

# Antworten auf spezielle Fragen

- Interplanetare Raumflüge
  - Grundlagen
  - Transfertechniken
  - Swingby
- Die Stabilität des Planetensystems
- Spezielle Effekte der allgemeinen Relativitätstheorie
  - Gravitationslinsen
  - Wurmlöcher

# Interplanetare Missionen

Ausgangspunkt: Erdorbits

Stabile Bahn:

Zentrifugalkraft = Schwerkraft

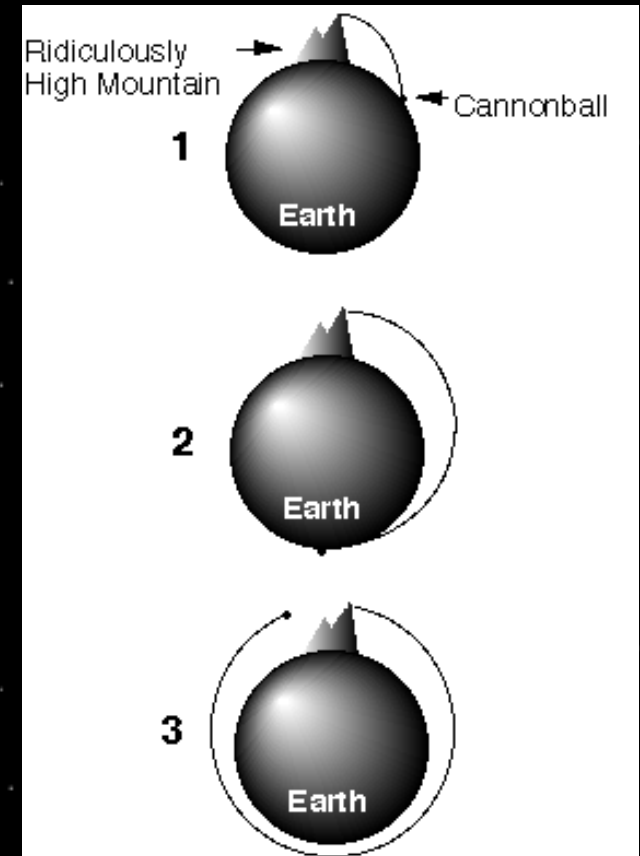
Lösung für Low-Earth-Orbits

( $R \sim R_{\oplus}$ ):  $v=7.2\text{km/s}$

- Mindestgeschwindigkeit um in den Weltraum zu kommen

Fluchtgeschwindigkeit:  $v=11.2\text{km/s}$

- für vollständiges Verlassen der Erdgravitationsfeldes



# Start in den Orbit

Ziolkowski-Gleichung

$$v_{\text{Ende}} = v_{\text{Strahl}} \times \ln \left( \frac{m_{\text{Start}}}{m_{\text{Nutz}}} \right)$$

Für übliche Strahltriebwerke muß mindestens 14 mal mehr Masse als Nutzlast gestartet werden



# Erdorbits

Kepler-Bahnen:

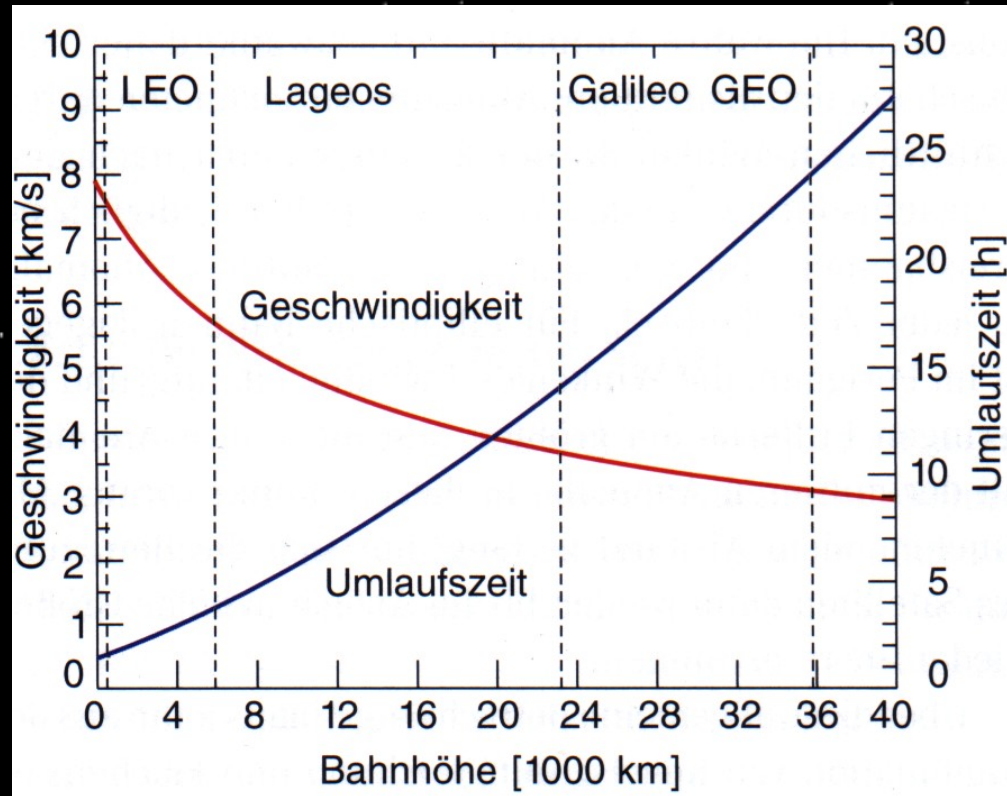
$$a^3 = T^2 \times GM_{\oplus} / 4\pi^2$$

