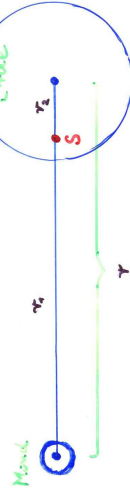


II. Der Mond

II.1 2-01

Bahn

Bewegung Erde - Mond um gemeinsamen Schwerpunkt:



Mittlere Entfernung = große Halbachse a

$$384\,400\text{ km} \approx 60 R_{\oplus}$$

aus Parallaxe von verschiedenen Orten auf der Erde;
heute sehr genau aus Laser-Laufzeitmessungen
($a \hat{=} 1,3$ Lichtsekunden)

2-02

Massen: $M_{\oplus} = 7,35 \cdot 10^{25}\text{ g} = \frac{1}{81} M_{\odot}$
genau aus künstlichen Mond-Satelliten

Schwerpunkt: $r_s = \frac{M_{\oplus}}{M_{\oplus} + M_{\odot}} a \approx \frac{1}{82} a \approx \frac{60}{82} R_{\oplus} = \frac{3}{4} R_{\oplus}$
d.h. S liegt noch innerhalb der Erde

Anmerkung: Dieser Schwerpunkt beschreibt die auf Seite 1-48f definierte Bahn um die Sonne
→ Erdmittelpunkt periodisch voraus(hochehend)
Maximale Effekt auf Richtung Erde - Sonne:

$$\frac{3/4 R_{\oplus}}{1 \text{ A.U.}} \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \approx 6''$$

2-03

II.2

- Erde + Mond als Zwei-Körper - Problem:
nur grobe Näherung, da für den Mond

Anziehungskraft der Sonne > Anziehungskraft der Erde

$$GM_{\odot} \frac{M_{\oplus}}{(1 \text{ A.U.})^2} > GM_{\oplus} \frac{M_{\oplus}}{a_{\text{Erde-Mond}}^2}$$

$$8,9 \cdot 10^6 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2} > 4 \cdot 10^6 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2} !$$

→ Mondbahn ist stets konkav zur Sonne gekrümmt!

2-04

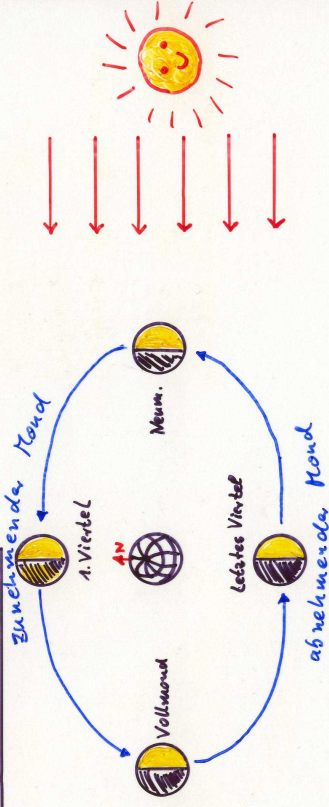
- Exzentrizität $e = 0,0549 \rightarrow$ "große Ungleichheit"
- Bahnneigung gegen Ekliptik: $\approx 5^\circ$
- Umlaufzeit (siderischer Monat): 27,32 Tage

• Präzession der Mondbahn - Ebene

Rückläufig, Periode 18,6 Jahre

- Jede Menge komplizierte Bahnstörungen:
Erektion, Variation, jährliche Ungleichheit, säkulare Akzeleration, Drehung der Apsidenlinie (1 Umlauf in 8,85 Jahren), ...

Mondphasen

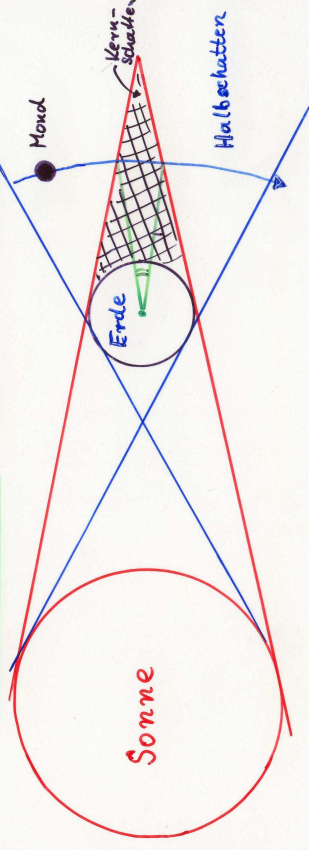


- zunehmender Mond am Abendhimmel
- Vollmond kulminiert um Mitternacht (Ortsteil)
- abnehmender Mond am Morgenhimmel

