

4.3 Die Erde als Planet

Die Erdfigur ist aus astronomischen und geodätischen Messungen bestimmbar; seit 1970 ist Satellitengeodäsie wichtig. Für die Länder, ihre Karten und Datenbanken sind 200 regionale Ellipsoide in Gebrauch, global das Internat. Geodätische Referenzsystem GRS 80 (IUGG 1983):

Äquatorradius $a = 6378\,137\text{ m}$ (IAG 1976: 140 m), Polradius $b = 6356\,752\text{ m}$ (IAG 755m), Abplattung $f = (a-b)/a = 1:298,2572$; Volumen $1083\,212\,800\,000\text{ km}^3$; Masse $5,9742 \cdot 10^{24}\text{ kg}$.

Die Abplattung (die man anders als bei Jupiter freiaugig nicht sehen würde) folgt aus Erdrotation und Elastizität der Erde \Rightarrow Länge eines Breitengrades steigt vom Äquator zum Pol um 1 % (110,5743 - 111,6940 km). Längengrad = $111,3 \cdot \cos \text{Breite}$ (72 km in 50°). Dem entspricht eine

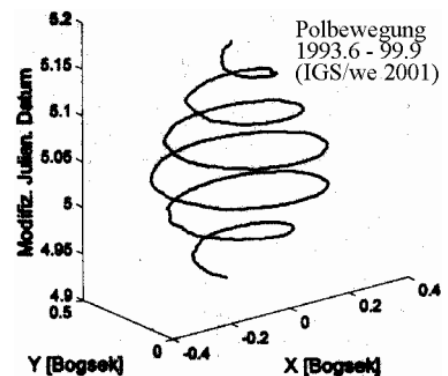
Schwerkraft $978,04\text{--}983,21\text{ cm/s}^2$ von $0\text{--}90^\circ$ Breite am Geoid (idealer Meeresspiegel), das vom Erdellipsoid um -110 m (Indik) bis +70 m (Kanada) abweicht. Mit der Höhe sinkt die Schwere 0,03 % pro km, lokal variiert sie $\pm 0,02\%$, die *Lotabweichung* 10-30" (Gebirge und Tiefsee mehr). Leichte *Birnenform* des Geoids: der Südpol ist dem Erdzentrum 40 m näher als der Nordpol.

4.3a Erdrotation, Präzession und Polbewegung

Rasch rotierende Körper sind abgeplattet und *präzedieren*: Sonne + Planeten ziehen den Äquatorwulst in die Ekliptik, doch die Drehachse weicht laut Kreiselgesetz senkrecht aus und wandert in Jahrtausenden auf einem Kegelmantel: Erde $\epsilon = 23,44^\circ$ in **25 800 Jahren**; Rot.Achse z.Z. ~ zum Polarstern, in 14 200^a Wega (α Lyrae). Durch 18jährig variable Mondbahnneigung ($\epsilon \pm 5^\circ$) kommt zu Präzession noch kurz- und langperiodische *Nutation* hinzu, "Nickbewegung" $\pm 20''$.

Erdrotation verlangsamt sich um 2 ms/Jh wegen Flutreibung in Flachmeeren. Bis 1000 v. Chr. durch Berichte totaler Sonnenfinsternisse rekonstruierbar (z.B. Babylon -136: $\Delta T = 3,25^h$). Zurückbleibende Flutberge übertragen diesen Drehimpuls auf Mond, der sich **4 cm/Jahr** entfernt.

Die Rotationsachse der Erde ist nicht mit Symmetrieachse ident, schwingt daher 5-10 m um Mittellage: *Chandler-Periode* der Polbewegung 415-433^d (Masseverlagerungen in Erdmantel, Atmosphäre). Schwächere Jahresperiode (Luftumwälzungen, Eis/Schmelze) \Rightarrow Breitenänderungen bis 0,3" (1886 Küstner, Bonn); koordinierte Messung seit 1899 Internat. Breitendienst 5 Punkte B=39°08'. Ab 1967 (International Polar Motion Service *IPMS*) tragen Satellitenmethoden zunehmend bei (Doppler, Laser), 1988 vorwiegend (150 GPS, ~100 Laser/Dopplerstationen, VLBI; leider kaum mehr *LLR*-Mondlaser). Der Internat. Earth Rotation Service IERS koordiniert die Analysen [Torge 2001; Www.IGS 2001].



Polbewegung läßt wie Erdzeiten und andere Geodynamikeffekte auf Elastizität schließen; starre Erde hätte *Eulers* 305^d statt *Chandlerperiode* 430^d. Ferner *Polwanderung*: mittlere Bewegung 0,0036"/Jahr etwa nach WNW, seit 1903 (Definition des CIO-Pols) immerhin 12 m.

4.3b Erdkern und Erdmagnetismus

Das Erdinnere wird mit Seismik, Schweremessung, Geodynamik und -thermik erforscht. Die Erdkruste (5-60 km unter Tiefsee bzw. Hochgebirge) ist im Flachland 30 km dick. Sie taucht *isostatisch* im Mantel ein, da z.B. die Alpen (Dichte ~2,65) 20 % leichter sind und wie ein riesiger Eisberg "schwimmen". Unter der Granit- liegt die *Basaltkruste*, dann der zunehmend heiße (1-5°/km) plastische Erdmantel aus Mg-Fe(Ca)-Silikaten. Bebenwellen verraten Schichtung und Elastizität, die Plattentektonik sein Bewegungsmuster: Kontinent- und Ozeanplatten gleiten 2-20 cm/Jahr; Gestein schmilzt ja ab 10-300 km Tiefe (geothermische Stufe in Kruste 8-120°/km). In *mittelozean. Rücken* (junge Meereskruste) steigt der Mantel hoch \Rightarrow Wärmestrom 5x größer als sonstwo.

Den Erdkern sieht man physikal.-chemisch unterschiedlich: meist als Nickel-Eisenkern *NiFe* bzw. *Fe-Olivin*, wo in beiden Fällen die 2898 km tiefe Mantelgrenze Magnetismus-Quelle wäre. 3) Reines Olivin (MgFe-Silikat), oder 4) Wasserstoff/Helium = komprimierter Solarstoff. Modell

3/4 erklärt Dichteanstieg Mantel-Kern (4-6/9-17g/cm³) mit Druck-Phasen-Übergängen, *NiFe* mit flüssig-fest. Im Zentrum rund **4-8000°**: ¼ Restwärme, 5 % Urkompaktion, 70 % von radioakt. Uran 235/238, Th und Ka [Egyed 1969].

Magnetfeld an Oberfläche nur 50 µT (µTesla; 50000γ), doch genug Richtkraft auf leichte Magnetenadeln => schräg in Feldlinie (Inklination *I*, winzige Schwerpunktkorrektur reicht). *Mißweisung* = *Deklination D* (Differenz zu geograf. Nord, auf 5' modellierbar), im Atlantik bis 45°, da Magnetpole z.Z. 15 bzw 22° von Rotationspolen entfernt und jährlich ~5km wandern. Hauptquelle des Feldes sind elektrische Ströme im Erdkern (*selbstinduzierender Dynamo*) und 10 % Ionosphäre => enger Zusammenhang Sonnenflecken-Sonnenwind, magnetische Unruhe [Egyed 69, Lang 97].

Erdmagnet. Sturm als "Zittern der Kompaßnadeln" (*D* schwankt ~1°, Feld bis 5 %), induziert Nordlichter. Ganzes Erdmagnetfeld mit Strahlungsgürteln wird von *Magnetosphäre* umschlossen. Sie reicht zur Sonne wegen Solarwind-Schockfront (p.34) nur 10a weit, in Gegenrichtung (fast parallele Magnetfeldlinien) aber 3-10mal weiter.

Die zwei *Van-Allen-Strahlungsgürtel* (seit langem vermutet, 1958 von Explorer I entdeckt, in Polarrichtung offen) sind geladene Teilchen wie Protonen und Elektronen von Sonne oder interplanetarem Raum. Werden durch Erdmagnetfeld eingefangen => Korkenzieherbahnen um Feldlinien zw. den Polen hin und her. *Innerer V.A.-Gürtel* (3-6000 km) hochenergetisch + Sekundärpartikel der kosmischen Strahlung. *Äußerer Gürtel* "sanftere" Protonen, 13-19000 km.

4.3c Erdoberfläche, Geologie und Geodynamik

Geowissenschaftler schließen oft von Oberflächen- auf Tiefeneffekte: aus *Hypsometrie* (Häufigkeitsmaxima 500, 100 und -4600 m; Egyed 1969] z.B. Urniveaus, Sedimentation und ihr Krustengleichgewicht. Aus Maximalhöhen/Tiefen (8.85/11.52 m) auf Erdkrustendicke (10-60 km, neuerdings aus 5 Methoden 5-70 km, bei Meeresbecken Osterinsel sogar nur 2 km). Aus Verteilung von Land-Meer (29 : 71), Randgebirgen und Terrassen auf deren *Wurzel* und die Geschichte der Kontinente, Eiszeiten und Meeresspiegel. Abplattung, Pol, Präzession (4.3a) => Elastizität, Dichte von Mantel und Kern. Erdbeben => weicher Erdmantel (Übergang ab ~400 km).

