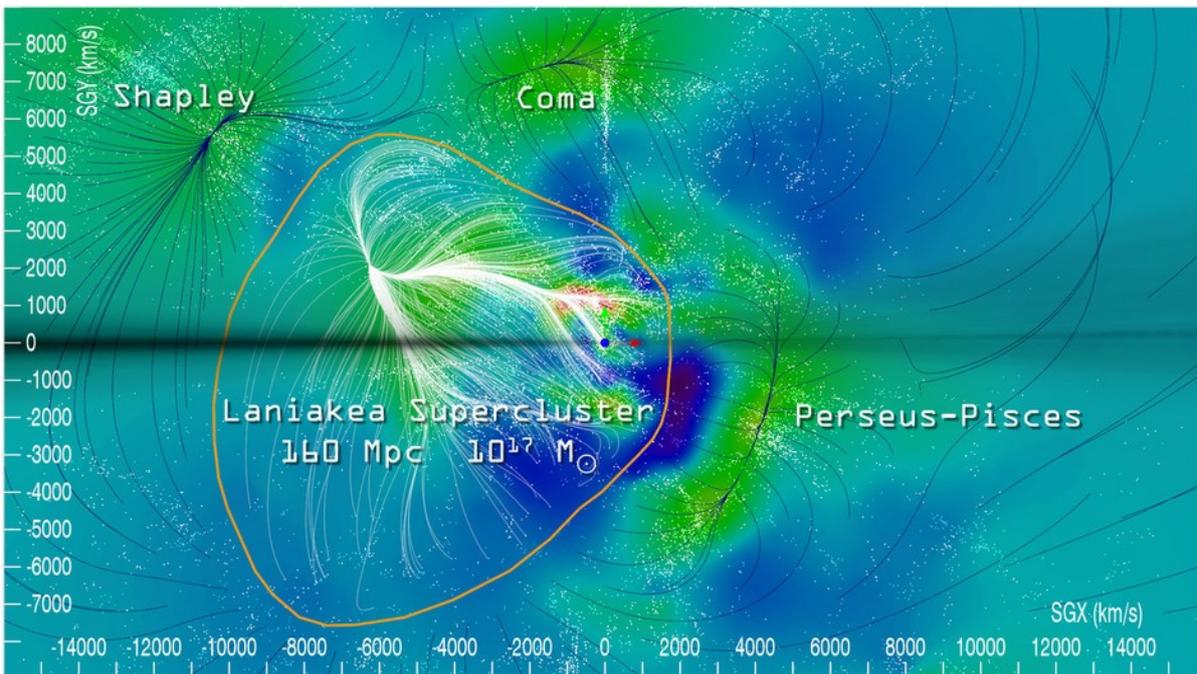
Die Galaxien der lokalen Gruppe

Unsere Lokale Gruppe gehört zu einem Superhaufen, der ca. 150 kleinere Galaxiehaufen umfasst. Dieser Superhaufen, dem unsere lokale Gruppe (und somit unsere Milchstraße) angehört, gleicht einer flachen Scheibe mit einem Durchmesser von ca. 150 Millionen Lichtjahren, und heißt der *Virgo-Superhaufen* (*Virgo-Supercluster*), da sich sein Zentrum im Sternbild *Virgo* (Jungfrau) befindet. Der große zentrale Galaxienhaufen dieses Superhaufens umfasst etwa 2000 Galaxien und ist von der Lokalen Gruppe ca. 50 bis 65 Millionen Lichtjahre entfernt.



Die Lage der Lokalen Gruppe im Virgo-Superhaufen

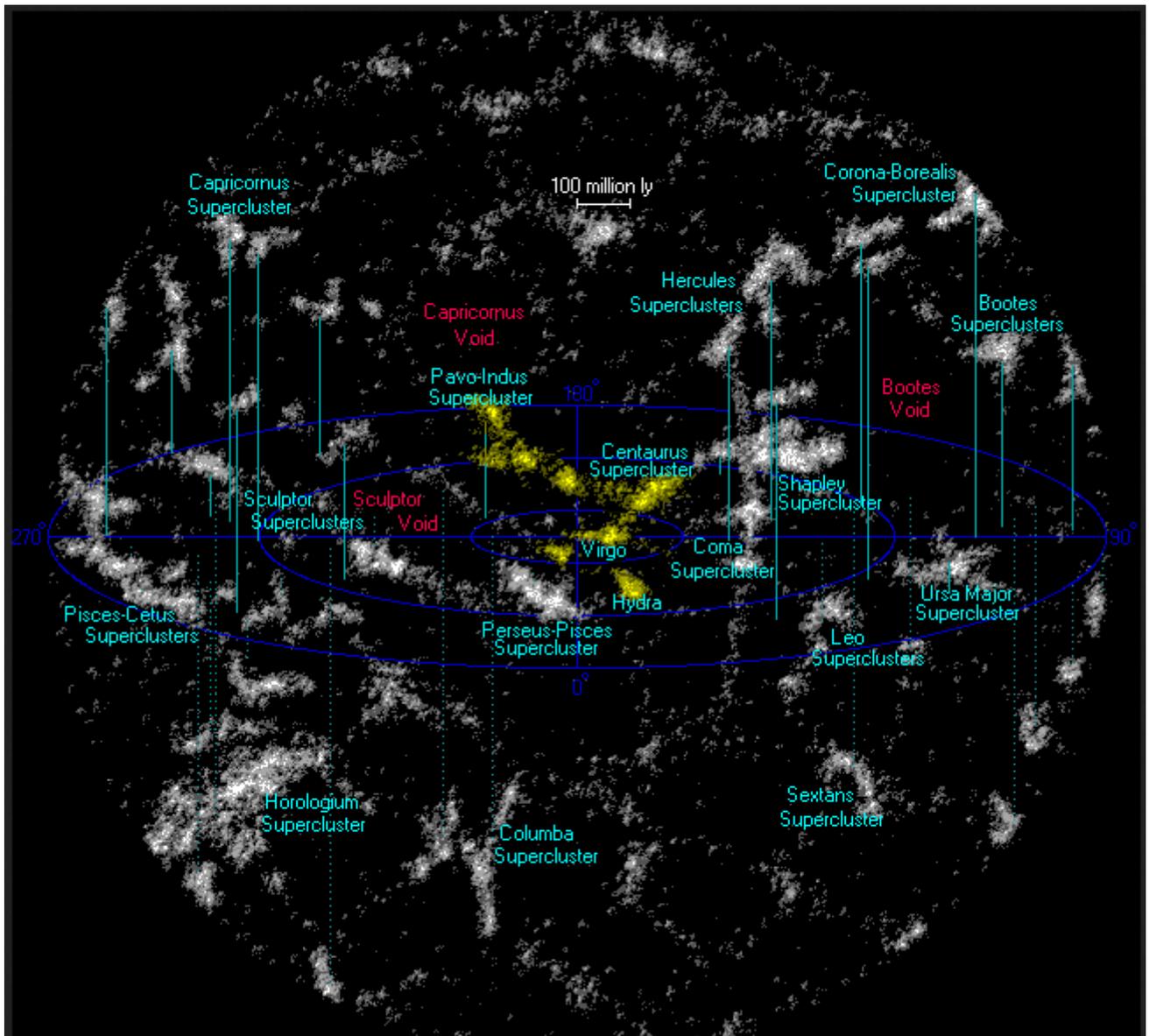
Der Virgo-Superhaufen aber ist wieder Teil eines noch größeren Superhaufens von ca. 100.000 Galaxien mit einer Ausdehnung von 520 Millionen Lichtjahren, dem man **Laniakea** nennt (= Hawaiisch „unermesslicher Himmel“, von *Lani* = Himmel und *akea* = unermesslich). Als Teile von Laniakea gelten neben dem Virgo-Superhaufen der Hydra-Centaurus-Superhaufen, Pavo-Indus-Superhaufen und Südlicher Superhaufen. Der lokale Haufen befindet sich am Rand von Laniakea (im folgenden Bild der blaue Punkt). Im Gravitations-



Schwerpunkt des Laniakea-Superhaufens, auf den seine Galaxien zustreben, steht der 150 bis 240 Millionen Lichtjahre von uns entfernte sog. **Große Attraktor**, den man nicht direkt sehen kann, weil er sich in der sog. **Zone of Avoidance** (der „Zone der Vermeidung“ am galaktischen Äquator, wo man im optischen Bereich nicht in den intergalaktischen Raum hinein blicken kann) befindet, und zwar im Richtung der Sternbilder Südliches Dreieck und Norma.