Schattengrenze = "Terminator"

Finsternisse

Mondfinsternis [engl. Lunar eclipse]



→ Durchgang des Mondes durch den Schatten der Erde

- Halbschatten: ziemlich hell, Verfinsternung unmerklich
- Kernschatten: auch nicht ganz dunkel wegen Refraktion und Streuung in der Erdatmosphäre

Periode der Mondphasen:

"Synodischer Monat"

→ mitrotierendes Bezugssystem:

Winkelgeschwindigkeit der Sonne abziehen!

$$\frac{1}{\text{synodischer Monat}} = \frac{1}{\text{siderischer Monat}} - \frac{1}{1 \text{ Jahr}}$$

$$\text{synodischer Monat} = 29.53 \text{ Tage}$$

Durchmesser des Kernschattens in Mondentfernung:

$$82''.4 \quad (\text{alles für mittlere Entfernungen } \odot, \text{c})$$

Durchmesser der Mondscheibe: $31'$

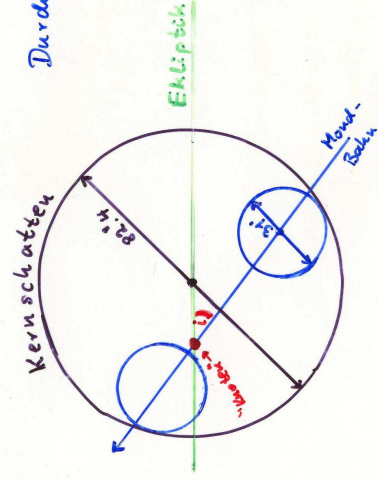
Bahnbewegung des Mondes:

$$360^\circ \text{ in } 29^d \Rightarrow \approx 30' \text{ pro Stunde}$$

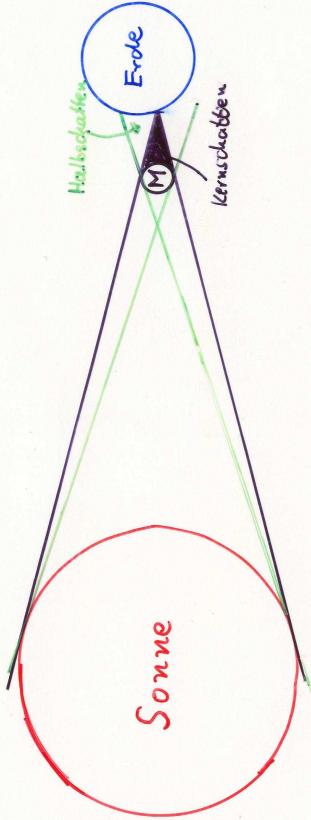
⇒ Maximale Dauer der totalen

Finsternis:

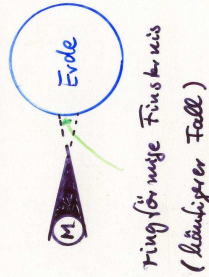
$$\frac{82''.4 - 31'}{30''/h} \approx 1.4$$



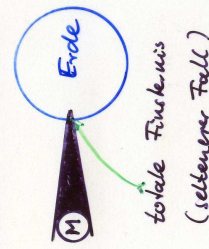
Sonnenfinsternis



je nach momentaner Entfernung des Mondes und der Sonne:



Ringförmige Finsternis
(häufiger Fall)



totale Finsternis
(seltener Fall)

Saros - Zyklus

2 Bedingungen für eine Finsternis:

- Neumond (Sonnenfinsternis) bzw. Vollmond (Mondfinsternis)
- Periode: synodischer Monat = 29.53059 Tage ($\rightarrow$ II.3)
- Mond $\approx$ in (einem der beiden) Bahn - "Knoten" mit der Ekliptik

Periode: drakonischer Monat [engl. nodal month]