Geografie/Biologie zielen auf Analyse der belebten Sphäre [zB. Weiner 1989], Geologen auf Gesteinsbildung, Ablagerung und *Kreislauf* (typ. 200 Mill. Jahre; Venus langsamer? Mond, Merkur *tektonisch tot*, äußere Planeten flüssig). *Geolog. Gliederung* nach Entstehung (*eruptiv, metamorf, sedim.*), Mineralbestand (*Silikate, Quarz, Feldspäte, Olivin, Glimmer, Kalzit, Tonminerale, Erze*) oder nach *Gestein* (*Basalt, Granit; Kalk, Dolomit; Flysch, Molasse* usw). Prägend auch Verwitterung (chem, biolog.; *klastisch, Brekzie*), Temp., Druck, Dichte, Porenwasser, Elastizität.

Krustenbildung erst gravitativ-thermisch-chemisch, später Erosion und Gebirgsbildung – an Kompressionszonen der *Plattentektonik*? 200 Mill. Jahre jetziges Muster: 6 große, 10-15 kleine Platten (2-20 cm/Jahr, vertikal <1/4) angetrieben von Konvektionsströmen im Erdmantel. An Plattenrändern (Mittelmeer, Kalifornien) lösen Scherkräfte periodisch Flachbeben aus. Alte *Grabensysteme* wie Rhein, Ostafrika / Rotes Meer zeigen Kontinentaufspaltung, Tiefseegräben die Subduktion von Platten => zirkumpazifischer *Vulkanismus* (erzwungenes Abtauchen).

Fast alle Gebirge **a)** an pazifischen Kontinenträndern, **b)** in langer Kette Atlas-Alpen-Zagros-Himalaya-Malakka. Randgebirge versinken (Inselketten Ostasien, Indonesien) oder steigen auf wie

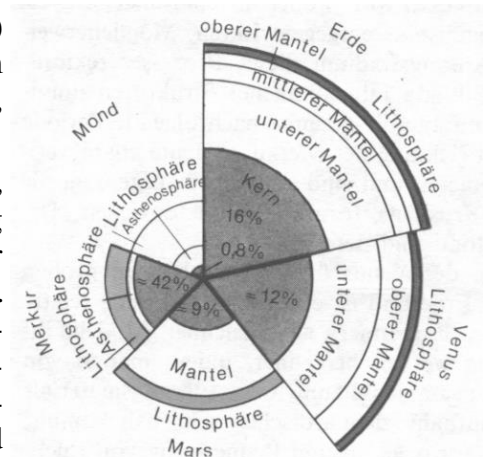
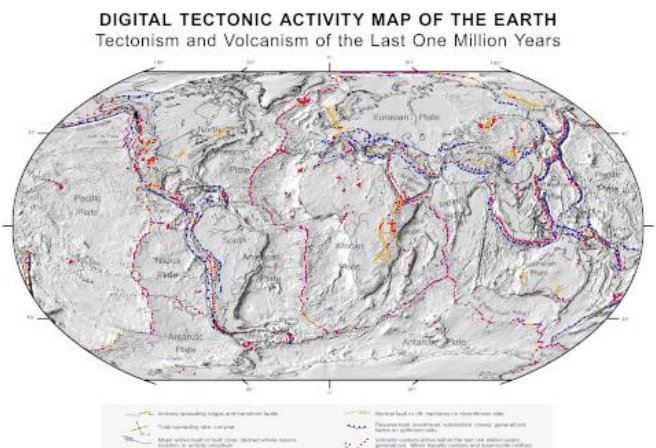


Abb. 104. Gegenüberstellung der Modelle des inneren Aufbaus der erdnähnlichen Planeten. Relative Durchmesser der Kerne in Volumenprozenten



Hawaii (s. Schildvulkane Mars). Oftmaliges Auf/Ab und *Transgression* hat auch **Wr. Becken** und Ungarn seit >100 Ma geprägt: Haie bei Horn, Ernstbrunner *Weißjuramuscheln*, Leithagebirge mit Korallengürtel – und Wr. Wald-Flysch aus südlicher Tiefsee, wo inzwischen Italien liegt...

Alte/rezente Bruchlinien prägen Gewässernetze, Stufen, Krustenbewegung, bes. in Sedimentzonen (ung. Tiefebene) und Faltengebirge (s. Salzburgs Paralleltäler), Gestein die Gipfel/Hänge => Landformenkunde für *Tertiär*, *Quartär*, Talperiodik, Talquerschnitt/stufen, Schutthalden, Wasserhorizonte, Salz-, Erzgänge, Eiszeitrelikte, Hochmoore. Anwendbar auch in mancher Baugrube.

4.3d Erdatmosphäre und Vergleich mit Venus/Mars

Die erwähnten Nordlichter entstehen 80 km hoch, die Lufthülle reicht aber in der Ionosphäre über 500 km und verliert sich dann als Wasserstoff-Helium-Hülle. Volumsprozent vom Boden bis einige 10 km: **N₂ 78.1 %**, **O₂ 20.9**, Ar 0.9, CO₂ 0.04, Ne 0.002, He 0.0005, Methan 0.0002 % und 4 Gase > 10⁻⁵ %. **Ferner H₂O ¼-4%**, je nach Temperatur- und Wetterlage (Tagesschnitt; kurzfristig in Wüste/Tropen 0-5 % möglich); wechselnder Wasserdampf = Wettermotor. Ferner Ozon O₃ in 20-60 km (UV-Absorption + Temp. maximal), SO₂ (meistes vulkanisch, >15 km), Spuren von FCKW (künstl.); ab großen Höhen zunehmend Helium (weniger O) und Wasserstoff.

Wolken: Dampfkondensat in aufsteig. Troposphärenluft (s.u.; >10 km dampffrei). Schönwetter *Cumuli* + starke Erwärmung = Gewitterwolken! Schichtwolken *Strati*, Regenw. *Nimbus*, *Cumulo-Nimbi* usw.; hohe Eiswolken *Cirren*. Spiralw. in Wirbelstürmen = kompakte Tiefdruckgebiete.

Himmelserscheinungen: kleiner und großer *Halo* (*Sonnen-, Mondring*) 22/45°: Helligkeitsmaxima ungeordneter Cirren-Eiskristalle. *Nebensonnen* 22/0°, 25/20°, 99/60°: größ. Kristalle, oft leuchtens, Schattenwurf, *Zenitregenbogen* und Verbindungsbögen beim Herabfallen.

Häufiger Beugungskranz mit Farbring(en) 2-10° je nach Tröpfchen der *Altostrati* bzw. Staubw. (wie Halo Wettervorzeichen vor Warmfront). *Lichtsäulen* bis 30° über Sonne: waagrecht fallende Eisnadeln. Selten die berühmte Gegensonne: gleichhoch in 180 oder 120° Abstand ein *Nordfenster* mit sonnenartigem Fleck. *Glorie* um Schatten von Kopf/Flugzeug: farbige Tröpfchenbeugung.

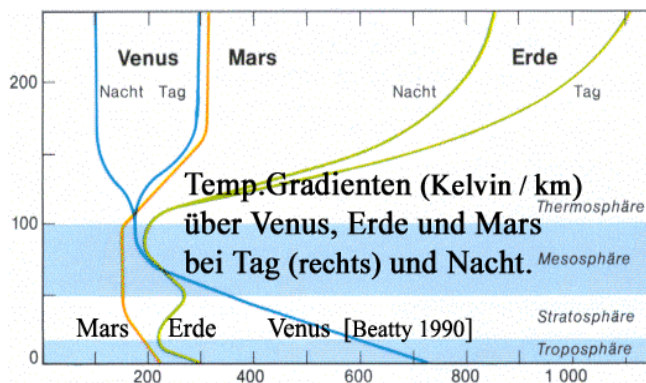
Himmelsblau: kurzweiliges Licht streut stärker; Gebirgshimmel dunkler, Sonne weißer. Tiefe Sonne rötlich, weil Blaulicht auf langem Luftweg seitlich herausgestreut. Himmelsblau polarisiert (Bienen...; Himmel im See dunkler, *Halos* besser sichtbar). Dämmerung: auch am Himmel überwiegt gelb/rot; im Osten steigt graublau Erdschatten hoch. *Bürgerliche D.*: Lesen bis Sonne -6°, bei uns 37-51^m (Tropen nur 24-30^m). *Astronomische D.*: finster ab 16-18° Sonnentiefe.

Temperatur: in Meeresniveau Globalmittel 15° (Extrema +60/-70°). Ohne *Treibhausgase* (CO₂, CH₄, H₂O) und Dunst wäre Mitteltemp. <0°. Vertikalgradient durch Absorption Boden >> Luft: im Mittel **VG₀ -6°/km**, aber lokal +2° (Inversion) bis -10°/km (feuchtilabil, Gewitter). VG variiert Lokalwetter, VG₀ ist ~const bis Tropopause 10-14 km, in Stratosphäre aber +2°/km. *Meso- und Ionosphäre* (80 km, 1 % Ionen) wiederholen diese Vorzeichenwechsel.