Besonderer Orbit:

Kreisbahn mit  $R=42164\text{km}$   
( $H=35786\text{km}$ )  $\Rightarrow T=1\text{d}$

**Geostationärer Orbit:**

- Bewegung genauso schnell wie Erdrotation
- Fester Punkt über dem Äquator

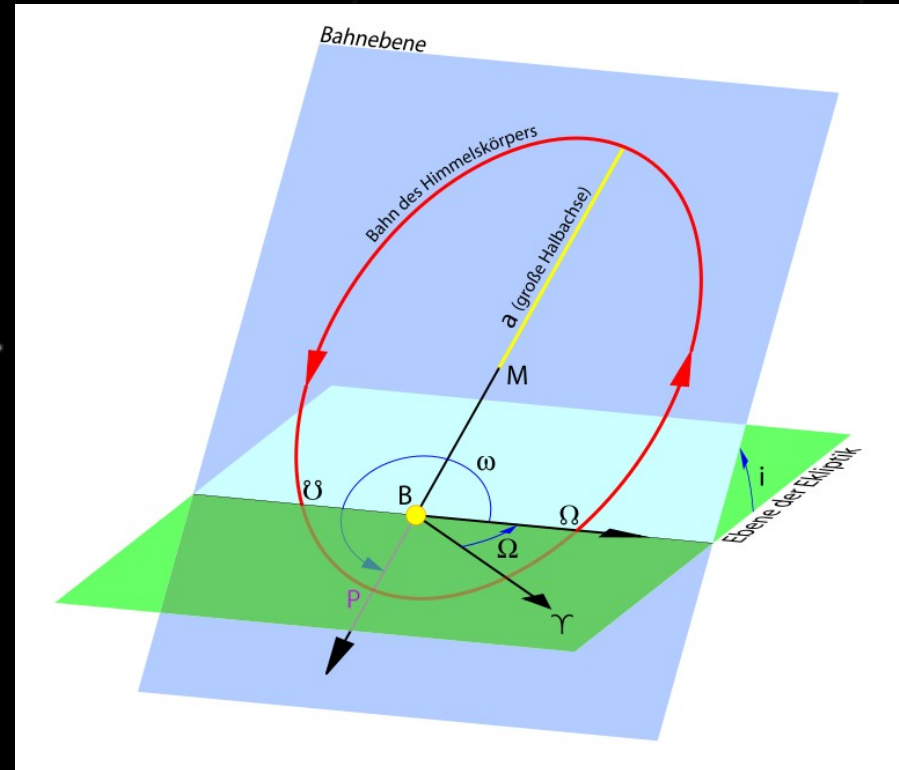


# Erdorbits

Kepler-Bahnen: **Ellipsen**

$$v = \sqrt{GM \left( 2/r - 1/a \right)}$$

- Niedrige Geschwindigkeit im Apogäum
- Hohe Geschwindigkeit im Perigäum



Bsp: 600x36000km Orbit:  $v_A=1.6\text{km/s}$ ,  $v_P=10.1\text{km/s}$

Vgl: Kreisbahn 600km:  $v=7.7\text{km/s}$ , 36000km:  $3.1\text{km/s}$

# Bahnänderung

## Prinzipien:

- Energieerhaltung
- Kurze Beschleunigung
- Neuer Orbit muss durch Ort der Bahnänderung gehen