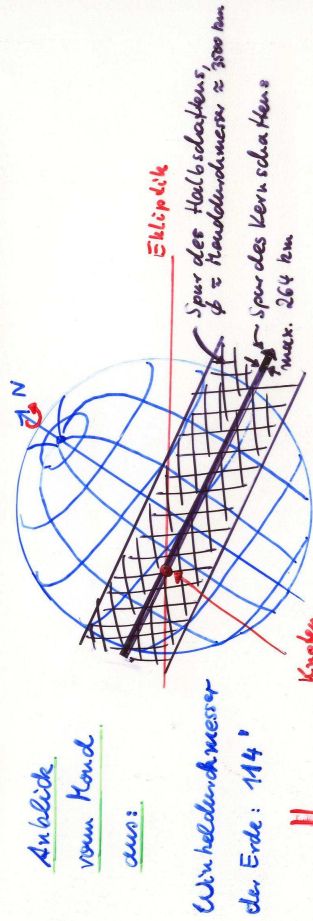
Knoten rückwärtig, 1 Umlauf = 18.6 Jahre

$$\Rightarrow \frac{1}{\text{drakonischer Monat}} = \frac{1}{\text{synodischer Monat}} + \frac{1}{18.6}$$

$\rightarrow$ 1 drakonischer Monat = 27.21222 Tage

Durchgang der Erde durch den Schatten des Mondes

Analyse
vom Mond
aus:



Winkelhalbmesser
der Erde: 14.4°

vergl. ϕ Kernschatten der Erde in Mondentfernung: 82°

$\Rightarrow$ Sonnenfinsternisse häufiger als Mondfinsternisse
- jedoch jeweils nur von Teilen der Erdoberfläche sichtbar!

beide Perioden (natürlich) inkommensurabel, aber

zufällig gibt es gute Näherung:

242 drakonische Monate = 6585.357

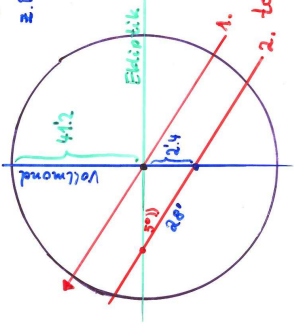
223 synodische Monate = 6585.322

Diff.: 0.035 = 0.84 Stunden

d.h. nach einem Saros-Zyklus von 18^a 11^d

wiederholt sich (fast) genau dieselbe Finsternis

Kleine Verschiebung von Zyklus zu Zyklus:



z.B.: 1. Zentrale Finsternis: Vollmond existiert in Knoten

2. 1 Saros-Zyklus später: Knoten-Durchgang um 0.035 = 0.84^h später als der Vollmond

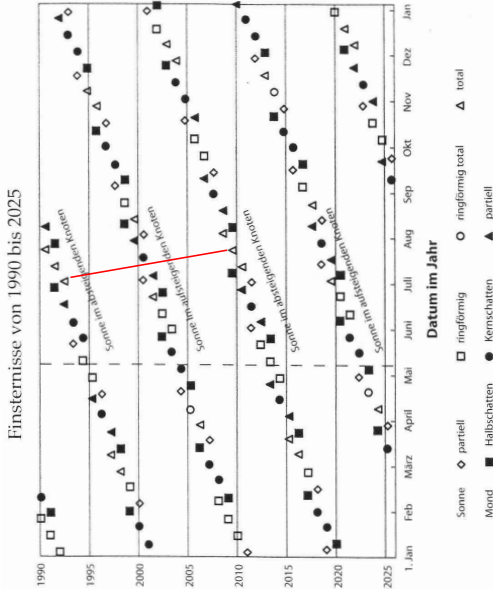
synodische Mondrevolution: 30^h pro Stunde
 $\Rightarrow$ Abstand Vollmond - Knoten = 28^h

Komponente $\perp$ Ekliptik: $\sin 5^\circ \cdot 28' = 2.4$

2. tot. Finsternis bleibt $\approx 34 \cdot 18^\circ \approx 600^\circ$ im Zyklus!