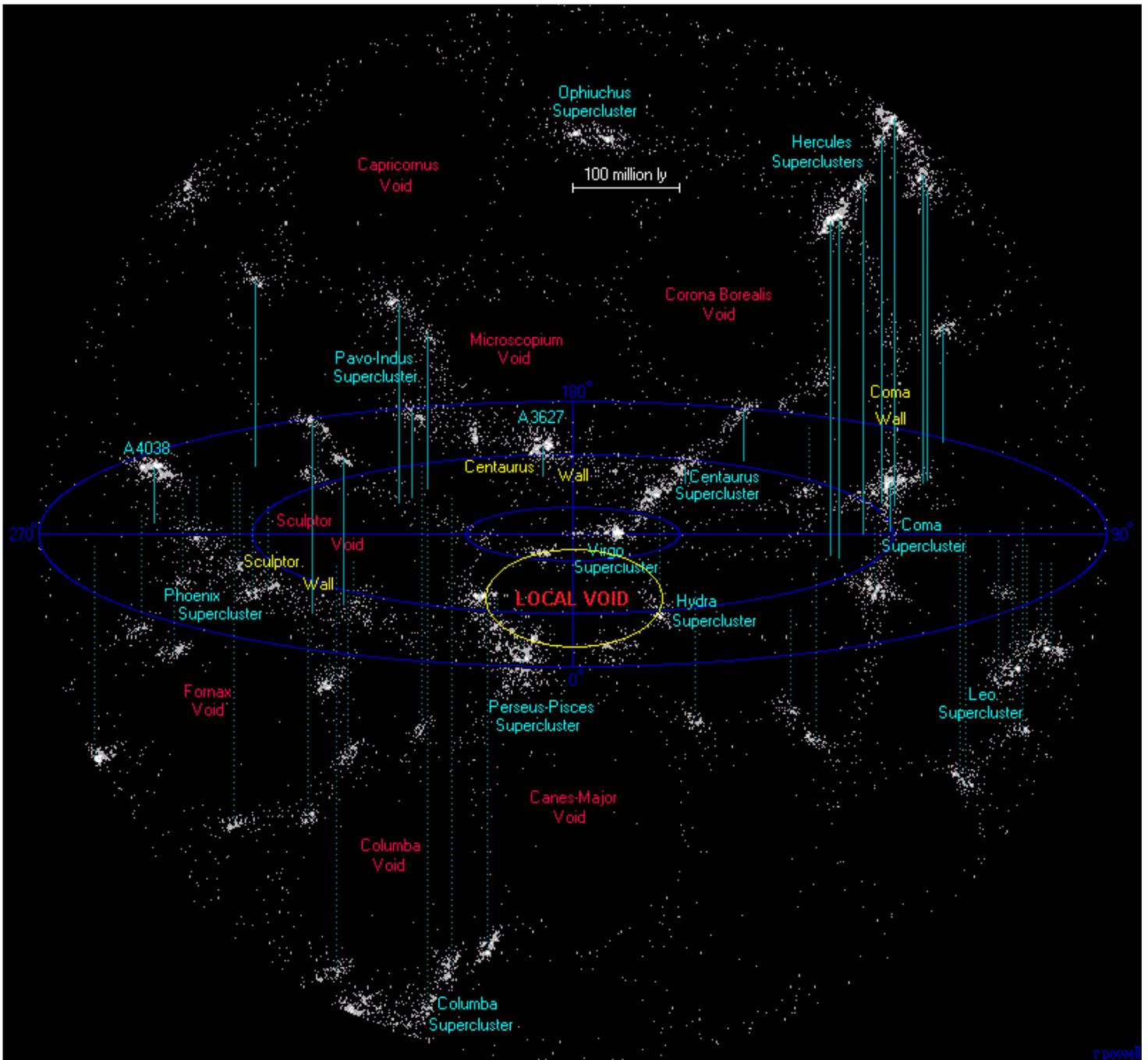
Die benachbarten Superhaufen von Laniakea heißen *Shapley-Superhaufen*, *Herkules-Superhaufen*, *Coma-Superhaufen* und *Perseus-Pisces-Superhaufen*.

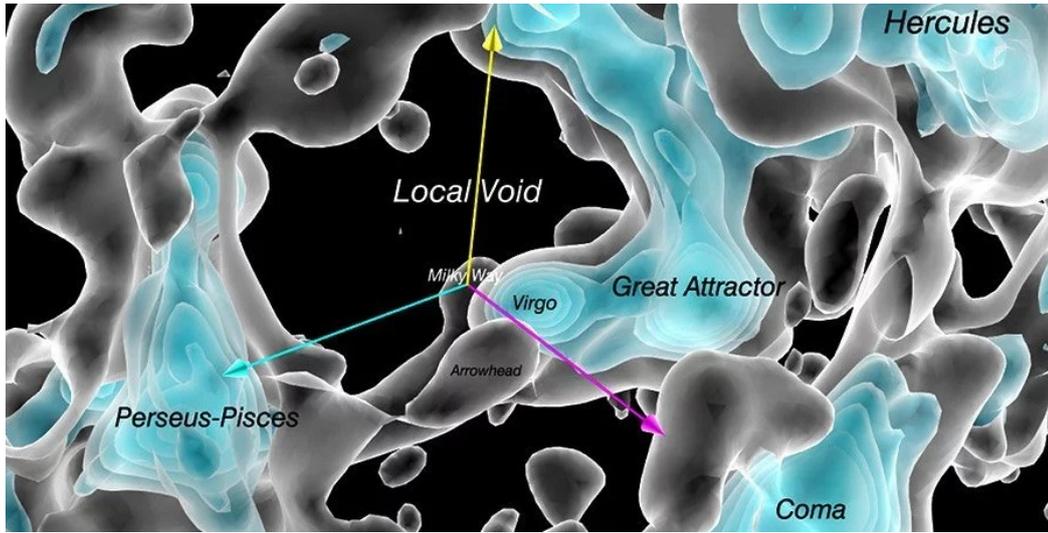
Superhaufen bilden die Schnittpunkte und „Faden-Teile“ eines kosmischen Netzes oder „Wabensystems“ bestehend aus sog. *Filamenten* (lat. „Fäden“): mit Galaxien besetzte fadenartige Strukturen, und sog. *Voids* („Hohlräume“): riesigen Leerräumen mit Ausdehnungen von durchschnittlich etwa 300 Millionen Lichtjahren zwischen den Fäden; der „*Eridanus Supervoid*“ hat sogar eine Ausdehnung von mehr als einer Milliarde Lichtjahren). Laniakea gehört zu einem Filament, das man den **Pisces-Cetus Supercluster Complex** nennt (weil dessen größter Superhaufen der „Pisces-Cetus-Supercluster“ ist), der 1 Milliarde Lichtjahre durchmisst. Ganz in der Nähe der Lokalen Gruppe beginnt auch ein Leerraum, ein sog. Void: das sog. **Lokale Void**, vom min. 150 Millionen Lichtjahren Durchmesser. Die Filament- und Voidstruktur ist nicht durch Gravitation entstanden und wird als Ganzes nicht gravitativ zusammengehalten, sondern muss sich schon von Anfang an (unmittelbar nach dem Urknall bzw. nach der Entstehung des Alls) herausgebildet haben. Hier ein Bild des *Pisces-Cetus Supercluster Complexes*, d.h. des Filaments, dem wir angehören:



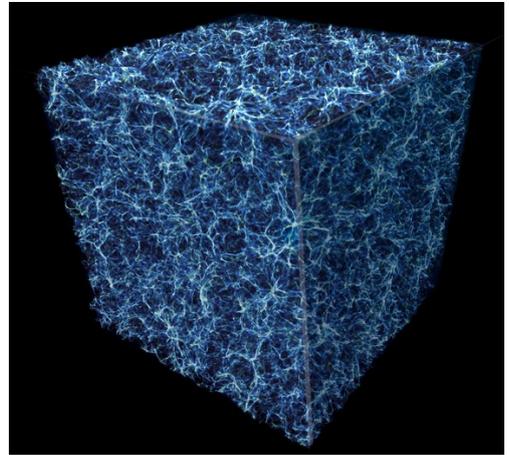
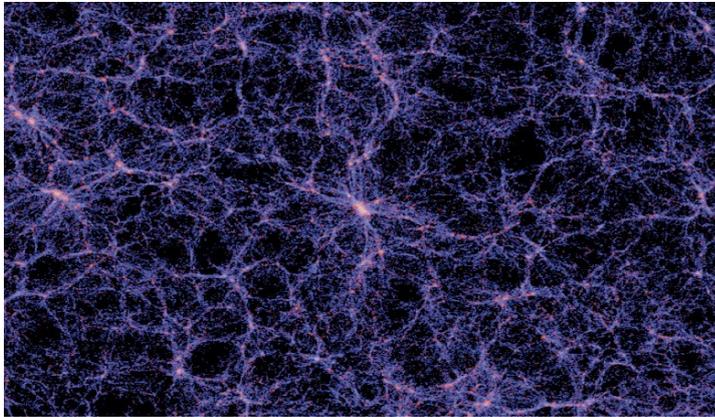
Der Laniakea-Supercluster (gelbe Fläche) im *Pisces–Cetus Supercluster Complex*, mit den größten in ihm enthaltenen Voids

Die folgende Abbildung zeigt das Lokale Void und Voids in weiterer Umgebung an:





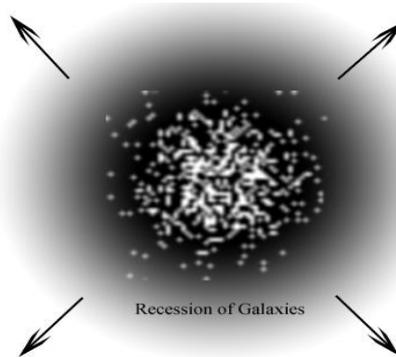
Wabenstruktur des Universums: Filamente und Voids:



## 4. Das Universum als Ganzes

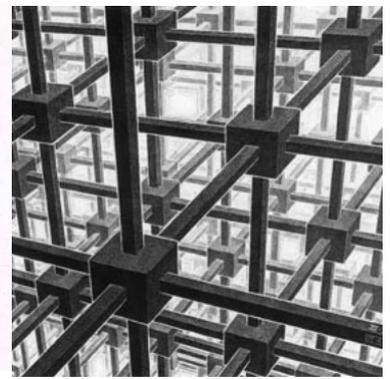
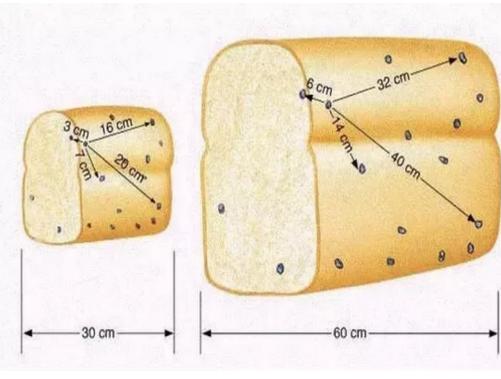
Fast alle entfernteren Galaxien entfernen sich voneinander (sog. „Galaxienflucht“): der Raum zwischen ihnen scheint sich auszudehnen. Dabei ist die Geschwindigkeit, mit der sich eine Galaxie von der anderen entfernt, proportional zur Entfernung, d.h. sie ist umso größer, je weiter sie voneinander entfernt sind. Genauer gilt:

*Alle Galaxien, die von der unsrigen dieselbe Entfernung haben, bewegen sich von uns mit genau derselben Geschwindigkeit weg; und wenn eine Galaxie A doppelt oder dreifach oder allgemein  $x$ -mal so weit von uns entfernt ist wie eine Galaxie B, so bewegt sich A mit der doppelten bzw. dreifachen bzw.  $x$ -fachen Geschwindigkeit von uns fort. Die weitesten Galaxien, die wir noch sehen können, bewegen sich bereits mit Lichtgeschwindigkeit von uns fort.*



Von diesem Gesetz (dem von Edwin Hubble entdeckten sog. *Hubble-Gesetz*) gibt es nur ganz wenige Ausnahmen bei Galaxien in unserer Nähe (so bewegt sich die Andromeda-Galaxie nicht von uns weg, sondern auf uns zu).<sup>148</sup>

Vergleicht man die Galaxien mit Knöpfen, die man an einem Luftballon aufgeklebt hat, und bläst diesen Ballon auf, so verhalten sich die Knöpfe tatsächlich genau wie die Galaxien im Raum: jeder Knopf entfernt sich von jedem, und je weiter ein Knopf von einem anderen entfernt sind, desto größer ist die Geschwindigkeit des Auseinanderstrebens. Ein Nachteil des „Luftballon-Modells“ des Universums ist, dass hier die „Galaxien-Knöpfe“ alle auf einer Kugelfläche liegen. Ein anderes Modell ist diesbezüglich besser: Man vergleiche die Galaxien nicht mit Knöpfen auf einem Luftballon, sondern mit den Rosinen in einer sich ausdehnenden Kuchenteigmasse (*Rosinenkuchen-Modell*) oder sondern mit Würfeln in den Kreuzungspunkten eines Kreuzgittersystems, bei dem die Stäbe des Gitters, die benachbarte Würfel verbinden, mit der Zeit immer länger werden (*Gittermodell*):



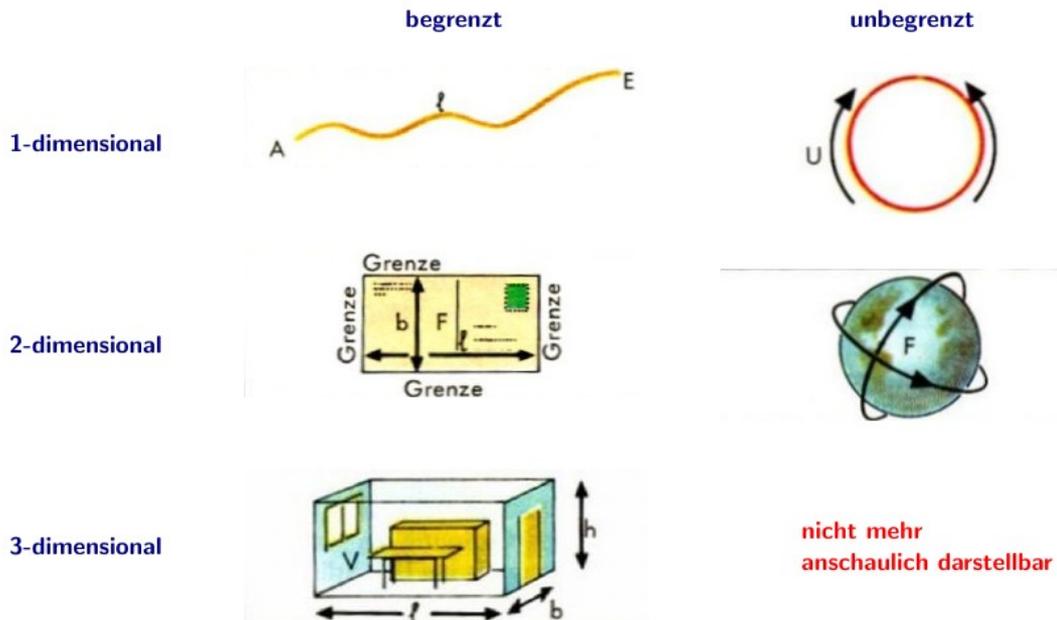
Auf jeder Galaxie sieht es so aus, als stünde sie im Mittelpunkt einer Explosion, die alle anderen Galaxien von ihr wegtreibt, aber keine Galaxie muss wirklich der Mittelpunkt sein, weil sich für den Beobachter einer jeden Galaxie genau dasselbe Bild ergibt.