=> Es ist immer am effektivsten tangential zu beschleunigen

## Hohmann-Transfer

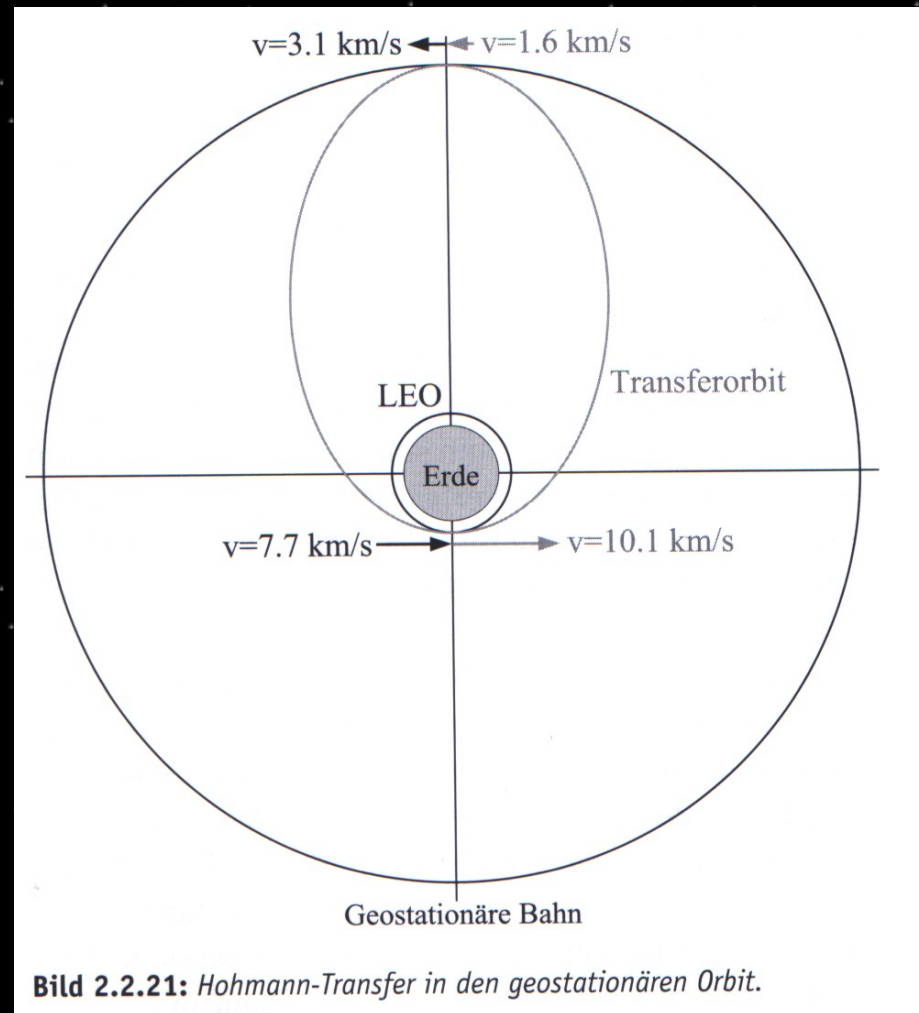
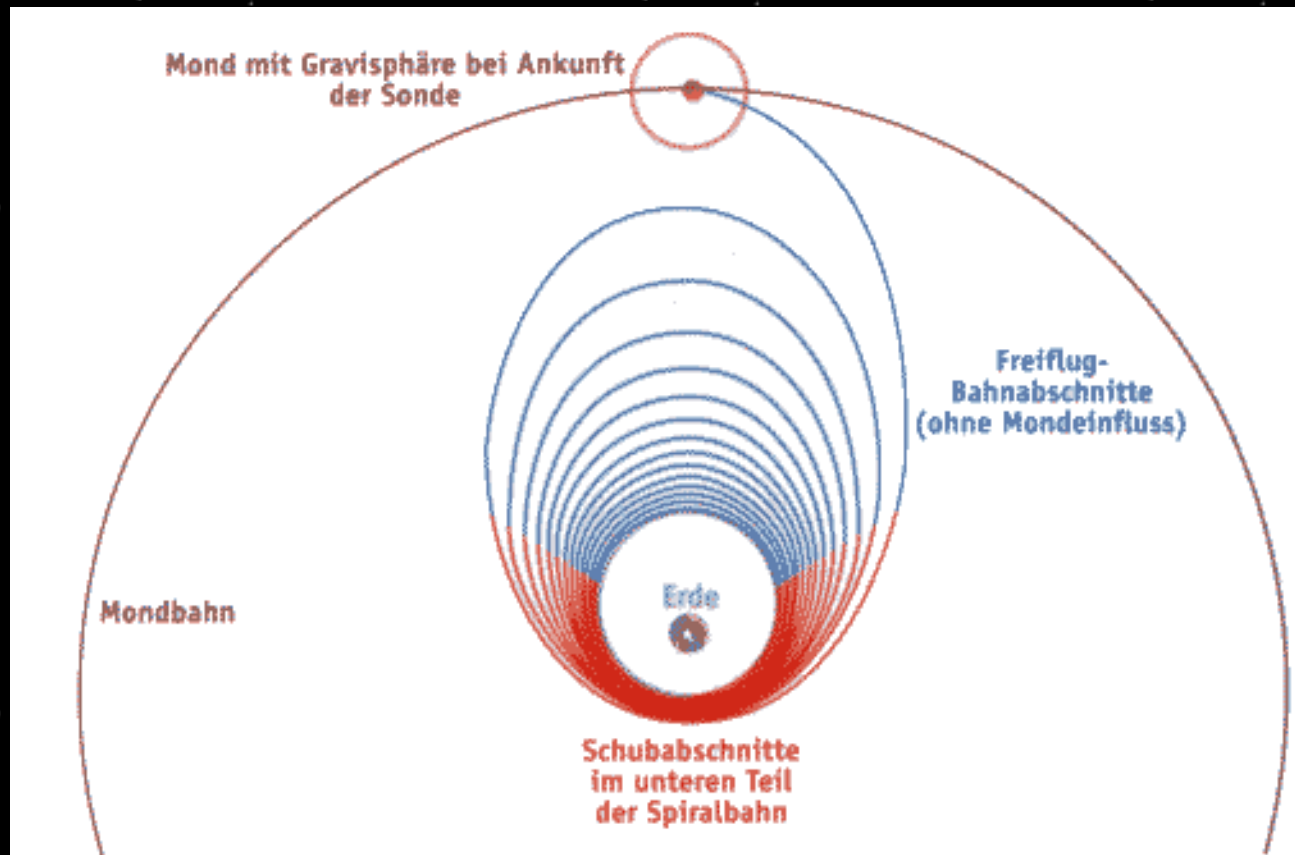