Saros-Zyklus

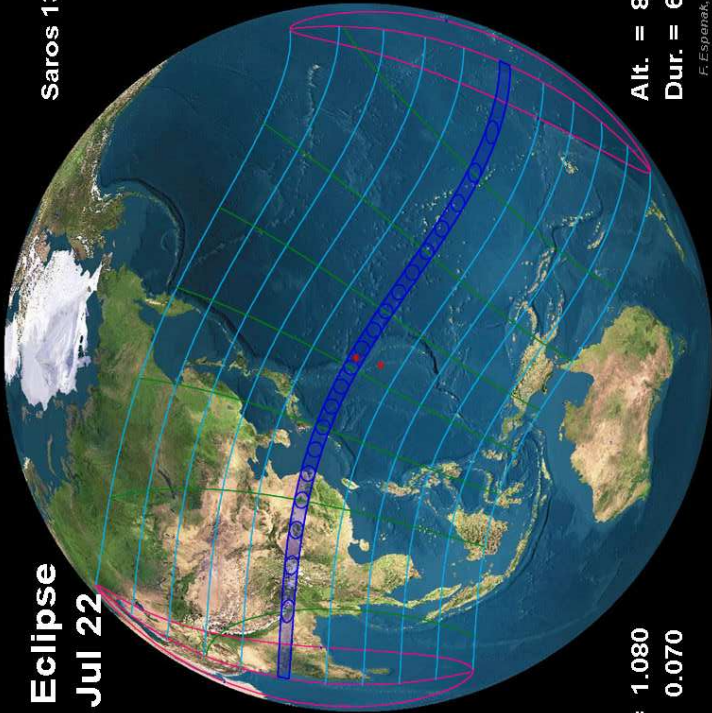
Methode zur Vorhersage von Finsternissen, schon in der Antike bekannt (China, Babylon, Griechenland) - in der *Antikythera-Maschine* enthalten (Freeth et al. 2006: *Nature* 444, 587)



Total Eclipse 2009 Jul 22

Saros 136

2-14



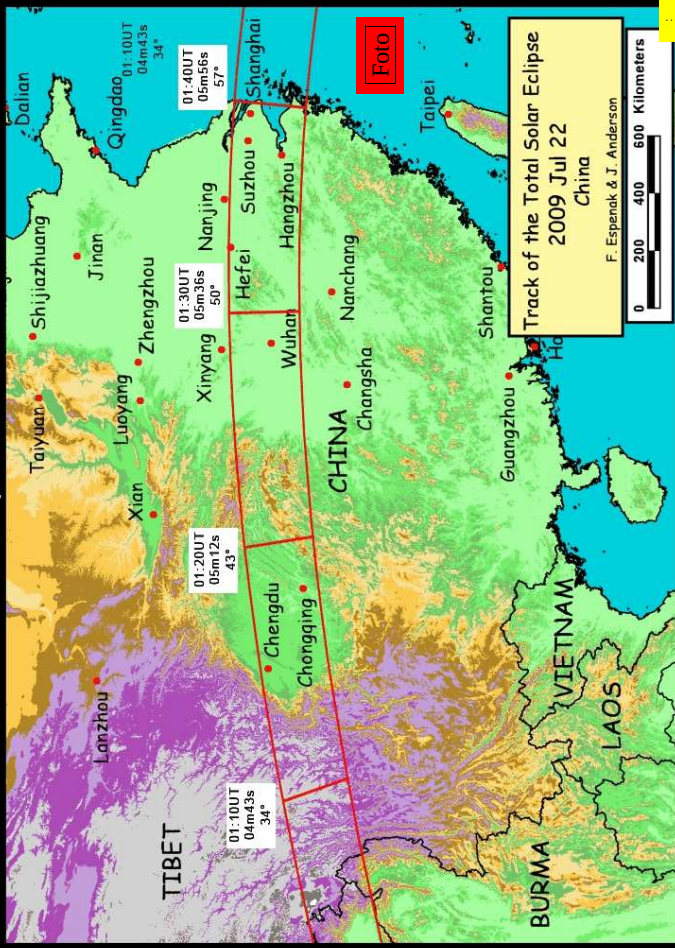
Mag. = 1.080
Gam. = 0.070

Alt. = 86°
Dur. = 6m 39s

F. Espenak NASA's GS

Total Solar Eclipse of 2009 Jul 22

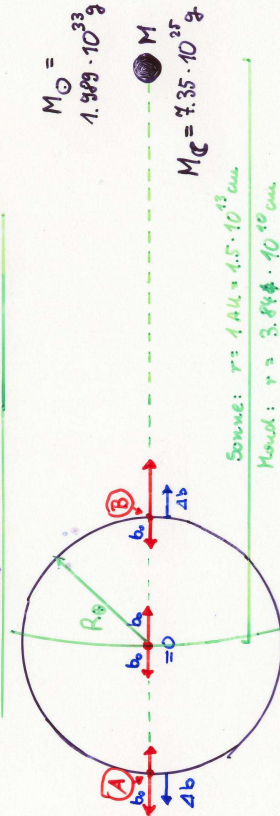
2-15



Gezeiten (Ebbe und Flut)

II.8 2-16

Einwirkung der Sonne/des Mondes



Im Erdmittelpunkt = Schwerpunkt:

Beschleunigung = Anziehung durch Sonne bzw. Mond

$$|\ddot{r}| = \frac{GM}{r^2} =: b_0$$

2-17

Im Punkt (A):

- $r \rightarrow r + R_{\oplus} \Rightarrow$ Anziehungskraft kleiner
- $|\ddot{r}| = b_0$ Umfall gleich (parallele Bewegung, Rotation "abgeschaltet")

$\Rightarrow$ Differenz:

$$\Delta b = b_0 - \frac{GM}{(r + R_{\oplus})^2} = b_0 - \frac{GM}{r^2} \left(1 + \frac{R_{\oplus}}{r}\right)^{-2}$$

Taylor $\approx 1 - 2 \frac{R_{\oplus}}{r}$ für $\frac{R_{\oplus}}{r} \ll 1$

... analog für (B)
mit umgekehrtem Vorzeichen...

$$\Delta b = 2G R_{\oplus} \frac{M}{r^3}$$

2-19

- Erzwungene Frequenz > Eigenfrequenz $\Rightarrow \approx 180^\circ$ Phasendifferenz!
Ebbe wenn Mond bulminiert
- Kontinente: Schwingung in Meeresbecken, Interferenzen ...
- Einfluss der Sonne:
bei Neumond, Vollmond: verstärkt $\rightarrow$ Springflut
bei Viertelmond: ausgeglichen $\rightarrow$ Nippflut
- analoge Deformation des festen Erdkörpers:
Amplitude (bei Springflut) ± 30 cm
- Geseitenreibung (vgl. I.9)
Reibungsverluste $\rightarrow$ Abbremsung der Erdrotation
Verlängerung des Tages derzeit $\approx 16 \cdot 10^{-6}$ sec / Jahr
- Vorsicht bei Extrapolationen: stark abhängig von der Verteilung der Landmassen!

2-18

II.9

Vergleich der Geseitenwirkung von Mond und Sonne:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta b_{\text{Mond}}}{\Delta b_{\text{Sonne}}} &= 2G R_{\oplus} \frac{M_{\oplus}}{r_{\oplus-\oplus}^3} \bigg/ 2G R_{\oplus} \frac{M_{\odot}}{(1\text{AU})^3} \\ &= \frac{4.35 \cdot 10^{25} \text{ g}}{1.989 \cdot 10^{33} \text{ g}} \cdot \left[\frac{1.5 \cdot 10^{13} \text{ cm}}{3.84 \cdot 10^{10} \text{ cm}} \right]^3 \\ &= 3.70 \cdot 10^{-8} \cdot 5.96 \cdot 10^7 = \underline{\underline{2.2}} \end{aligned}$$

• Effekt zusammen mit Erdrotation

- (Überwiegende) Einfluss des Mondes:
2 Flutberge, Umlauf um die Erde in 1 "Monat"
 $\rightarrow$ alle $12^h 25^m$ Flut

2-20

• Drehimpulserhaltung:

$\rightarrow$ Anhebung der Mondbahn, Umlaufzeit länger

Gleichgewichtszustand: "gebundene Rotation"

$$1 \text{ Tag} = 1 \text{ synodischer Monat} \approx 50 \text{ "tägige Tage"}$$

- bei gegenwärtiger Abbausungsrate erst in $3 \cdot 10^{11}$ Jahren $\rightarrow$ un erreichbar

• Rotation des Mondes

Periode = 1 siderischer Monat!

$\rightarrow$ Gebundene Rotation als Resultat von

- Geseitenreibung im noch weitgehend flüssigen Ur-Mond
 $\rightarrow$ jetzt stabilisiert durch asymmetrische Massenverteilung
- wir sehen immer nur die "Vordereite"!