Tatsächlich gäbe es keinen Mittelpunkt im All, wenn das Weltall **ein endlicher, aber unbegrenzter (durch höherdimensionale Krümmung in sich geschlossener) Raum** wäre (was viele – aber nicht allen – Kosmologen annehmen). Was mit einem – für uns nicht mehr anschaulich vorstellbaren – „endlichen unbegrenzten Raum“ zu verstehen ist, kann am besten folgende Sequenz von Bildern deutlich machen:



<sup>148</sup> Zahlenmäßig gilt für die „Fluchtgeschwindigkeit“, mit dem sich eine Galaxien von uns entfernt: Wenn diese Galaxie  $x$  Million Lichtjahre entfernt ist, beträgt die Geschwindigkeit etwa  $x$  mal 21,74 Kilometer pro Sekunde, sie nimmt also jedesmal, wenn man zu einer Galaxie übergeht, die eine Million Lichtjahre weiter entfernt ist als eine andere, um etwa 21,74 km/s zu. Der Wert „21,74 km/s pro Millionen Lichtjahre“ wird als die **Hubble-Konstante  $H$**  bezeichnet (meist umgerechnet angegeben als „70,88 km/s pro Megaparsec“, wobei 1 Megaparsec die Länge von 3,26 Millionen Lichtjahren hat).

## Endliche Räume



Der **eindimensionale begrenzte Raum** ist eine Linie mit Anfangs und Endpunkt (in der obigen Bilderfolge dargestellt durch einen Faden). *Eindimensional* heißt, dass man auf der Linie nur vorwärts oder rückwärts laufen, aber nicht zur Seite abbiegen kann. Läuft man hier nun immer voran, ohne umzukehren, kommt man in einem *begrenzten* eindimensionalen Raum stets an eine Grenze – an eines der beiden Ende des Fadens bzw. der Linie – wo es „nicht mehr weiter nach vorn geht“. Bei einem **eindimensional unbegrenzten** Raum gibt es keine solche Grenze, man kehrt aber bei jeder Bewegung, bei der man immer weiter nach vorn läuft, wieder zum Ausgangspunkt zurück. Beispiel hierfür ist der Faden, dessen Enden man zusammenschließt bzw. die zu einer geschlossenen Kreislinie umgebogene Linie. Auf dieser gibt es keinen Mittelpunkt (ein Mittelpunkt liegt in der Mitte des Kreises, nicht auf der eindimensionalen Kreislinie, sondern jenseits dieser Linie in der zweiten Dimension).

Der **zweidimensionale begrenzte Raum** ist eine ringsum begrenzte Fläche (in der obigen Bilderfolge dargestellt durch eine Briefmarke). *Zweidimensional* heißt, dass es zwei (und *nur* zwei) senkrecht aufeinander liegende Richtung gibt, in der man sich (jeweils hin oder zurück) bewegen kann: nach vorn und hinten, und nach rechts und links. Tut man dies, ohne umzukehren oder abzubiegen, so kommt man in einem *begrenzten* zweidimensionalen Raum an eine Grenze – im obigen Beispiel an einen der vier Ränder der Fläche bzw. der Briefmarke – wo es „nicht mehr weitergeht“. Bei einem **zweidimensional unbegrenzten** Raum gibt es dagegen keine solche Grenze, und man kehrt (wenn dieser Raum trotz Grenzenlosigkeit nicht unendlich, sondern endlich sein sollte) bei jeder Bewegung, bei der man immer weiter läuft oder umzukehren oder abzubiegen, zwangsläufig wieder zum Ausgangspunkt zurück. Ein Beispiel ist die zu einer Kugelfläche umgebogene und zusammengeschlossene Fläche. Auf dieser gibt es keinen Mittelpunkt (ein Mittelpunkt liegt in der Mitte der Kugel, nicht auf der zweidimensionalen Kugeloberfläche, sondern jenseits dieser Fläche in der dritten Dimension).

Der **dreidimensionale begrenzte Raum** ist ein ringsum begrenzter Raum (in der obigen Bilderfolge dargestellt durch ein Zimmer). *Dreidimensional* heißt, dass es drei (und *nur* drei) senkrecht aufeinander liegende Richtung gibt, in der man sich (jeweils hin oder zurück) bewegen kann: nach vorn und hinten, nach rechts und links und nach oben und unten. Tut man dies, ohne umzukehren oder abzubiegen, so kommt man in einem *begrenzten* dreidimensionalen Raum an eine Grenze – in obigem Beispiel an eine der vier Wände des Zimmers – wo es „nicht mehr weitergeht“. Bei einem **dreidimensional unbegrenzten** Raum gibt es keine solche Grenze, man kehrt (wenn dieser Raum trotz Grenzenlosigkeit nicht unendlich, sondern endlich ist) bei jeder Bewegung, bei der man immer weiter läuft oder umzukehren oder abzubiegen, wieder zum Ausgangspunkt zurück. Einen solchen „gekrümmten“ Raum können wir beschreiben, aber uns nicht mehr vorstellen. Man müsste hierzu das Zimmer in eine vierte Dimension hinein so „verbiegen“, dass sein Boden mit der Decke zusammengeschlossen wird, ebenso die Rückwand mit der Vorderwand und zugleich seine linke Wand mit der rechten. Der Mittelpunkt dieses in sich gekrümmten Raumes würde nirgendwo in ihm liegen, sondern jenseits davon in einer für uns unvorstellbaren „vierten“ Dimension. Nach der Relativitätstheorie Einsteins ist der Raum tatsächlich in der Gegenwart von Massen lokal „gekrümmt“, es bleibt aber offen, ob (1) es zusätzlich zu der von Massen bewirkten unregelmäßigen Krümmungen auch eine globale Krümmung des Raumes gibt, und diese derart ist, dass der Raum endlich und in sich geschlossen ist; auch bleibt offen, ob (2) wirklich eine vierte Raumdimension existiert (es sich also bei den „Krümmungen“ der Theorie um eine tatsächliche „Biegungskrümmung“ handelt) oder nur es sich nur um eine reine „Maßkrümmung“ handelt, bei der *nur drei* Raumdimensionen wirklich existieren, deren physikalische Eigenschaften aber so sind, „als ob“ es eine vierte Dimension gäbe. – Wenn es sich um eine Biegungskrümmung handelt, setzte dies voraus, dass der uns bekannte dreidimensionale Raum nicht einfach eine „Leere“ ist, sondern eine Art feinstoffliche und elastisch verbiegbare und verformbare Substanz ist (denn nur Substanzen – wie etwa ein Strick, ein Teppich oder ein Ballon – sind ja

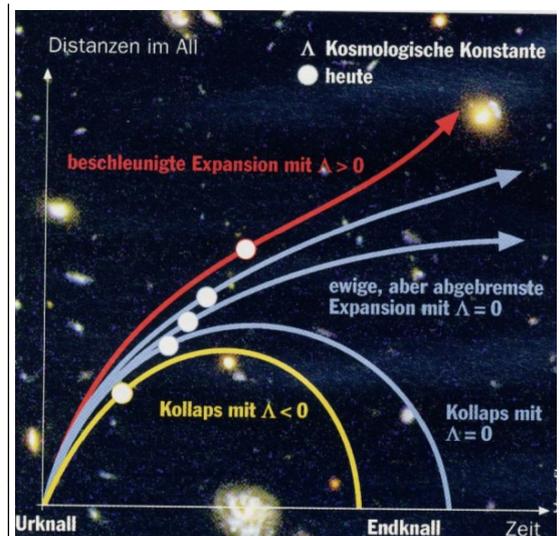
„verbiegbar“ und „verformbar“), die in einem vierdimensionalen Hyperraum eingebettet ist. Man kann dann zwei grundlegende Arten von Bewegung unterscheiden: Eine Bewegung der Materie *durch den Raum*, und eine Bewegung *des Raumes selbst*, der die in ihm befindliche Materie „mitnimmt“. Die nach dem Hubble-Gesetz erfolgende Galaxienflucht ist dann nicht als eine Bewegung der Galaxien *durch* den Raum aufzufassen, sondern als eine Bewegung (und zwar Ausdehnung) des Raumes selbst, während die Galaxien die ganze Zeit „am selben Ort feststehen“ (oder sich nur minimal bewegen), aber sich trotzdem schnell voneinander entfernen, weil sie vom Raum „mitgenommen“ werden. Das entspricht dem Modellbild vom sich aufblasenden Luftballon (dessen dehnbare, sich ausdehnende Haut den Raum und seiner Bewegung gleicht), an dem Knöpfe fest angeklebt sind (die für die fest an ihrem Ort verbleibenden Galaxien stehen). Der uns bekannte Raum könnte die eine sog. *3-dimensionale Sphäre* oder kurz *3-Sphäre* sein, d.h. der 3-dimensionale Rand (die 3-dimensionale Hyper-Oberfläche) einer 4-dimensionalen Kugel, die sich ausdehnt, weil ihr Radius immer größer wird. Es ist unklar, ob Einsteins Spezielle Relativitätstheorie, nach der die Lichtgeschwindigkeit das absolute Tempolimit für materielle Translation und Informationsaustausch ist, nur für Bewegungen durch den Raum gilt oder auch für Bewegungen des Raumes selbst postuliert werden müsste. Letzteres würde eigentlich konsequent erscheinen, aber man nimmt heute trotzdem meist an, dass sich der Raum selbst auch mit Überlichtgeschwindigkeit bewegen kann.