Venus (Fig/blau) hat const. VG bis 70 km (obere Wolken), wo Treibhaus und O₂-Dissoziation beginnt. Am Boden trotz 243^d-Tag immer 475°! Rasche Erde dennoch nachts ~10° kälter. In 150 km Anregung unbehindert => Hochionosphäre Venus und Erde selbe Tagaufheizung 200°, die bei dünner Mars-hülle wie alle 3 Teilgradienten gering ist.

Weitere Vergleiche der *Erdplaneten*:

Venus-CO₂ entsteht durch UV- und fotochem. O, das sich sofort mit Gesteins-C bindet. Bewirkt ird. Ozonloch ähnliches? Bei Mars andere Ursache. Wasserdampf: Venus' 2 mb fast Mittelwert der Erde, Treibhausanteil 25 % (Erde <10%). Aerosole: Mars oft Staubstürme, später hohe warme Trübwolken => Boden kühlt ab. Erde: Schwebstoffe feiner, Kerne für Nebelbildung. Venus: Staub und Schwefel in Sturmzonen >50 km. Argon: Mars wie Erde 1 %, Venus kaum.



4.4 Der Mars - fremdartiger Nachbar

Unser äußerer Nachbar variiert am meisten aller Planeten an Erddistanz, Scheibchengröße und Helligkeit: 55-401 Gm, 3-25", -2½ bis +2^{mag} => für Tycho/Kepler Muster exzentrischer Bahnen (0.094; Erde 0.017). Umlauf 1.88, synodisch 2.13 Jahre.

4.4a Klassische Marsforschung

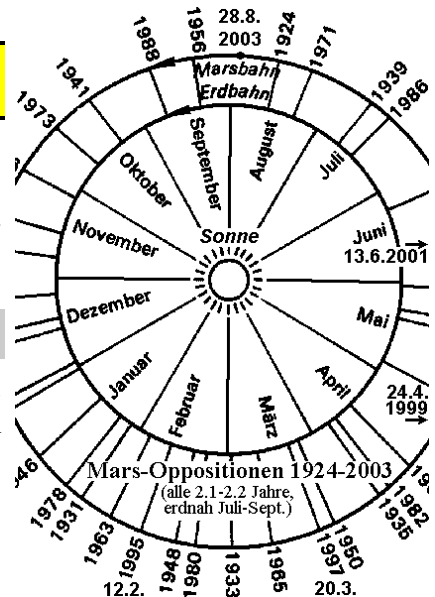
Radius 3400 km (53 % Erde), stark abgeplattet 1:120. Rotation 24.623^h und Achsneigung 25.2° fast wie Erde, aber Jahreszeiten ungleich (143-196^d). Dichte nur 4.0 => wenig Eisen (Merkur bei ähnl. Masse Fe:Si 5x höher, Widerspruch [Golombek 98]).



1. Karten 1869/77 Proctor/Schiaparelli, MarsØ 15/25".

Nomenklatur: dunkle *Oceans*

/Mare; helle, rötliche *Lands*. Große Dunkelgebiete auch in Erdferne sichtbar: **Syrtis Major** (Bild; erstmals Huygens 1659), **Mare Sirenum**, -Australe, Erythreum, **Sinus Sabäus** (Westrand ist areografischer Nullmeridian), Acidalia... Karte Antoniadi ~1920 bis 1960!



Visuell viel mehr Details als fotografisch (Luftunruhe, Sehschärfe, Erfahrung) – was aber CCD und Bildstapelung ändern konnte: *bad-Seeing*-Bilderserien bis 500 [Sky & Telescope, Sterne u. Weltr., AdF.de, SuW ab 2015), Beobachter-Tips [Gerstbach 2000, Roth 2001, Emmerich 2017].

Helle Hochländer: **Nix Olympica** (Riesenvulkan, s.u.; manchmal Rauchfahnen?), **Hellespont** (Farbseite 34a unten Mitte). In Perihelopposition Südpolkappe gut sichtbar, -70°, schmilzt aber im Sommer mit *Feuchtflecken* weg! Spektren: einige cm/dm CO₂ + etwas Eis und Wasserdampf, doch nirgends freie Wasserflächen. Nordpolkappe stabiler, reicht im Winter bis 50° Breite.

Gashülle zT. überschätzt (85 statt 7-10 mb), CO₂, N₂, Ar, O. Sommertag am Pol -20°, Äquator +20°. Jahresmittel -15°, Polminimum ~120°. Oft dünne Wolken / Nebel, Auflösung nachmittags. Eiswolken über Terminator und Polen? Manchmal globale Staub-Sandstürme, zB. 1956 und bei 2 Raummissionen. Zwischen gelbroten "*Wüsten*" jedoch beständige Farben. Wintergrau/Braun => *Sommerblau* [Lowell 1890] und Grüngebiete (Kuiper/Slipher 1954-60: "Flechten, denen Sandstürme auf Dauer nichts anhaben, oder niedrige Vegetation" war unsichere Spektroskopie).

Die Canali zw. Dunkelgebieten deutete Schiaparelli 1879 mit jährlicher Poleis-Schmelze oder geologisch. Er schloß vor begeisterter Presse Kanalbau nicht aus, zweifelte aber: saisonaler Luft-, Farbeffekt? Förster [1901]: zarter visueller Kontrast der fürs Fernrohr zu feinen Details? (Eigentest: Zeitung aus 2-5m, Zufallsmuster oder Lücken => "Linien"). Etwa 60% der Canali sind wirkliche Linienstrukturen, keine optische Täuschung! [Gerstbach 2003]. Von Sonden entdeckte Ablaufkanäle alter Überschwemmungen sind von Erde aber kaum sichtbar, außer 1-3 Canyons. Jedenfalls wirkt der Rummel um "Marsmenschen" bis heute nach – teilweise sogar positiv: UFOs, Däniken, NASA- und Astronomie-Budgets, Suche nach galaktische Planeten ...

Innerer Aufbau: kleinste Dichte der *Erdplaneten* => vermutlicher Eisenkern nur klein (Abb. in Kap. 4.3b). Mars gleicht eher Mond als Merkur, niedrige Kerntemperatur; Schwerefeldanalyse durch 1877 entdeckte Kleinmonde Phobos und Deimos (25, 15 km, dunkler als Lava).

4.4b Raumsonden zum Mars

Seit Juli 1965 Marsforschung mit Fernerkundung: Mariner 4 naher Vorbeiflug 229^d nach Start, in 24^m 22 TV-Bilder (je 1 % v. Mars, 2 Farbfilter) aus 11 200 - 9 200 km. Abtastung 200 x 200 in 64 Stufen, Übertragung zu Erde (216 Gm, 10 W => 10⁻¹⁹ W) dauert 8.6^h/Bild, 1969 Mariner 6/7 nur mehr 5^m [Archiv GG]. Gleichzeitig diverse Gas- und Strahlungsmessungen.

Nach aufreg. Tagen / Kontrollen: Mars hat viele Krater, auch Syrtis mj. => Dunkelgebiete sind neben Tiefland auch Hochflächen. "Lufthülle" nur 10 mb, 90 % CO₂! Kaum Magnetfeld [Moore].

Mariner 6/7 31.7.-5.8.69 3420 / 3200 km, durch Meteorit polnäher als geplant: hunderte Aufnahmen nun hoher Auflösung "bestätigen tote, mondähnliche Welt" [Beatty; Archiv GG]. Aber

13.11.71 **Mariner 9** (Start 29.5.) in Bahn 1360-17000 km. Nach ¼ Jahr globalem Staubsturm große Vulkane (15.11. heißer Nix Olymp. -48+7°), Cañons, alte Abflußkanäle, Sanddünen, Palsedimente => "Mariner 4-7 über untyp. Gebieten". Südhälfte +3 km, viele Krater. N. glatt, 15 Vulkane [Moore 1990, Raeburn 2000]. Bis 10.72 von 90 % des Mars 7239 Fotos. UV-, IR-Spektrometrie (Gase und Teilchen), Radiometrie Temperaturgang am Marsboden. Ab 1.12. sowjet. Sonden Mars 2, 3: Fernerkundung, Temp.; Landekapsel (Elektris südl. Tharsis) versagt.

Viking 1-2: 6/8.76 erkunden Orbiters (Kamera, IR, Radar) biolog.-geochem. Landeplätze. Juli/Sept Ebenen *Chryse / Utopia*: trotz 25°/180° Ortsdifferenz ähnliche Steinfelder (blasig), rote Oxidschicht, rostroter Sand. Flußbette, in Chryse Dünen. Biologie-Aktivität: 2x6 Bodenproben Gaschromatograf (neg.) und Massenspektrograf (eher negativ). Orbiter-Detektor Wasserdampf: überall deutlich, maximal über Nordpolkappe [Moore].