2-21

Libration

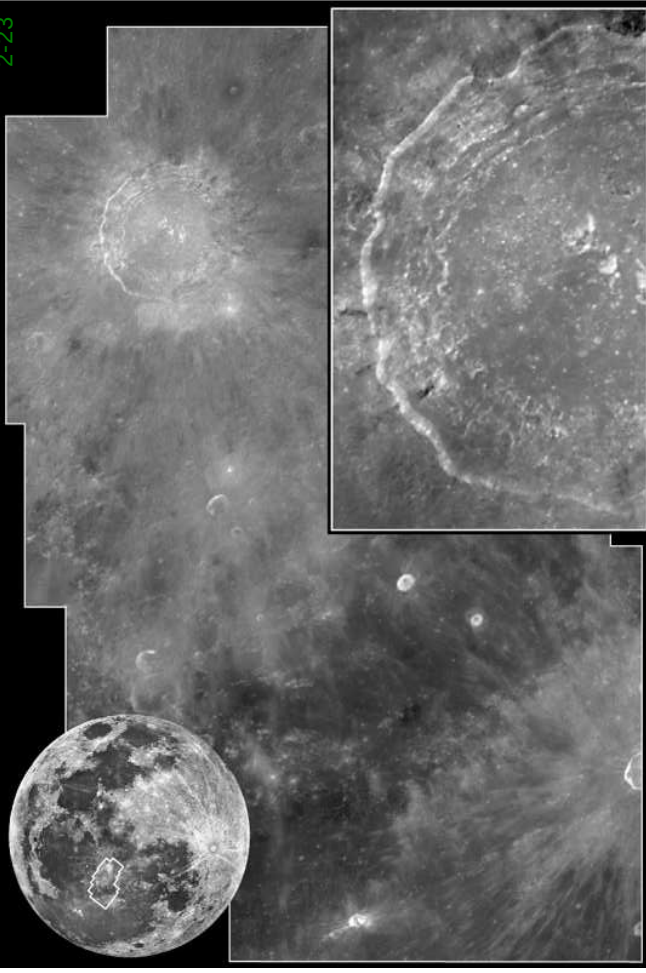
Das „Mondgesicht“ schwankt etwas:

- *Libration in Länge* wegen Exzentrizität der Mondbahn: *wahre Anomalie* $\neq$ *mittlere Anomalie*
- *Libration in Breite* wegen Neigung der Rotationsachse des Mondes gegen seine Bahnachse ($7^\circ 40'$)
- dazu kommt die *parallaktische Libration* in Abhängigkeit von der Position des Beobachters auf der Erde (max. $\sim 1^\circ$)
- dadurch 60% der Mondoberfläche von der Erde sichtbar
- gut erkennbar an Lage des *Mare Crisium*



3

2-23



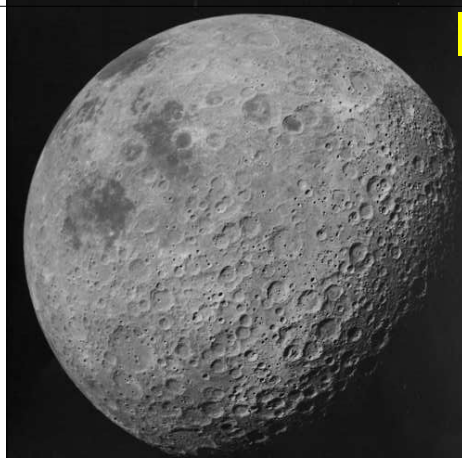
Krater (hier: Copernicus, Aufn. HST); Entstehung durch Einschlag

3

2-22

Die Oberfläche des Mondes

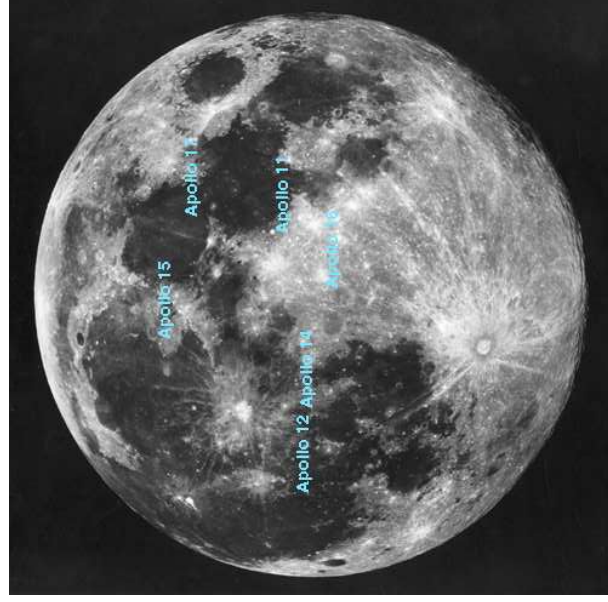
- 80% *Terrae* = Hochländer, von Kratern bedeckt
- 20% *Maria* (lat., singular Mare) = dunkle Gebiete mit wenig Kratern
- Maria gibt es fast nur auf der Vorderseite