Bild 2.2.21: Hohmann-Transfer in den geostationären Orbit.

# Bahnänderung

Anwendung:

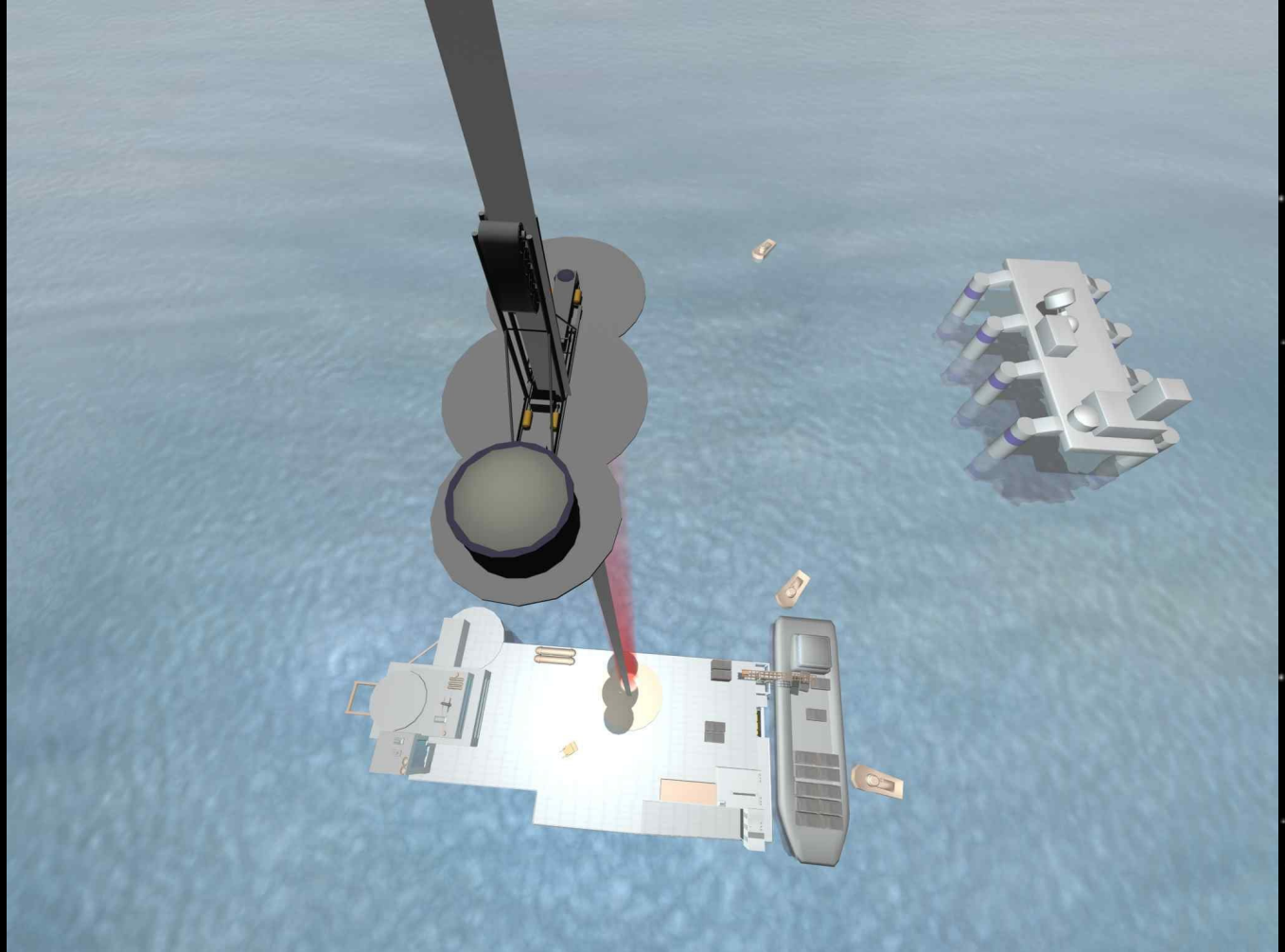
- Bahn der SMART-Satelliten zum Mond



- Nachteil: lange Reisezeit

# Der Weltraumfahrstuhl

"Seil" zwischen Erdoberfläche und geostationärem Punkt

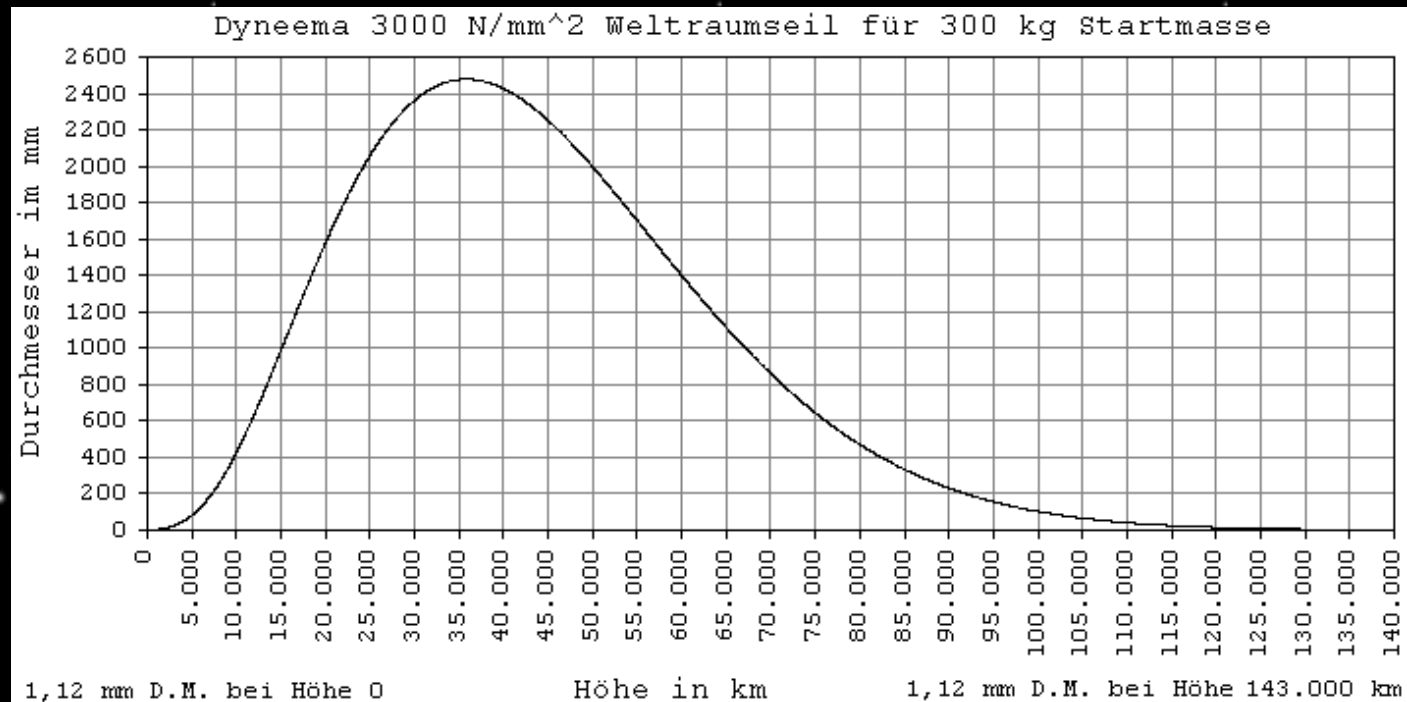