Aufgrund des Hubble-Gesetzes liegt nun die Folgerung nahe, dass vor einer gewissen Zeit die Gesamtheit aller Galaxien (bzw. die Materie des gesamten Universums) auf engstem Raum (theoretisch in einem einzigen Punkt) vereinigt war, von dem aus die Galaxien wie Teilchen, die sich durch eine Explosion auseinander getrieben werden, in alle Richtungen auseinander flogen und sich voneinander entfernten. Den Zeitpunkt dieses Anfangs der Galaxienflucht nennt man den „**Urknall**“, der zeitlich nach neuesten Berechnungen **13,8 Milliarden Jahre** zurückliegt. Dieser Zeitpunkt scheint der „Anfang der Zeit“ oder des raum-zeitlichen materiellen Universums zu sein.

Die Geschwindigkeit der universale Ausdehnung des Raumes nahm – wie genaue Messungen seit 1998 ergaben – in den ersten 9,8 Milliarden Jahren nach dem Urknall zuerst geringfügig ab, ist danach aber angestiegen, d.h. sie beschleunigt sich derzeit (zusätzlich nehmen einige im einem winzigen Bruchteil der ersten Sekunde nach dem Urteil eine Phase an, in der sich das Universum unvorstellbar schnell ausdehnte, die „Inflation“ genannt wird, siehe unten). Die Ursache der Verlangsamung in den ersten neun Milliarden Jahren ist die Gravitationskraft, die Ursache der Beschleunigung aber nennt man (weil man sie nicht kennt) „Dunkle Energie“, die eine Abstoßungskraft sein muss; man glaubt, dass sie von Anfang an wirksam war, aber anfangs von der Gravitationskraft überlagert und kompensiert wurde, solange die Massen noch nicht weit genug auseinander waren.

Die Entdeckung der beschleunigten Ausdehnung des Alls 1998 kam völlig überraschend: Zuvor hatte man zwar darüber gestritten, ob die Ausdehnung wieder in eine Zusammenziehung übergehen und das Weltall sich immer weiter bis zu einem Punkt kontrahieren und schließlich in einem „Endknall“ vergehen würde, oder ob die Ausdehnungsgeschwindigkeit zwar immer weiter abnehmen, aber niemals in eine Kontraktion übergehen würde. Dass aber die Ausdehnung sich sogar beschleunigen würde, damit hatte damals niemand gerechnet.

Die genannte Abbremsung und Beschleunigung der Ausdehnung des Universums ist aber (wenn man von der spekulativen kurzzeitigen Inflationsphase ganz am Anfang absieht) bis jetzt nicht besonders stark, so dass man keinen großen Fehler



Verschiedene bis 1998 diskutierte Modelle der zeitlichen Entwicklung des Weltalls: Die rote Linie, mit der niemand gerechnet hatte, erwies sich als die korrekte

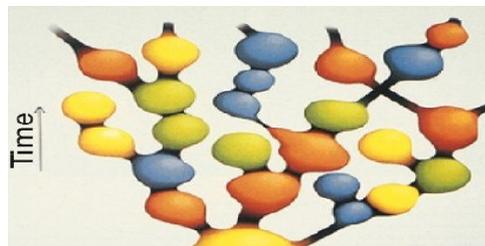
macht, wenn man die Ausdehnungsgeschwindigkeit als seit dem Urknall zeitlich ungefähr konstant annimmt. Wichtig ist noch: *Man kann nicht ohne Weiteres von einer einzigen, bestimmten Geschwindigkeit der Ausdehnung des Raumes sprechen*, denn wie schnell sich zwei Punkte des Raumes voneinander entfernen, hängt ja nach dem Hubble-Gesetz davon ab, wie weit sie schon voneinander entfernt sind (bei x-facher Entfernung ist die Geschwindigkeit stets x-mal so groß). Trotzdem kann man sinnvollerweise sagen, dass sich die Geschwindigkeit erhöht und z.B. verdoppelt oder verdreifacht hat usw.: Das ist genau dann der Fall, wenn für *zwei beliebig herausgegriffene Galaxien* gilt, dass sich die raumausdehnungsbedingte Geschwindigkeit ihres Auseinandergehens erhöht bzw. verdoppelt bzw. verdreifacht hat usw.<sup>149</sup>

Die am weitesten entfernten Objekte, die wir noch sehen, waren nun zum Zeitpunkt, als sie ihr Licht aussendeten, weniger als 13,8 Lichtjahre von uns entfernt und bewegten sich fast mit Lichtgeschwindigkeit von uns weg. Da sich in dieser Zeit das All weiter ausgedehnt hat, sind diese Objekte – falls sie noch existieren – heute aber jedenfalls viel weiter von uns entfernt als 13,8 Lichtjahre. Da ihre Fluchtgeschwindigkeit damals nahezu die Lichtgeschwindigkeit war, sollten sie – falls es keine größere Fluchtgeschwindigkeit als die des Lichtes gibt, wie man früher dachte und wie es der Einsteischen Relativitätstheorie in ihrer originalen Form besser zu entsprechen scheint – jetzt doppelt so weit von uns entfernt sein, also 27,6 Lichtjahre. Wenn man aber annimmt, dass die Galaxienflucht keine Bewegung der Galaxien durch den Raum ist, sondern eine Ausdehnung des Raumes selbst, und für diese Raumausdehnung Überlichtgeschwindigkeit zulässt, müssten sie noch weiter als 27,6 Lichtjahre weg sein, da die Fluchtgeschwindigkeit dann gemäß dem Hubble-Gesetz mit steigender Entfernung dann auch über die Lichtgeschwindigkeit hinaus zunimmt. Nach genaueren

<sup>149</sup> Wenn der Raum eine 3-Sphäre ist, gibt es außerdem eine ausgezeichnete Wahl der zwei Galaxien, die man betrachten kann, um die Geschwindigkeit ihres Auseinandergehens zu messen: nämlich *Galaxien mit der maximal möglichen Entfernung voneinander*. Wenn man auf der 3-Sphäre geradeaus läuft, entfernt man sich ja zunächst vom Ausgangspunkt, kommt diesem aber irgendwann wieder näher und erreicht ihn; folglich gibt es auf einer solchen „Rundreise“ einen Punkt, bei dem man sich am weitesten vom Ausgangspunkt entfernt hat. Die Geschwindigkeit  $v$  des Auseinandergehens zweier solcher Punkte mit maximaler Entfernung könnte man dann als „die“ absolute Geschwindigkeit der Raumausdehnung ansehen. Eine andere Möglichkeit wäre es, als die Geschwindigkeit  $w$  des Anwachsens des Radius der 4-dimensionalen Kugel als „die“ Geschwindigkeit der Raumausdehnung anzusehen. Dabei gilt (wie man sich leicht überlegen kann), dass die Geschwindigkeit  $v$  ungefähr dreimal so groß (genauer:  $\pi$  mal so groß) sein muss wie die Geschwindigkeit  $w$ .