4.7.97 Pathfinder: meteo-geochemische Studien im Ares Vallis (altes Überflutungsgebiet mit Steinmischung); außer Landestation 6rädiger Sojourner →

12.9.97 Mars Global Surveyor Umlauf 370 km/93°, Magneto-, Spektrometer, Präz.-Kamera MOC ±2 m: Vulkano-Geologie, Erosion, Wasser... [SuW 2001/6-9]. Laser-Altimeter ±37 cm/10 m: Radius 3389.508 ±3 m, dreiaxig 98.63, 93.76, 76.12, 1:170 fossil. Versatz -233, -1428, -2986 m!

24.10.01 Mars Odyssey Ellipse nach 200^d/460 Gm: in 80^d Aerobrake 300-27000 => 400 km, 93°. Mineral./Geochemie: Gammasspektrometer (Wasserdetektion; -183°); 1.11. Themis IR-Bilder ±90 m (regulär Feb.2002-05; 10 Kanäle 6-15µm +5 opt. ±20 m); Sensor für Solar- und Kosmische Strahlung (kl.Schaden). Derzeit Südpolkappe Ø 900 km, -120° [NASA.JPL 2001/12].

4.1.2004 Mars-Express (ESA) mit Orbiter und Landemodul. Stereokamera => ausgetrocknete Flussläufe, Eisseer unter Chryse Planitia [Wikipedia]

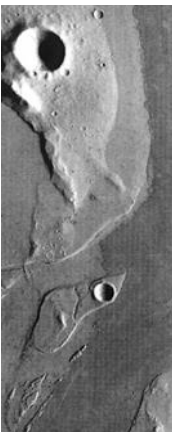
2003/04 NASA-Roboter **Spirit** (Krater Gusev, bis 2010 aktiv, hydrolog. Sedimente) und **Opportunity** (Meridia Planum, bis 2018!)

Mars **Reconnaissance** Orbiter (Details Vulkan Arsia Mons, Salzlagerstätten). 2012/13 Mars Science Laboratory (Rover Curiosity) und MAVEN (verlorene Atmosphäre), 2018/19 **InSight** (10m-Tiefbohrung geplant, thermischer Gradienten usw.)

4.4c Marssonden-Ergebnisse und Interpretation

Krater: bis 1. Sonde 1965 völlig unerwartet. *Mondähnlichkeit* vom Bildmaterial Mariner 4-7 vorgetäuscht: Nordhälfte kaum Krater, Südhälfte 2-5 km höher und voller Großkrater. Wie Mond, Merkur 5-500 km (häufigst 40-100 km), aber 2-4x flacher (Ø:Tiefe 10-50) => Auswurfmaterial flog nicht hinaus, sondern floß eher, wohl wegen Eis oder Gasen im Untergrund [Beatty 38-45].

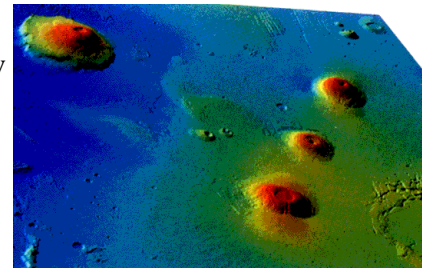
Sehr variable Kraterdichte v.a. durch geolog. Vielfalt (Strukturen 0-4 Ga) mit Lava- und Sedimentbedeckung seit ~3 Ga; nur Südkrater gleich alt wie Mond, Merkur [Fol.44f, S⁰¹432 ↓].



Junge Basaltlava, unten 4 km breit.

Vulkane: Tharsis-Aufwölbung 8 km (p.34/46), alte Krater, 3 Schildvulkane in Reihe 10-17 km ü.Null, aktiv seit ~3 Ga. Westrand Olympus Mons (=Nix Olympica), größter Vulkan im Sonnensystem: 26 km (8x Ätna), **↗** Caldera 80 km mit Einsturzserie, Basis 550 km [Moore 228f]. Mariner 4 maß über Sandsturm am Gipfel 7° zuviel [Archiv GG], offenbar Gasexhalationen.

Alte Vulkane niedriger: Kruste vor 3 Ga dünn, konnte hohe Last noch nicht tragen; nur ein lang erloschener im Osten, *Elysium Mons* 300/12 km. Brüche, Aschenkegel wie auf der Erde... Älteste Lavadecken 4¼ Ga auf südlicher Hochfläche.



Cañon *Valles Marineris* östl.Tharsis, 4800 km wie ostrafr. Grabenbruch: Radialbrüche, Krustendehnungen im Täler-*Labyrinth Noctis* und in Parallelblockfurchen. Mittelteil gabelt in 3 tiefe Tröge 200 km breit => Canali 1879! Schichten bis **9 km** Basalt/Sediment; trockene Flußbetten mit Gerölltransport, Erdbeben [Moore 90; Sojourner 98]. Heute kaum Wasser, doch Eis im Untergrund; flüchtige Gase verursachen Streifenböden?

Wasser, Erosion: oft Windsedimente, Dünen; blaugüne Farbe nach Sandstürmen bis 1965 als frische *Vegetation* gedeutet.

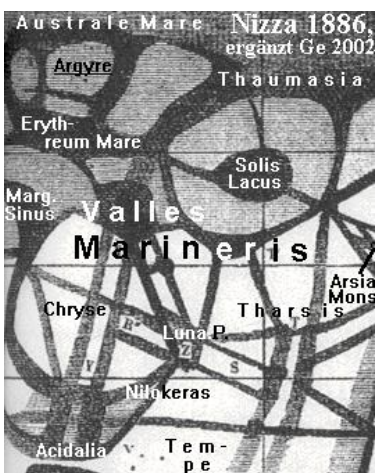
Trockentäler, Terrassen; Ausflußkanäle plötzlicher Überflutungen: früher viel Wasser (Meer ~200m) oder Grundeisschmelze bei Vulkanismus [Suw7/01]; **noch heute?**

Nordpolkappe Wassereis, spiralgig Wind-Eis-erodiert; Gestein ist Sand, Lehm, Silikat. Südpol CO₂-Kappe, 800 km-Becken (alter Einschlagkrater?) mit Gletscher- oder Windsedimenten [Moore 1990].

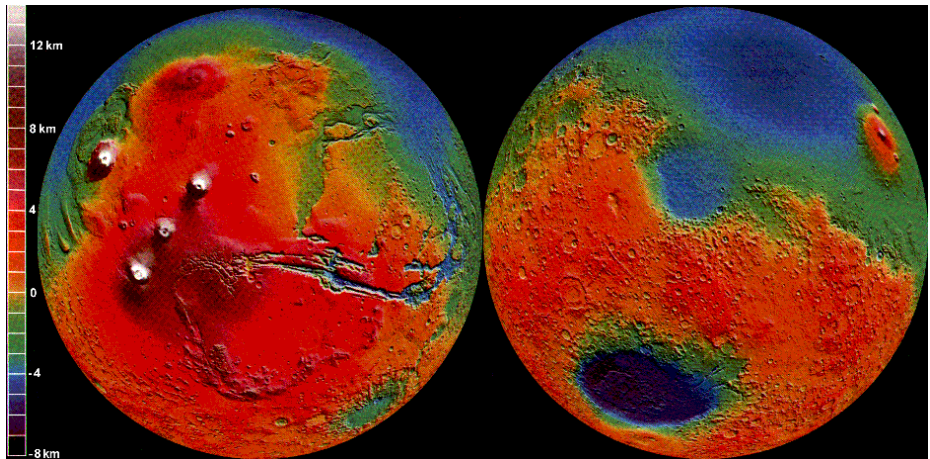
Schwerefeld: stark **fossile** Abplattung,

ellipt. Äquator. Seit 3 Ga zunehmend vulkan. Asymmetrie => Süd 6-7 km höher* als N; Tiefländer alte Ozeane? Viking-Modell Grad 50 nun 80 => "Areoid"-Differenz zu Kugel ± 20 km, zu 3-achsigem Ellipsoid ~10 km; Vermessung mit Kombination aus Laser-Altimeter MOLA (s.u.) und Bahnstörungen der Sonden. Keine Isostasie: Kruste 3-92 km, nach Süd dicker*, dünn unter Einschlagbecken mit Schwereanomalien $\Delta g < 0$ oder **ringförmig** (Hellas -200, Tiefpkt -7.8 km). Bei Vulkanen $\Delta g > 700$ mgal [Suw 1431-34].

Trägheitsmoment: kein *Chondrit*, relativ kleiner Kern. Präzession 170 000^a => Jupiters Einfluß auf Rotationsachse kann Klimawechsel induzieren (siehe Eiszeiten)!