3

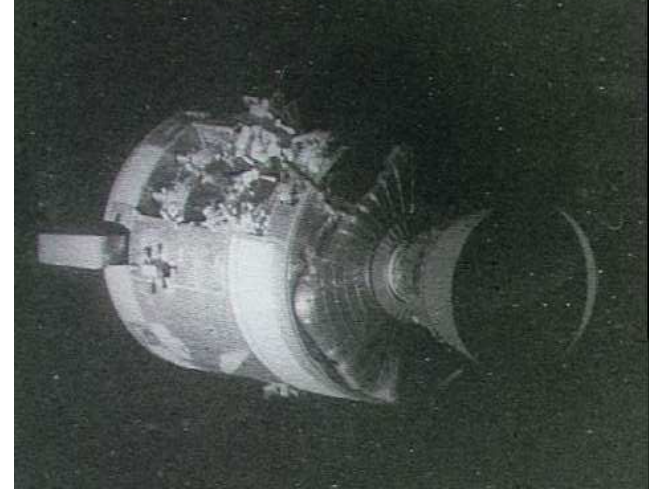
2-24

Mondlandungen: Apollo-Programm 1969 - 1972



Apollo 11	20.07.1969
Apollo 12	18.11.1969
Apollo 13	-
Apollo 14	05.02.1971
Apollo 15	26.07.1971
Apollo 16	16.04.1972
Apollo 17	07.12.1972

3



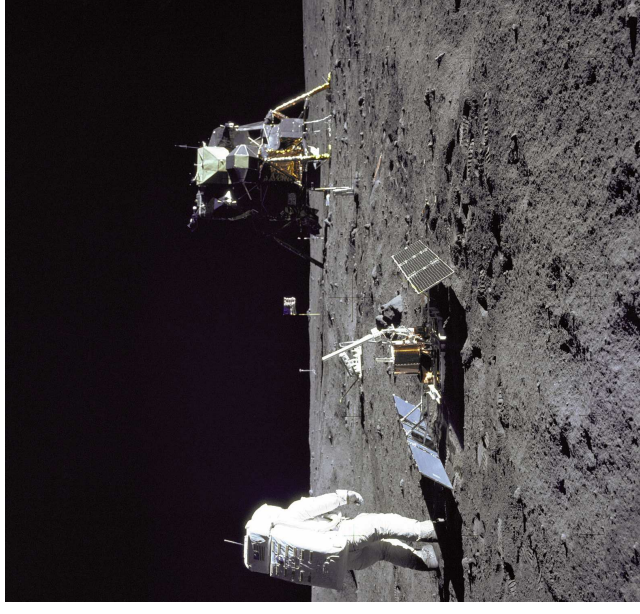
2-25

Apollo 13

- Start 11.04.1970 13:13 Uhr
- Explosion 13.04.1970
- *Houston, we've had a problem*
- dramatische Rückkehr nach Mondumrundung
- Spielfilm von 1995 (2 Oscars)