Berechnungen (welche auch die verschiedenen uns heute bekannten Phasen und Geschwindigkeiten der Raumausdehnung seit dem Urknall berücksichtigen)<sup>150</sup> sollten sie dann jetzt ca. 46,65 Milliarden Lichtjahren von uns entfernt sein.<sup>151</sup> So wird heute meist 46,65 Milliarden Lichtjahre (und nicht 27,6 Milliarden Lichtjahre) als der gegenwärtige „Radius“ des Universums angesehen, dessen Durchmesser demnach doppelt so groß sein muss: ca. 93,3 Milliarden Lichtjahre (bzw. 55,2 Milliarden Lichtjahre, wenn man die Lichtgeschwindigkeit als universales Tempolimit auch für die Raumausdehnung akzeptiert): Zumindest ist dies der Durchmesser der sog. **beobachtbaren Universums**. Die von manchen gemachte Annahme, dass das gesamte Universum auch „dahinter“ noch „ins Unendliche“ weitergeht, widerspricht aber der von vielen Physikern nach wie vor für plausibel gehaltenen Annahme eines endlichen in sich geschlossenen Alls, und setzt Erweiterungen der bekannten Physik voraus, die in jedem Fall hoch spekulativ sind.

Etwas plausibler als das *unendlich* ausgedehnte All (aber immer noch hoch spekulativ!) ist die Annahme, dass das All zwar endlich, aber doch noch wesentlich größer sein könnte die beobachtbare Sphäre von ca. 93 bzw. 55 Milliarden Lichtjahren Durchmesser. Ein solches „viel größeres“ All wird z.B. durch verschiedene sog. **Inflationstheorien** angenommen. Eine **Theorie des inflationären Universums** wurde in den 1980er Jahren von dem amerikanischen Physiker Alan Guth (\*1947) und dem russischen Physiker Andre Linde (\*1948) entwickelt. Guth begann mit einer Betrachtung der ersten Sekunde nach dem Urknall. Die allererste Zeit bis  $10^{-43}$  Sekunden (d.h. bis zum Trilliardsten Teil eines Trilliardsten Teils einer Sekunde) nach dem Urknall heißt *Planck-Zeit* und ist für die heutige Physik unverständlich. Direkt nach Ablauf der Planck-Zeit war es  $10^{32}$  Grad heiß, das Universum hatte nur den Bruchteil der Größe eines Elementarteilchens, und es kühlte weiter ab. Bei etwa  $10^{-37}$  Sekunden nach dem Urknall vermutet Guth beim Phasenübergang zur „Hadronen-Ära“, in der sich die Kernteilchen bildeten, eine kurzfristige „Unterkühlung“ des Universums, die zu einem negativen Druck führte, der eine rasend schnelle Ausdehnung des Universums in einem winzigen Bruchteil einer Sekunde zur Folge hatte: das Universum soll sich dabei aus einem Anfangszustand, in dem es die Größe der Elementarteilchen weit unterschritt, innerhalb von ca.  $10^{-35}$  Sekunden auf eine solche Größe ausgedehnt haben, dass der heute sichtbare Teil des Universums, in dem die weiteste, heute von uns aus messbare Entfernung etwa 100 Trilliarden Kilometer (13,8 Milliarden Lichtjahre) beträgt, nur eine winzige „Blase“ des wahren Universums ausmacht. Nach Guth ist nämlich das gesamte Universum wiederum mindestens 100 Trilliarden mal so groß wie unsere Blase. Während sich der Radius der Raumblase, in der wir leben, von  $10^{-49}$  Meter auf 1 Meter vergrößerte, vergrößerte sich der Radius des Gesamtuniversums von  $10^{-29}$  Metern auf mindestens 10 Millionen Lichtjahre. Die für diese unvorstellbar schnelle Aufblähung („Inflation“) benötigte Geschwindigkeit übertrifft die Lichtgeschwindigkeit um das  $10^{50}$ -fache. Der bekannte Einsteinsche Satz, dass sich nichts schneller als das Licht bewegt, ist hier also für das Universum als Ganzes aufgehoben. Nach dieser Inflation vergrößert sich unsere Raumblase nur noch mit Lichtgeschwindigkeit, und während der Durchmesser dieser Blase heute 13,7 Milliarden Lichtjahre beträgt, ist das Gesamtuniversum inzwischen noch 100 Trilliarden mal größer, nämlich  $10^{34}$  Lichtjahre. Außerhalb unserer Blase kann es noch unzählige weitere geben, und es kann auch in verschiedenen Bereichen unseres Universums jederzeit eine erneute Inflation auftreten, wodurch neue gewaltige Raumblasen entstehen, die Guth „Taschenuniversen“ nennt; in einem ewigen Prozess entsteht dann zwangsläufig eine „endlose Aneinanderreihung von Taschenuniversen“.



*Der von Guth berechnete Inflationsmechanismus hat sich nun allerdings als falsch erwiesen:* Er führt nicht zur Ausbildung von Universumsblasen, die unserem Universum gleichen. Man hatte sich aber an die Inflationstheorie gewöhnt, da sie einige Beobachtungen, wie z. B. die Homogenität des Universums, erklären kann: So hieß es, die Theorie sei „zu schön, um falsch zu sein“. Es gibt nun eine unübersehbare Fülle von neueren Inflationstheorien, sozusagen eine „Inflation von Inflationstheorien“, in denen man versucht, den unbekanntem Inflationsmechanismus zu beschreiben, der zu den gewünschten Effekten führt, die man durch die Inflation erklären zu können glaubt. Hier scheint also der Wunsch der Vater des Gedankens zu sein. In einigen Theorien kann Inflation sogar ohne hohen Temperaturen spontan auftreten. Im neuen Inflationsmodell von Linde, der sog. „chaotischen Inflation“, ist der Inflationsprozess auch nicht eine kurze Phase des durch den Urknall hervorgegangenen Universums, sondern umgekehrt ist der Urknall eine Folge eines vielleicht schon seit etlichen Äonen eingesetzten Inflationsprozesses, der sich auch wie eine Kettenreaktion in alle Ewigkeit fortsetzt, und laufend neue Urknall-Ausbrüche erzeugt. Mit nüchterner Kosmologie und auf der Basis von Experiment und Beobachtung beruhender Physik scheint all dies längst nichts mehr zu tun zu haben. – Bei all dieser Kritik muss man aber anerkennend feststellen, dass die meisten Inflationstheoretiker zwar von einer „ewigen Inflation“ in Richtung Zukunft überzeugt sind, aber eine unendliche Vergangenheit des Universums dennoch ablehnen: *Es muss auch nach diesen Theorien eine erste Inflation und somit einen allerersten, absoluten Anfang des Universums gegeben haben.*

<sup>150</sup> Dabei lässt man die spekulative und unbewiesene Inflationsphase (die – wenn überhaupt – ohnehin nur in der ersten Sekunde nach dem Urknall aufgetreten ist) weg. Man hat dann: (1) die ersten 47.000 Jahre nach dem Urknall die sog. „Strahlungs-Ära“, in der die Strahlung über die Materie dominierte; dort erfolgte die Ausdehnung proportional zur Wurzel aus der seit dem Urknall vergangenen Zeit – (2) danach die Phase bis 9,8 Milliarden Jahre nach dem Urknall, in dem die Anziehungskraft der Materie über die Strahlung dominierte, und die Ausdehnung proportional zum Quadrat der dritten Wurzel aus der Zeit erfolgte, also weniger stark abgebremst als in der vorhergehenden Ära, und danach schließlich die „Ära der dunklen Materie“ seit 9,8 Mil, wo die Ausdehnung exponentiell zunimmt (proportional zu  $e^{Ht}$ ) zunimmt, wobei  $e$  die Eulersche Zahl und  $H$  die Hubble-Konstante ist (siehe Fußnote 148).

<sup>151</sup> Diese Entfernung ergibt sich rechnerisch auch, wenn man annimmt, dass das Universum die Hyperfläche einer 4-dimensionalen Kugel ist, deren Radius sich seit dem Urknall durchschnittlich mit etwa der doppelten Lichtgeschwindigkeit ausgedehnt hat.