Nizza 1886: 3 Canali entsprechen Val Marineris, 4-5 andere Kraterreihen oder Stufen [Gerstb. 2002]



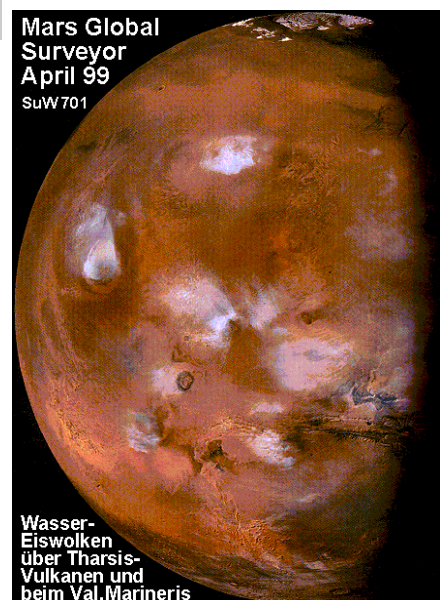
MOLA-Höhenmodell (Mars Altimeter). Westen Tharsis-Rücken, 3 Schildvulkane Arsia, Pavonis, Ascraeus Mons 11-17 x 550 km, links **Olympus Mons** 26 x 550 km. Links der Mitte 4500 km-Cañon Valles Marineris, floß ins nördliche Tiefland (blau, 7 km unter rotem "Kraterland"). Tiefblau **Hellas** -7 km. Im Osten alte Vulkane.

4.5d Marsatmosphäre

Schon früh am Fernrohr wegen driftender Wolken vermutet: rötlich-gelb (Staub, Sand), selten weiß-bläulich, Vulkanfahnen. UV vergrößert Lufthülle, spektrosk. CO₂ schwierig => Druck, N₂ 10x überschätzt: Bodendruck nur 6-10 mb (hPa) je nach Menge Polareis. Kohlendioxid 95 %, N₂ 3 %, Ar 1.6, O₂ 0.13, CO 0.1, Wasserdampf 0.03 (rel. Feuchte hoch), etwas Ne, Kr, Xe, O₃. Temperatur-Schichtung einfach (Kap. 4.3d).

Wind laut Viking 1-2 nachmittags 25-30 km/h, Böen bis 80. Regionale Staubstürme werden alle 1-3 Jahre global, extrem zB. Juni 2001 (Atmosphäre 30° wärmer, Boden kälter).

Durch dünne Luft liegt Hitzepunkt direkt unter Sonne, Wind gleicht Sommer-Winterhälfte etwas aus, verstärkt durch CO₂-Polar-eisbildung. Dennoch Viking-Tagesvariation bis 50° (bei Staubsturm 30°), im Jahr **150-250 K**. Sommer monoton, Wind 1-2 m/s, doch Herbst je 1 Tief / Hoch wöchentlich.



Global: 147-310 K (CO₂-Eis ~150 K), Mitteltemperatur -53° (altes Modell -15°), Äquatorextrema +18/27°, -112° Nachtende. Örtliche Maxima stark von Infrarot-Albedo abhängig, >0.16.

Resümee: Mars ist erdähnlichster Planet, seine Geologie eine Mischung aus **Vulkanismus**, Tektonik, **Wasser**- und Winderosion. Dünne Atmosphäre war früher viel dichter (siehe N₂, Edelgase, mehr Wasser). Tektonik aber "eher vertikal als **horizontal**". Bisher keine Lebensspuren. Die *Canali* (1877-1955) sind zT. Kontrasteffekte, zu etwa 40% aber reelle Strukturen.

4.5 Die Kleinplaneten (Planetoiden, Asteroiden)

Zwischen Mars- und Jupiterbahn kreisen hunderttausende Körper >1 km, davon etwa 40 über 200 km: 11 der 16 Entdeckungen 1801-51 oder 2 letzte 340 km-"Knödel" 1903/10. Dennoch haben sie <0.002 Erdmassen (störungstechnisch <<0.1) und künftige Entdeckungen – seit 1930 alle unter 50 km – werden das kaum ändern. Planetoiden außerhalb des Hauptgürtels (2.2-3.6 AE) können Mars / Erde nahekomen oder gehören zu Jupiter, ja sogar Neptun. Von diesen in Bahn und Aufbau verschiedensten Körpern entdeckte man früher 10-25 jährlich: 1930 waren **1170** Bahnen gesichert (123 allein von Joh. Palisa, Wien), 1957 bereits **1616** (90 % <120 km und <15^m), 1982 aber **2740** [Moore 1990].

Dann stiegen die Entdeckungen durch CCD-Technik exponentiell (Raumsonden, Orbiter, HST), bis 2001 auf **19.000** Planetoiden [Dvorak]. Ab ~2005 Robot-Teleskope, 2014 Astrometrie-Satellit GAIA, täglich ca. 100, => 2018 ~**700.000** >50 m. Darunter ~600 „Erdbahnkreuzer“ bis 1 km und 8000 >140 m (spezielle Suchprogramme USA, ESO, RU, China).

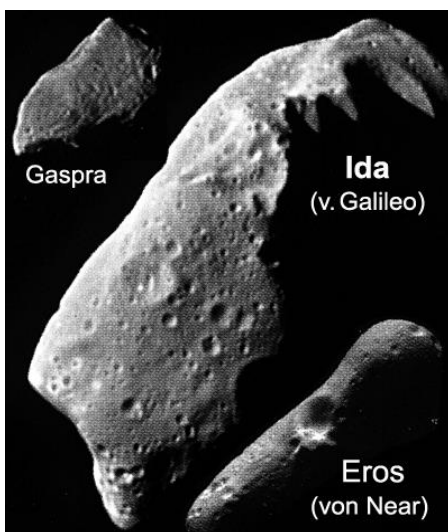
Ab 1992 auch Transneptune (2005 ~400, 2018 3000; Eris 2326 km, 6 >1000). Sehr dunkle, locker aufgebaute Körper (Staub, Eis, Schotter, Reste der Planetenbildung, z.T. Kometenkerne).

4.5a Entdeckungen von Ceres bis Nr. 450

(nur 46u 1>)

Die Entdeckung der Ceres (960 km, 1.1.1801) wurde durch die Lücke in *Titius' Reihe* (§ 4.2) ausgelöst. Bis 1807 folgten als vermutete Planetentrümmer Pallas (605 km; ~1980 kleiner Mond entdeckt), Juno 250 km, Vesta 530 km (6^m). Von Nr. 5-450 (1845-99) sind 14 >230 km (4 >300) und viele erdnähere <50 km (Eros 10x30). Größenmessung: mikro-, fotometrisch (Albedo A geschätzt, aus Farbe oder Analogie), oder kombiniert thermisch (infrarot wirkt mit 1-A).

Beispiel Ceres: 768 und 677 km [Schaifers 1960], komb. 1003 km [1983-99], 930 (A=0.054), 952 ±9 [Hubble-CCD 2001]. woraus ich **960 ± 20 km** schließe => Dichte 2.6, kohlgiger Typ mit etwas Eis; kl. Eisenkern? Kugelig ±14 km, rotiert 9.075^h, Kreisbahn 404 Gm, 4.4^a. Im HST überraschend keine Krater (s.u.), nur ein etwas dunkleres 250 km-Oval [SuW 2001/10].



Das "Bruchstück 5" stimulierte 1845 die Suche; noch [Heide 1957] vertrat die Trümmertheorie. Die Form von ¹⁰Hygiea (1849, 350x500 km), 14 Funde Goldschmidts (1857 ⁴⁴Nysa, gelbe Linse) und 24 Luthers (1867-90) kamen zu Zeitungs- und Preisehren. Johann Palisa fand 121 Asteroiden (Pola 1870-77, Wien 1885-1924; Sicherungs-, Bahnrechnung, Sternkarten); mit Max Wolf (fotograf. Reihenentdecker ab 1892) 1. Sternatlas für Suche / Identifikation (200 Blatt, auch Fund- u. Bahnsicherung, Astrophysik, §3). Wolf plante Bruce-Teleskop (2x2 m/5) und 1898 Landessternwarte Heidelberg; Doppelspiegel 2.8m/4 => in 50 Jahren **35.000** Planetoidenörter [Roth 1960].

Ab 1900 nur mehr 5 Asteroiden >100 km entdeckt (zwei mit 340 km), **ab 1930 alle <40 km**. Jupiterfamilie 1906 („Trojaner“ 60° vor/nach Jupiter), erste erdnahe *Amor*-Bahn 1910 Palisa, 1920-49 Bahnen bis Merkur bzw. Saturn.

Form: große Planetoiden ~kugelig (sogar ¼ bei 50-100 km), 300 km um 5-15 % deformiert, 150 km 10-50 %, oft linsig-irregulär. Untersucht an Rotation / Lichtwechsel (meist 3-20 Std) =>

Vielfalt in **Albedo** (2-40%), Farbe (kohlig; dunkelrot bis weißlich-gelb) und Struktur. Seit ~1950 Klassifikation analog den Meteoriten [Heide 1957, Moore 1990]:

4.5b Planetoidentypen, Kraterstaub und Erosion

Typ C ~Kohlenstoff-Chondrit, $A < 0.065$, Gestein schwarz-dunkelkrümelig mit Eis. **50-75%**, v.a. äußerer Hauptgürtel. Vertreter Mathilde 0.04 (s.u.), $^1\text{Ceres}$ 0.055 (s.o.), $^{48}\text{Doris}$ 0.03, 250 km.