View of damaged Apollo 13 Service Module from the Lunar/Command Modules

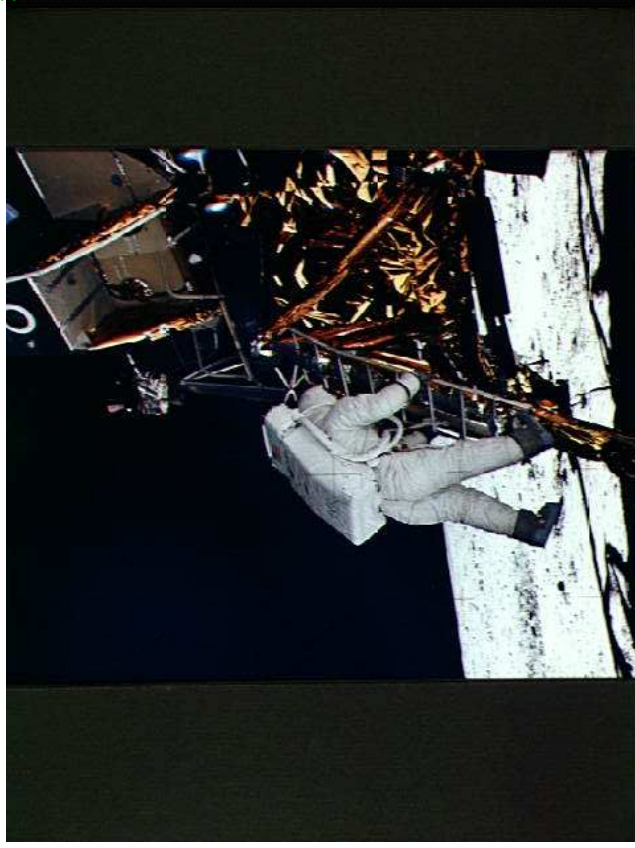
13



2-27

Aldrin looks back at Tranquility Base

27



2-26

Astronaut Edwin Aldrin descends steps of Lunar Module ladder to walk on moon

26



2-28

Astronaut James Irwin works at Lunar Roving Vehicle during Apollo 15 EVA

28



Astronaut Edwin Aldrin poses for photograph beside deployed U.S. flag

Verschörungstheorien

Warum flattert die Flagge?

Antwort:

- elastischer Stab
- luftleerer Raum

Warum sieht man keine Sterne?

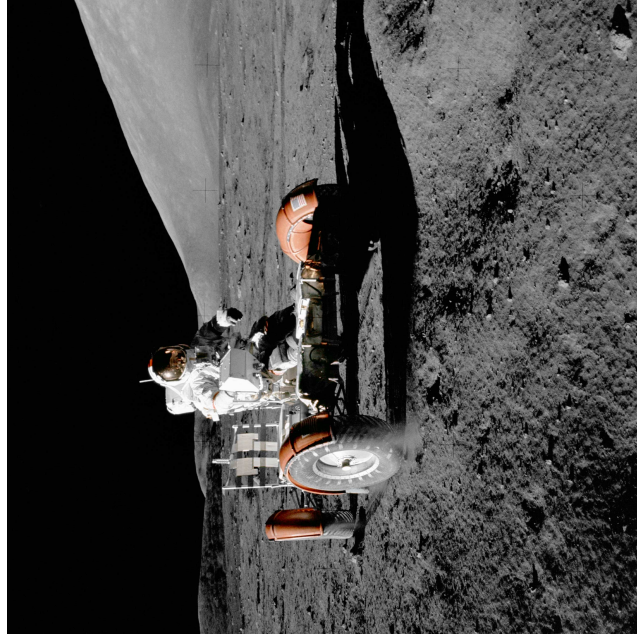
Antwort:

- begrenzte Dynamik der Kamera

Foto der Landefähre von Apollo 11



aufgenommen vom Lunar Reconnaissance Orbiter, 2012



Astronaut Eugene Cernan drives the Lunar Roving Vehicle during first EVA

Steinchen fliegen
exakte Parabeln
ohne Luftreibung

- Krater
 - Ringwälle, alle Größen
 - oft: Zentralberg
 - wenn $\phi \approx 200 \text{ km}$: "Bassins",
in der Regel mit Lava gefüllt
- Entstehung: Meteoriten - Einschlag ("Impact")
 - starke Abnahme der Einschlags-Häufigkeit vor $\approx 4 \cdot 10^9$ Jahren
- selten: kleine Vulkan-Krater
- Benennung nach Persönlichkeiten:
Copernicus, Ptolemaeus, ...

3) *Einfang*

- himelsmechanisch unwahrscheinlich
- wenn aus derselben Gegend des Sonnensystems:
warum nicht Fe-Ni wie die Erde?

4) "Giant Impact" *← heute bevorzugt!*

- streifende Kollision der Ur-Erde
mit 2. Ur-Planeten von $\approx 15\%$ Erdmasse "Theia"
- Erdmantel-Material, vermischt mit Teilen des 2. Körpers
→ Erdbild → Mond
- Erde erhält dadurch ihre schnelle Rotation

Entstehung des Mondes

Fakten

- mittl Dichte 3.3 g/cm^3 (Erde: $5. \text{ g/cm}^3$ wg. Eisenkern)
- sehr ähnliche Isotopenverhältnisse (Apollo-Proben)
- Alter $4.527 \cdot 10^9$ Jahre, d.h. etwa Erdalter

Kollisionstheorie (favorisiert seit 1984)

- Asteroid von 0.1 Erdmassen ($\sim$ Mars), Theia
- streifender Einschlag (45°)
- kleine Relativgeschwindigkeit (4 km/s)
- Teil der Trümmer gerät in Erdumlauf
- Mond bildet sich daraus in 100 - 10 000 Jahren
- 50% Erdmantel-Material, 50% Asteroid
- zunächst nahe Umlaufbahn (60 000 km)
- Gezeiten-Wechselwirkung hebt Umlaufbahn
- schnelle Rotation der Erde → Abbremsung