Es gibt jedenfalls gute Argumente dafür, dass das Universum **in keiner Hinsicht unendlich** ist: Weder unendlich bezüglich der schon vergangenen Zeit, noch bezüglich der Ausdehnung im Raum, noch bezüglich der Anzahl der Sterne und Massen. Hier seien vier Argumente für die Endlichkeit in diesen Hinsichten genannt:

1. Ein erster naturwissenschaftlicher Zweifel an Unendlichkeit des Alls (genauer: an der Unendlichkeit der Anzahl der Sterne) kam im frühen 19. Jahrhundert durch die Diskussion um das sog. „*Olberssche Paradoxon*“ auf. Es handelt sich um eine einfache Überlegung, auf welche 1823 der Amateurastronom Heinrich Olbers aufmerksam machte: *Die Ansicht, dass es unendlich viele Sterne gibt, scheint der Tatsache zu widersprechen, dass es nachts dunkel wird.* Unter der Voraussetzung nämlich, dass das Universum gleichmäßig mit unendlich vielen Sternen von durchschnittlich gleicher Leuchtkraft angefüllt ist, kann man herleiten, dass jeder Punkt des Himmels ungefähr so hell wäre wie die Sonnenoberfläche (und würde sich nicht ein Teil der Sterne gegenseitig verdecken, ergäbe sich theoretisch sogar eine unendliche Helligkeit); das bedeutet, dass aus dem bei uns eintreffenden Sternenlicht eine Flächenhelligkeit des Himmels resultieren würde, die 185.000 mal größer wäre als die vom Sonnenlicht allein bewirkte. Natürlich hat man verschiedene Möglichkeiten erdacht, wie sich die Konsequenz eines bezüglich der Sternanzahl endlichen Alls vermeiden ließe (Olbers selbst schlug vor, dass Dunkelwolken das Licht entfernter Sterne vor uns abschirmen), aber die einfachste Lösung des Paradoxons war und ist es offenbar, eine nur endliche Zahl der Sterne anzunehmen.

2. Eine Bestätigung für diesen Schluss lieferte eine zweite aufsehenerregende Erkenntnis, das sog. *Gravitationsparadoxon*, das 1874 durch Carl Gottfried Neumann und unabhängig davon 1895 durch Hugo von Seeliger aufgefunden wurde: Nach dem Newtonschen Gravitationsgesetz übt jede Masse eine Anziehungskraft auf jede andere Masse im Universum aus. Diese Kraft nimmt zwar mit der Entfernung ab, aber es lässt sich errechnen, dass die aus jeder Richtung auf uns wirkende Anziehungskraft dennoch unendlich sein müsste, wenn es unendlich viele (und auf großen Raumskalen homogen verteilte) Massen um uns herum gäbe. Das aber würde zu unendlichen Zerrkräften und unvorhersagbaren Bewegungen führen, was nicht der Fall ist. Am vernünftigsten scheint daher der Schluss zu sein, dass es nur endlich viele Massen im Universum gibt. Aus diesem Argument für die Endlichkeit der im All vorhandenen Massen folgt auch ein Argument für den zeitlichen Anfang der Materie, nämlich die Einsicht, dass all diese Massen vor endlich langer Zeit aus dem Nichts ins Dasein gekommen sein müssen. Denn eine endlich vielen Massen haben nach der Newtonschen Mechanik einen Schwerpunkt, und auf diesen Schwerpunkt stürzen alle diejenigen Massen zu, die keine dem entgegenstehende Eigenbewegung haben; wenn sie aber eine dies verhindernde Eigenbewegung haben, müssen sie sich auf Dauer immer weiter vom Schwerpunkt entfernen (es kann zwar eine Masse lange Zeit lang auf einer relativ stabilen Kreis- oder Ellipsenbahn um einen Masseschwerpunkt verbleiben, sobald mehr als zwei Massen aufeinander wirken, kann eine solche periodische Bahn nicht für alle Ewigkeit stabil bleiben). Gäbe es also die Massen schon seit unendlich langer Zeit, müssten sie entweder schon längst alle zu einem Klumpen zusammengefallen sein oder sich unendlich weit voneinander entfernt haben. Da beides nicht der Fall ist, scheint die Materie vor endlich langer Zeit in Dasein getreten zu sein.

3. Auch eine dritte, ganz andere Überlegung führt zu demselben Schluss. Diese Überlegung basiert auf dem 1865 von Rudolph Clausius aufgestellten sog. Zweite Hauptsatz der Thermodynamik, wonach Wärmeunterschiede dazu tendieren, sich auszugleichen. Wenn nicht von außen neue Wärme zugeführt wird, kommt es daher von selbst zu einer gleichmäßigen Verteilung der Wärmeenergie im Raum, und dieser Prozess ist irreversibel. Nun ist aber das heutige Universum mit seinen Sternsystemen ein thermodynamisches System mit gewaltigen Temperaturunterschieden. Somit müssen die Sterne früher oder später erlöschen, indem sie ihre Energie in den Raum abstrahlen, und alsdann können sich keine neuen Sterne mehr bilden. Wären die Sterne unendlich alt, müssten sie aber längst erloschen sein, also sind sie vor endlicher Zeit entstanden. – Auch alle anderen Prozesse, bei denen Energie abgegeben wird, klingen mit der Zeit irreversibel ab, so zum Beispiel der Uranzerfall. Im Hinblick darauf stellte Albert Einstein die Frage: „Warum gibt es noch Uran trotz des verhältnismäßig raschen Zerfalls und trotzdem keine Möglichkeit für die Bildung neuen Urans erkennbar ist?“ Bei einer unendlichen Vergangenheit des Universums wäre das nicht verständlich und man muss folgern, dass das Uran erst vor endlich langer Zeit entstanden ist; Einstein wertete dies als Indiz für einen „Weltanfang“.

4. Eine vierte Überlegung, die wieder auf einen zeitlichen Weltanfang hinweist, ist die oben schon genannte Galaxienflucht, die auf einen vor 13,8 Milliarden Jahren erfolgten „Urknall“ schließen lässt, eine Art „Initialzündung“, welche die gesamte Materie des Universums in Bewegung setzte.

Am plausibelsten erscheint mir nun insgesamt die folgende **klassische kosmologische These**: Der Urknall war für das materielle Universum *der absolute Anfang*, in dem Raum, Zeit und Materie „aus dem Nichts ins Dasein“ traten; das Universum hat sich von da an stetig ausdehnt und diese Ausdehnung wird sich immer weiter fortsetzen, wobei Raum und Materie und auch die abgelaufene Gesamtzeit zu jedem Zeitpunkt *stets endlich* bleiben werden, wenngleich die Zeit ohne Ende immer weiter läuft und der Raum dabei immer größer wird. Zeit und Raum kann man im Hinblick darauf „potentiell unendlich“ nennen, aber diese potentielle Unendlichkeit ist von einer „aktualen Unendlichkeit“ (d.h. einer zu einem Zeitpunkt tatsächlich „erreichten“ Unendlichkeit) wesentlich verschieden.

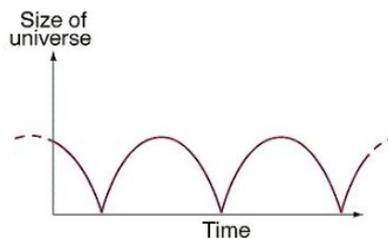
Dieses **klassische Urknall-Modell des Universums** harmoniert mit der modernen Physik ebenso gut wie mit der Philosophie des **Theismus**, der das Universum auf einen Schöpfungsakt zurückführt, ausgehend von einem transzendenten übernatürlichen (und allein in jeder Hinsicht aktual unendlichen) Schöpfergott, der die Naturgesetze samt dem durch diese Gesetze bestimmten Universum von Zeit, Raum und Materie ins Dasein rief. So ist es wohl kein Zufall, dass dieser Theorie von Papst Pius XII. begeistert begrüßt wurde und dass der Vordenker und Begründer der Urknalltheorie ein Priester war: Der Priester und Astrophysiker George Lamaitre legte 1931

die Grundlagen dieses Weltmodells vor.