Jenseits Hauptgürtel manche rötlich-dunkel (RD-Spektren), auch einige Trojaner.

Typ S heller, rötlich, 0.07-0.23. Ähnlich Siderolith/Eisenstein oder normaler Chondrit mit Olivin und Pyroxen, oft Eisen. **15 %** (Innenzone 40, Mitte ~ 0). Beispiel $^3\text{Juno}$ 0.15, 250 km [Herm.00; Bea 95, 198]. Silikat wie $\frac{3}{4}$ der ird. **Meteorite**. Ähnlich **R-Typ** (hell, kl. am Innenrand), ~5%.

Typ M mittelhell ~0.1 [Mo 245], Fe+Ni ohne Silikat = kollidierte Kerne? **3 %**, eher Mitte; $^{16}\text{Psyche}$.

Typ P+D dunkel, ~**20 %**; bei 4 \AA bzw. Trojanern primär [Beatty 95f]; andere singular.

KBO *Kuiper Belt Objects*: bei / außerhalb Neptunbahn, Gesteinskerne früherer Kometen (s. dort) oder ehemals jupiternahe, dunkle Körper. Derzeit 246 mit 2-900 km [SuW 2001/12].

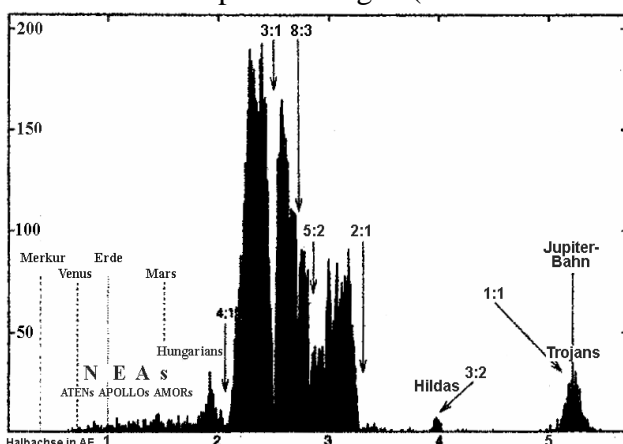
Da Planetoiden wohl ähnlicher Herkunft wie Merkur bis Mars (Planetesimal-Akkretion plus "Metalle"), vermutete man **Krater** – von Raumsonden bestätigt 1991~99 [Galileo 93, Archiv GG]:

Wie erwartet **Gaspra** ~20 x 10 km und **Ida** 56 x 24 x 20 km, mit 3km³-Mond! Aber [NEAR ~99] bei $^{253}\text{Mathilde}$ (1885 Palisa, 52 km, $D=1.3$) und "Hantel" $^{433}\text{Eros}$: viel Felsbrocken, zu wenig Krater <200m; 4 m Ø nur 1 % von Mond => **thermische Erosion** rasch, **Staub vieler Einschläge** bedeckt Kleinkrater 10m tief! Darunter Schutt oder Festgestein, Chondrit schwefelarm? "Längliche Asteroiden" sind oft **Doppelkörper**, einige % haben Satellit. Einschläge hätten manche fast gesprengt => überlebt diese Gruppe <50 km z.T. nur als Konglomerat?

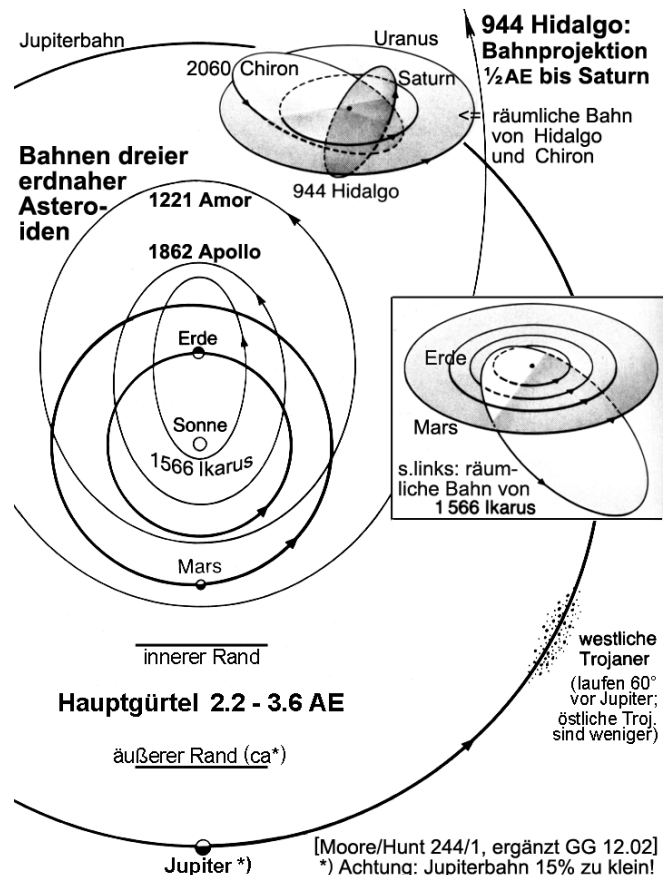
4.5c Bahnen von Planetoiden und Außenseitern

90% der 3000 bis 1985 bekannten Bahnen lagen im **Hauptgürtel** von 2.2-3.6 AE (Mars 1.38-1.66, Ceres 2.55-2.94 AE, Jupiter 5.20). Aber Exzentr. e, Bahnneigung i oft deutlich über Planeten: $^2\text{Pallas}$ 0.24, 35° [Dyn.99, Dvorak 01].

Kommensurabilitäten – Bahnücken durch kumulative Jupiterstörungen (Kirkwood 1867):



Jupiter begründete auch 2 **Trojaner**-Familien: Umlaufzeit ~11.86^a, aber 60° voraus- oder nachlaufend nahe **Librationspunkt** 4, 5. Entdeckt 1906 Wolf / Kopff: $^{588}\text{Achill}$, $^{617}\text{Patroklos}$, $^{624}\text{Hektor}$ (11.6-9^a, $i=17^\circ$, 140-200 km); 1960 ~20 (einige >100 km), 2001 ~900 [Roth, Dvorak]. Vermutlich analog [Beatty] tausende Körper bis km-Größe; Reservoir könnte sich von außen und Streunern (s.u.) erneuern, gleichzeitig durch Kollisionen zerreiben. Gegen Störung/Abdrift fast sicher.



Marspassanten: ~5 % Asteroide kreuzen Planetenbahnen – auswärts bis Saturn / Uranus (Transneptun => Sonderfall) oder innen zu Mars/Erde. Computersimulation erklärt Extreme wie Hidalgo (bis Saturn, 2-10 \AA , Abb.re) durch **längere Störung** aus Hauptgürtel; für 1-100 Jahre auch Einfangen als **Jupitermond** möglich. Häufiger aber **Drift zur Marsbahn** => Typ **Amor** (Perihel zwischen Mars-Erde) oder Apollo (kreuzt sogar Erdbahn => Kap.4.5d):

⁴³³Eros 1.13-1.78 \AA , erdnah bis 22 Gm, 1900/31 genaue \AA -Vermessung. Bizarre Form p.47f; wird durch Mars- und Erdstörungen in 20 Ga zur Sonne stürzen [Murray 99, Dvorak 01]. ⁷¹⁹Albert 1.19-4 \AA (1910 Palisa/Univ.Wien), später in großer Distanz trotz 200km Ø verschollen, erst 2001 wiederentdeckt. So gab ¹²²¹**Amor** (1932 Delporte, 1.08-2.76 \AA) der Gruppe den Namen.

Sonnennahe Bahnen: innerhalb Mars- und Erdpassanten dringen Asteroiden bis Venus vor: Apollo (s.u.), Adonis, Hermes..., doch gehen so exzentrisch laufende, nur km-große Körper oft verloren. Zwei schneiden sogar die **Merkurbahn**: ¹⁵⁶⁶**Ikarus** (1949 Baade, 0.19-1.97 \AA) und der kürzlich entdeckte ³²⁰⁰**Phaeton** (Perihel 0.14 \AA ; trotz ~100km/s 600° Erwärmung). Er zeigt übrigens auch in Sonnennähe *keine* kometaeren Emissionen [ESA 2002]. Ikarus bleibt der Erde 7-8 Gm fern – wegen seiner 23° Bahnneigung (p.48 re/außen).

Objekt Wirtanen: zunächst hierher gezählt, inzwischen als period. Komet in einigen Sonnennähen beobachtet. Sollte 2005 Ziel einer Raumsonde sein, dann 2016 Komet Tschurmajow.

4.5d Erdnahe Asteroiden, NEAs (2019/20 aktualisiert)

Der erste *Erdbahnkreuzer* wurde 1932 entdeckt, ¹⁸⁶²**Apollo**, 0.65-2.29 \AA , ging aber bis 1973 verloren. Nach Erdnähe 1982 namensgebend für Bahntyp. Ähnlich **Hermes** 1937, Annäherung bis 2 x Mond. Noch enger bei Aphel >0.98, a <1 \AA : erster dieses Typs ²⁰⁶²**Aten** 1982, a = 0.97-99 \AA , Ø 7 km, Erdnähe in 10 000^a < Mond. Um 1990 kannte man 9 ATENS und 63 APOLLOS, 1999 schon 60+415 [Dvorak 2001], darunter einige Minikörper mit Erdnähe < Mondsdistanz.

Wegen Yukatan-Krater (Sauriersterben vor 65 Ga, 10 km-Asteroid) und Tunguska 1908 erfasst man alle NEAs und **mögliche Kollisionen** => statistisch gibt es alle ~25 Mill. Jahre *fast-globale Katastrophe*. Hochrechnung auf noch unbekannte **NEAs bis 1 km** => alle 100 000 Jahre *Regionalereignis* (Krater ~20 km, evt. monatelang Staub). Für Objekte bis 100 m => alle 3-5000 Jahre *Lokal-Ereignis*. Körper < 80 m dürften wie 1908 explodieren und nur **Druckwelle**-Schäden anrichten [SuW 6/2001]. Unter 20 m liegt Übergang zu hellen *Feuerkugeln* und **Meteorfällen** [Beatty 190f, Herrm. 127-135].

Vor 100m bis 1 km-Kollisionen dürfte es ab ca. 2030 Schutz geben: möglichst vollständige **Erfassung der NEAs** (laufende Projekte) und allenfalls **Ablenkung** des Asteroiden. In größerer Distanz genügen dafür einige cm/s; ein Atomsprengsatz wäre verkehrt (viele Einschläge).

Bis 2010 tauchten noch Asteroiden **unvermutet** auf: 2001 EC ~3/4 km am 26.2.01 in Erdnähe 1.47 Gm, 5^d unbemerkt. In Distanz Platz 27, in Größe 3; Bahn lag erst nach 9^d fest [SuW 2001/6]. Bisher größter *und nächster NEA* war 1937 UB **Hermes** mit 800-1400 m in 730 000 km. 2002 kam 1 km-Objekt 1998 WT24 bis in 1.9 Gm, fotografiert von Hobbyastronomen, 11^m.

Unentdeckte Körper bis 100 m inzw. selten, außer aus Sonnenrichtung kommend; **SOHO**). Zuletzt 2019 OK (100 m) in 70.000 km Erdentfernung. Vorausberechnet 2018: **Apophis** (400 m) am 13. April 2029 in ca. 30.000 km Distanz.

Ende in der Sonne? Um 1990 entdeckte Sonnensatellit SMM mehrere *Suncrasher*-Kometen, was Simulationen erdnaher Asteroiden 1.5-3 \AA anregte [SuW 1995/3]: Gruppe **A** 26 NEAs $e < 0.6$, kommensurabel zu Venus bis Mars; Gruppe **B** 20 Encke-NEAs $0.6 < e < 0.85$. **Resultat:** 16 bzw. 22 der 46 leben < 1 Ga (meist Sturz in Sonne, nie auf Planeten, seltener Hyperbelbahn). Nach **anderen** Autoren müssten die Zahlen chaostheoretisch bei 100:2:10 liegen.

Auch Eros dürfte nach langsamer, dann chaotischer Änderung seiner Bahn vom Amor- zum Apollotyp sowie nahen Mars- und Erdbegegnungen in ~20 Mill.Jahren Teil der Sonne werden – oder verdienen seine "guten Dienste für die \AA " eine Rettungsaktion?

4.5e Transneptune, Zentauren, Kometenkerne (alter Stand 2002)

1992 wurde ein Planetoid bei 43 \AA im *Kuiper-Gürtel* entdeckt, dem ~1960 vermuteten Reservoir von Kometen. Die Größe von ²⁰⁰⁰⁰**Varuna** blieb mit 350-1700 km unklar - je nach Albedo, die von 0.02

(dunkle Kometenkerne) bis 0.45 (Pluto / Charon) reichen konnte. Erst 2001 gelang die therm. Messung (§4.5a), die bei KB-Objekten (p.48 oben) mit ~45 K extreme Empfindlichkeit und hochgelegene Observatorien braucht [SuW 10/2001]. Aus $A = 0.07$ folgt **900 km** => nach Charon und Ceres drittgrößter Kleinplanet.

Bis 2002 fand man **350 KBO** mit Perihel um 40 \AA (Neptun 30), darunter fast $\frac{1}{4}$ *Plutinos* (~30-50 \AA) und 10 % *gestreute* Aphels <200 \AA [Wuchterl 2001]. **Ferne ~100 KBOs** haben 200-500 km und dunkle Oberfläche (0.02-4) fast wie **periodische Kometen** im Aphel, die aber 5-30 x kleiner sind. Der NASA-Satellit SIRTAF wird sie 2003 thermisch astrometrieren – vielleicht findet er dunkle Objekte größer als **Pluto (2340 km)**, dem "Planetenrang" eigentlich kaum zusteht (3:2 Resonanz zu Neptun, kleiner als 7 äußere Monde, geringe Dichte; nur durch Eisschicht relativ hell).

Dez. 2000 neuer "**Plutino**" 2000WR106 bei 43 \AA , mit 20^m hellstes der damals 346 KBOs: A_{Pluto} gäbe 250 km, übliche Albedo 530-1200 km. Ferner bei Quasar-Suche 2000EB173, 19^m und 500-700 km*. Weitere KBOs ähnlicher Größe (1 mit Mond!) auf Bahnen \neq Pluto, daher schwächer. Insgesamt zehntausende Transneptune >100 km vermutet, s.u. [Wuchterl 2001]. Sonnenferne KBOs etwas rötlich* – wegen UV-Sonnenstrahlung?

Entwicklungsmodelle (§4.1f) erwarten mehr KBOs jenseits 50 \AA , weil "Großplaneten die Planetesimal-Akkretion nicht mehr störten". Zwei Suchprogramme 99/00 für Originalkörper bis 160 km (Kreisbahnen <65 \AA) fanden nur 24 Ellipsen, Herkunft <53 \AA (bzw 57 <50 \AA) => **Sonnensystem hat Rand** (?↓) oder mögliche KBOs >55 \AA sind **schwarz*** bzw. **winzig*** [SuW 3/2001].

Eine sonnennähere Asteroidengruppe, die **Zentauren** (~30 \AA) haben helleres Material (0.04-0.15), zT **rötlich**. Seltsamer Erstfund ²⁰⁶⁰**Chiron** (1977 Kowal), 8.5-18.8 \AA / 51 Jahre: ~Saturn/Uranusbahn, etwas instabil, Abb. p.48). Ø 400-700 km, lt Radar dunkel (kein Eis), für Kometenkern viel zu groß \cong Saturn-Außenmond Phöbe: 1660 **16 Gm** = 1.2 $a_{\text{phö}}$ [Moore 244].

⁸⁴⁰⁵**Asbolus** stark variable Rotation im IR-Spektrum => durchschlag großer Krater strahlungsgerötete Kruste? Sehr helles, frisches Material liegt bloß... Dadurch unübliche Bahn?

Verwandtschaft mit Kometen: Außer der niedrigen Albedo (s.o.), von Spektrum bzw. Farbe [Beatty] sind auch die ähnlich exzentrischen Bahnen vieler KBOs ein Indikator für Gemeinsamkeit in Ursprung und Natur. Verschieden ist wohl die Größe – Kometenkerne sind ~30x kleiner als übliche KBO-Durchmesser – doch kann es gleitende Übergänge geben (derzeitige Nachweisgrenze knapp 100 km; Kometen in Sonnennähe einige km). Ob die Konsistenz (Konglomerat, *schmutziger Schneeball*, Eis-Gestein-Mischung etc.) verschieden ist, können erst Raumsonden klären, denn die tiefen Temperaturen sind Hindernis für sichere Fernerkundung (4.5b).

Derzeit weicht die bis ca. 2000 strikte Trennung **Planetoid - Komet - Meteorit** einer integrierten Sicht => daher auch die "Lehrbuch"-Kapitel [Herrmann p. 118-139]

4.5f Entstehung von Asteroiden und Kometen/Kuipergürtel

wohl gleichzeitig mit den Planeten – siehe **Kap. 4.1f**. Die Asteroiden des Hauptgürtels unterscheiden sich deutlich von den Kuiper-Belt-Objekten: Material heller, meist metallreicher, höhere Dichte und Albedo, anderes Spektrum (Kap. 4.5b vs 4.5e). Dennoch gibt die Typenvielfalt sowie die gegensätzliche Häufigkeit der entsprechenden Meteortypen noch Rätsel auf.