Die von den meisten klassischen **Atheisten** bevorzugte These ist dagegen die, dass das materielle Weltall räumlich und zeitlich ohne Anfang und Ende ist und es immer schon Raum, Zeit, Bewegung gab, gelenkt von Wirkungen, die nach immer gleichbleibenden, ewigen Naturgesetzen ablaufen. Beliebte waren unter atheistischen Astronomen daher ganz besonders zwei alternative Weltmodelle:

A. Das 1948 aufgestellte **Steady-State-Modell** („Modell des beständigen Zustands“) von Fred Hoyle († 2001), nach dem das Weltall immer und überall gleich aussieht: Demnach entsteht ständig „aus dem Nichts“ neue Materie (Hoyle sagte einfach, das sei ein Naturgesetz und nannte dies das Gesetz der „fortlaufenden Schöpfung“ – continuous creation – ohne dabei einen Schöpfer anzunehmen), so dass zwischen zwei sich voneinander entfernenden Galaxien, wenn diese eine bestimmte Entfernung voneinander haben, in der Mitte wieder eine neue aus dem Nichts entsteht. Dies führt dazu, dass der Raum zwischen den Galaxien nicht immer leerer wird, sondern immer gleich aussieht: Die mittlere Entfernung zwischen zwei Galaxien bleibt dieselbe, auch dann, wenn sich alle ständig voneinander entfernen. Lässt man einen Film, die die Bewegung der Galaxien festhält, rückwärts laufen, so laufen diese zwar aufeinander zu, nähern sich aber einander nie ganz an, sondern verschwinden im Nichts, sobald sie eine bestimmte Minimaldistanz erreichen. Somit gibt es keinen Urknall, und das All war immer so, wie es heute ist. – Dieses Modell hatte bis 1965 viele Anhänger, aber als 1965 die Hintergrundstrahlung entdeckt wurde, die plausibel als „Echo des Urknalls“ gedeutet werden kann und zeigt, dass das All früher heißer war als heute, war dies praktisch das „Aus“ für das Modell: Seine Anhängerschaft schrumpfte auf Hoyle selbst und einige wenige seiner Anhänger zusammen, und konnte seitdem keine große Überzeugungskraft mehr unter den Wissenschaftlern entfalten.

B Das **Modell des oszillierenden Universums**. Demnach gab es zwar den Urknall, aber dieser war nicht einmalig, sondern er hat sich bereits unendlich oft wiederholt. Das All ist also anfangs- und endlos, es dehnt sich periodisch immer wieder bis zu einer bestimmten Größe ausdehnt und fällt dann wieder in sich zusammen. Vor dem letzten Urknall habe es also schon ein weitere Bewegungsphase des Universums gegeben, in der sich das All nämlich zusammenzog und in einem „Endknall“ verging, welcher dann in den letzten Urknall überging. Und die jetzige Ausdehnung wird sich verlangsamen und dann wird sich das All wieder zusammenziehen, in einem Endknall vergehen und dann erneut ausdehnen usw. ohne Ende:



Auch dieses Denkmodell ist sowohl durch Beobachtungen als auch durch die bekannten physikalischen Gesetze stark erschüttert worden, und ist heute praktisch tot. Es gibt vor allem drei gravierende Einwände:

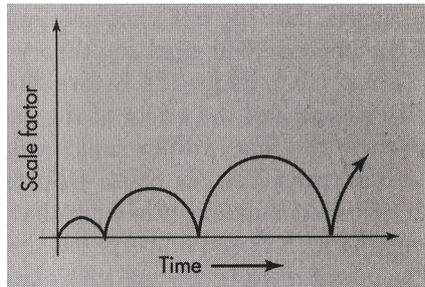
(1) Seit 1998 weiß man, dass die Ausdehnung des Universum sich seit ca. 3 Milliarden Jahren beschleunigt (gemäß der roten Linie in obigem Diagramm). Es sieht also nicht so aus, als würde die Ausdehnung wieder in eine Zusammenziehung übergehen.

(2) Selbst wenn die Ausdehnung sich irgendwann wieder zusammenziehen und in einem Endknall vergehen würde, gibt es keinen bekannten physikalischen Mechanismus, der das All dann wieder zur Ausdehnung bringen könnte. Wir haben es hier schließlich nicht mit einem elastischen Stoß zu tun, sondern die gesamte Materie würde in einem Punkt vereint sein, der soviel Masse enthält wie zuvor das ganze Universum. Die Gravitation würde verhindern, dass es zu einer erneuten Ausdehnung kommen kann. Das ganze würde ein gigantisches „schwarzes Loch“ sein, aus dem noch nicht einmal Licht, geschweige denn Materie wieder entweichen kann.

(3) Und selbst wenn es einen solchen Mechanismus gäbe, der zur erneuten Ausdehnung führt, so würde die zweite Ausdehnungsphase nach dem heutigen Stand der Physik (vor allem nach dem sog. Entropiesatz der Thermodynamik) anders ablaufen als die vorherige:

(2a) In jedem Zyklus würde neue Strahlung erzeugt, die dann für alle Zeiten – auch in allen folgenden Zyklen – als Hintergrundstrahlung erhalten bliebe. Bei unendlich vielen zurückliegenden Zyklen müsste es daher unendlich viel Hintergrundstrahlung geben, was nicht der Fall ist.

(3b) Zudem hat man errechnet, dass jeder neue Zyklus länger dauern und zu einer größeren Ausdehnung führen würde als der vorhergehende. Entsprechend würden frühere Zyklen kürzer ablaufen als spätere, und nach dem jetzigen Stand der Physik ist es unausweichlich, dass es irgendwann eine erste Phase gegeben haben müsste, d.h. einen „ersten Urknall“, dem kein anderer vorherging.



Man bekommt also, wenn man auf der Basis der bisher bekannten Physik arbeitet, anscheinend nicht um einen absoluten Anfang des Universums herum. Um ein schon seit Ewigkeit oszillierendes Universum zu bekommen, müsste man entweder neue noch unbekannte Naturgesetze annehmen, oder glauben, dass der ewige Schöpfer immer schon ein oszillierendes All im Gang hält. Letzteres wäre wohl denkbar, aber damit würde ja die atheistische Motivation für die Annahme des oszillierenden Weltmodells wieder ganz wegfallen, die es für Atheisten so attraktiv machte. Es gibt zwar neue Versuche, „zyklische“ Modelle des Universums wieder ins Leben zu rufen, aber hierzu muss man mit unbewiesenen (vielleicht sogar unbeweisbaren) physikalischen Postulaten arbeiten, wie z.B. mit die Annahme, dass unser Weltall regelmäßig mit einem Paralleluniversum zusammenstößt.

So dürfte am Ende doch der hl. Paulus recht haben, wenn er in Röm 1,20 sagt, man könne durch Betrachtung der Schöpfung „die Macht und Gottheit“ ihres Schöpfers erkennen. Die Betrachtung der Größe und wunderbaren Ordnung des Weltalls hat in der Tat viele der bedeutendsten Naturforscher zur Anerkennung eines Schöpfers bewogen, und kann dies auch heute noch tun.

Darüber hinaus ist aber auch zu bedenken, dass zum Kosmos nicht nur Raum, Zeit und Materie gehört, sondern auch noch qualitativ viel höher stehende und geheimnisvollere Dinge, die wir darin vorfinden: *das Leben*, die *bewusste Wahrnehmung* der höheren Lebewesen und das *Selbstbewusstsein* des Menschen mitsamt seiner Fähigkeit, auch Dinge jenseits von Raum und Zeit zumindest vage zu erfassen. Dies weist uns noch viel direkter und stärker auf einen Raum und Zeit transzendierenden Schöpfer hin, als es die gewaltige Größe des materiellen Universums tut.<sup>152</sup> So sagt Friedrich Schiller in seinem „Gedicht an die Astronomen“ mit Recht:

„Schwazet mir nicht so viel von Nebelflecken und Sonnen,  
Ist die Natur nur groß, weil sie zu zählen euch gibt?  
Euer Gegenstand ist der erhabenste freilich im Raume,  
Aber, Freunde, im Raum wohnt das Erhabene nicht.“

<sup>152</sup> Zur Komplexität des Lebens und der „hyperastronomischen“ Unwahrscheinlichkeit einer zufälligen Lebensentstehung trotz der Größe des Alles siehe meine Abhandlung „Ist das organische Leben zufällig entstanden?“ (online: <https://www.ludwig-neidhart.de/Downloads/LebenZufaellig.pdf>). Zu dem hier anknüpfenden sog. teleologischen Argument für die Existenz Gottes, aber auch zu dem kosmologischen Argument, das bei der Frage nach der Ursache des Universums ansetzen kann, und zum ontologischen Argument, das auf rein logischem Denken beruht, siehe meine Abhandlung *Existiert Gott? Hat der Mensch eine unsterbliche Seele?* (online <https://www.ludwig-neidhart.de/Downloads/GottSeele.pdf>).