Kuiper-Gürtel kann der Außenrand der protoplanetaren Scheibe sein, andererseits bedeutet das Defizit an KBOs jenseits von 50 \AA andere Bildungsprozesse, dünnere Planetesimal-Population oder Abwandern von Teilchen. Nach Suchprogrammen, z.B. [SuW 4/1995] waren aus 20 entdeckten Transneptunen bis 25^m rund 35 000 >100 km für die Zone 30-50 \AA hochgerechnet worden. Lediglich die Obergrenze 300 km bestätigte sich – für größere Körper war die Protoscheibe wohl meist zu dünn.

Noch etwas ungeklärt ist die große Zahl an *Plutinos* und die Zeitstabilität der 3:2 Resonanzen zu Neptun, sowie manche Widersprüche in der Verteilung von Albedo und Rotfärbung. Auch einige Kometengliederungen wären zu überdenken [SuW 2001; Kometen-Special 1997].

Die **Oort'sche Wolke** als vermutlich primärer Ursprungsort langperiodischer Kometen könnte auch mit stark exzentrischen KBOs zusammenhängen – nicht alle *müssen* im Kuipergürtel entstanden sein, könnten auch lange in einer Art *interstellarem Schwebezustand* verharren. Die klassische Statistik der Kometenbahnen *vor* ihrem erstmaligen Erscheinen im inneren Sonnensystem [Wurm 1954] zeigt, dass sie

- dem System angehören**, aber interstellar bis zu ~100.000 \AA auf *Warteposition* liegen;
- eine Zahl von vielen Milliarden** ausmachen dürften, aber < 0.01 Erdmassen;

- c) den „Nahbereich“ etwa gleichmäßig in Zweierstufen der Bahnachsen $a > 20.000 \text{ \AA}$, $20-10.000 \text{ \AA}$, $10-5.000$, $5-2.500 \text{ \AA}$ usw. ausfüllen. Bessere Analysen stehen noch aus.

Geringe Störungen reichen bei solchen Schwebezuständen in der Vorgeschichte aller episodischer Kometen, wo noch nie Hyperbelbahnen nachweisbar waren, um ins eigentliche Sonnensystem zu gelangen. Manchmal tritt ja auch der umgekehrte Fall ein – eine Planetenbegegnung beschleunigt den Komet oder Asteroid auf extreme Ellipsen- oder fast hyperbolische Bahn [Murray 99; Wurm 1954] und zeigt so die prinzipielle Möglichkeit der Bahndurchmischung. Sie ist an den KBO-Bahnverteilungen [Wuchterl 2001, Hanslmeier 2014] tatsächlich ersichtlich.

Künftige Forschung wird einerseits mit a) Raumsonden an Kometen erfolgen (3 Projekte bis 2011), b) durch Hubble-HST und Infrarot-Teleskope wie ISO [ESA 2002], Spitzer und James Webb, c) gekoppelt mit Spektrometrie und Meteor-Labormessung, d) durch Suchprogramme für KBO im Bereich $> 60\text{AE}$ und auch einige Grad außerhalb der Ekliptikebene, und e) durch Messung in anderen Spektralbereichen (Röntgen, Radar begann 2002). So wird u.a. der Ursprung unseres Sonnensystems besser erfassbar; auch die stark zunehmenden Entdeckungen von „Exoplaneten“ werden dazu beitragen. Rückwirkungen zur Astrophysik und klare Grenzen von Gasplaneten, Braunen Zwergen und kleinstmöglichen Kernfusionssternen sind zu erwarten.

4.10 Literatur zu Planeten und Asteroiden

- Archiv GG, 1957-99: *Bild- und Zeitungsarchiv zu Weltraumfahrt und Astronomie*. G. Gerstbach, Wien.
- Beatty K. et al., 1990: *Die Sonne und ihre Planeten*. 2. Auflage, 250p., Physik-Verlag Weinheim.
- Couper H. et al., 2014: *Die Planeten. Eine Reise durch unser Sonnensystem*. Dorling / Kindersley, London.
- Egyed L., 1969: *Physik der festen Erde*. 368 p., Akadémiai Kiadó, Budapest.
- Emmerich / Melchert 2017: *Alles über Astronomie. Weltall, Sterne und Planeten*. Kosmos-Verlag Stuttgart
- ESA, Mueller T., L.Metcalf, 2002: *ISO and Asteroids*. ESA Bulletin 108, p.39-48, Paris, Darmstadt.
- Ferrari d'Occhieppo K., 1991: *Der Stern von Bethlehem - aus der Sicht der Astronomie*. 152 p., Franckh-Kosmos, Stuttgart.
- Fischer-Lex., 1957: *Astronomie. Das Fischer-Lexikon* Bd.4, Hsg. K. Stumpff, 345 p., Fischer Frankfurt-Hamburg.
- Foerster W., 1901: *Die Erforschung des Weltalls*. Weltall & Menschheit Band 3, p.1-288, Dt.Verl.Berlin-Wien.
- Gerstbach G., 2000: *Auge und Sehen - und der lange Weg zu digitalem Erkennen*. Sternbote 43/8, p.142-157, Wien.
- Gerstbach G., 2003: *Mars Channel Observations 1877-90, Compared with modern Orbiter Data*. Proceedings XIII Nat. Astr. Conference Oct. 2002, Publ. Astr. Obs. Belgrade 75, p.347-355
- Golombek M., 1998: *Die Pathfinder-Mission zum Mars*. Spektrum d. Wiss. Sep. 98, p.62-73, Heidelberg.
- Gonzalez G., D. Brownlee, P. Ward, 2001: *Lebensfeindliches All*. Spektrum d. Wiss. Dez. 01, p.38-46, Heidelberg.
- Hanslmeier A., 2014: *Einführung in Astronomie und Astrophysik*, 3. Auflage, 624p., Springer Spektrum Verlag.
- Heide F., 1957: *Kleine Meteoritenkunde*. 142 p., Verständl. Wissenschaft Bd.23, Springer Berlin-Heidelberg.
- Herrmann J., 1963: *Leben auf anderen Sternen?* 190 p., Bildung und Wissen Bd. 12, Bertelsmann Gütersloh.
- Herrmann J., 2010: *dtv-Atlas zur Astronomie*. 15. Auflage, 288 p., dtv Taschenbuch-Verlag, München.
- Jeans Sir J., 1934: *Die Wunderwelt der Sterne*. 220 p. + XLVI, Deutsche Verlagsanstalt Stuttgart - Berlin.
- Karttunen H. et al, 2017: *Fundamental Astronomy*. 550 p., 6.Aufl., Springer Berlin, Tokio, New York.
- Kippenhahn R., 1990: *Der Stern, von dem wir leben*. 320 p., Dt. Verlagsanstalt, Stuttgart.
- Lang K.R., 1997: *Sun, Earth and Sky*. 2.Auflage, 282+16 p., Springer A&ALibrary, Wien, Amsterdam, NewYork.
- Léna P. et al., 1998: *Observational Astrophysics*. 2.Auflage, 512 p., Springer Berlin - Heidelberg - NewYork - Tokyo...
- Marow M.J., 1987: *Die Planeten des Sonnensystems*. 376 p., Verlag MIR / Teubner, Moskau / Leipzig.
- Moore P., G. Hunt, 1990: *Atlas des Sonnensystems*. 462 p., Herder Freiburg - Basel - Wien.
- Mucke H., ~1995: *Astronomie*. Fernkurs der Wiener Volkshochschulen, Heft 4 (von 6), RemaPrint, Wien.
- Murray C., S.Dermott, ~2015: *Solar System Dynamics*. Cambridge Univ. Press, U.K.
- Raeburn P., 2000: *Mars. Die Geheimnisse des roten Planeten*. 232 p. großqu., NASA & Steiger Augsburg.
- Rosenberg A., 1984: *Zeichen am Himmel. Das Weltbild der Astrologie*. 2.Aufl., 227 p., Kösel München.
- Roth G., 1960: *Die Planetoiden*. 74 p., Orion-Bücher Band 137, Oldenbourg München.
- Roth G. (Hsg.), 2001: *Planeten beobachten*. 2. Aufl., 350 p., Astro-Praxis, Verlag Sterne u.Weltr., Heidelberg.
- Schäfers K., S. Hoerner 1960: *Meyers Handbuch über das Weltall*. 370 p., Bibliogr. Inst., Mannheim.
- Sterne & Weltraum 2001-2018: *Marsmissionen Pathfinder, Global Surveyor, Mars Express, Odyssey, Rover Spirit & Opportunity, Insight*. Spektrum-Verlag, Heidelberg.
- Sterne & Weltraum ~1997: *Kometen-Special* (anlässlich Komet Levy / Jupiter, ca. 250 p.), Heidelberg.
- Weiner J., 1989: *Planet Erde - Schicksal und Zukunft*. 382 p., Knaur, München.
- Wuchterl G., 2001: *Was ist ein Planet?* Sterne und Weltraum Heft 2, p. 130-140, Heidelberg.
- Wurm K., 1954: *Die Kometen*. Verständliche Wissenschaft Band 32, 160 p., Springer Berlin, Gött., Heidelberg.
- www.Sonnensystem, KBO: *Cambridge/PrettyPict., Harvard.edu...TNOs, IAU.org, ESA, Ucar, Sky&Telescope*