# Der Weltraumfahrtstuhl

Beschreibung oft extrem idealisiert:

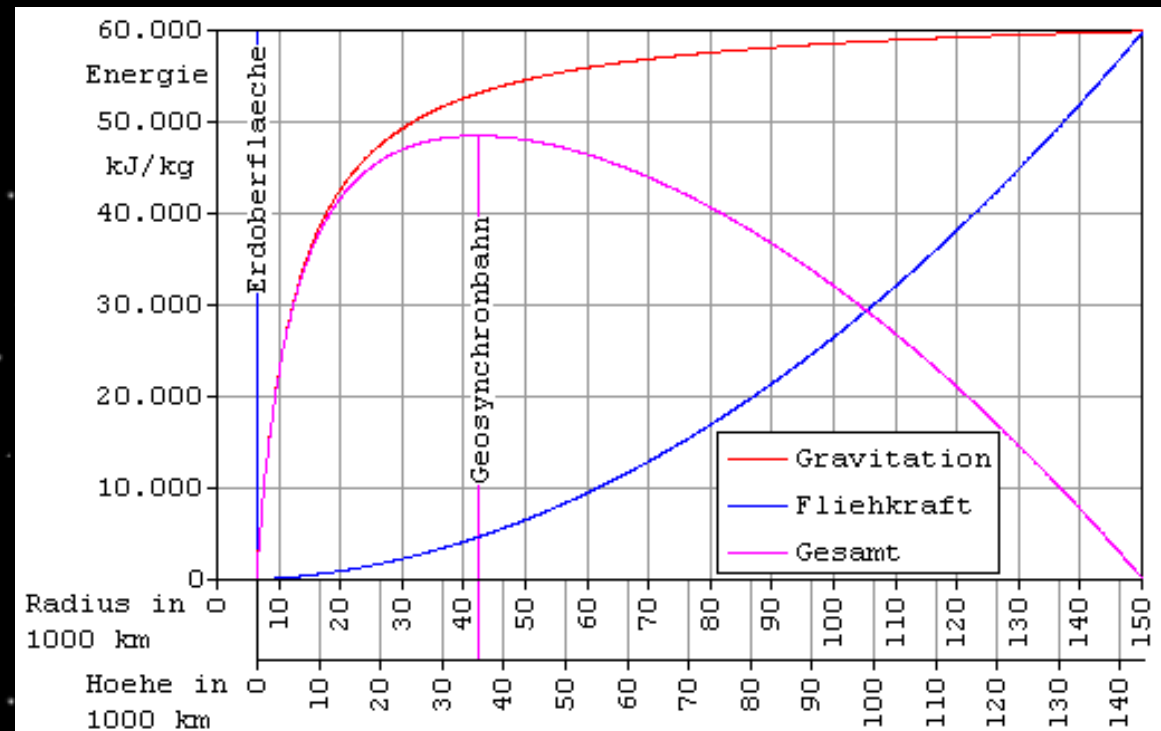
- Seil ist nicht gerade
- Seildicke muss variieren
- sehr langes überhängendes Ende



# Der Weltraumfahrtstuhl

## Probleme:

- Material extremer Festigkeit
- Permanente Zerstörung durch Weltraumschrott
- Gegengewicht bzw. Gesamtgewicht im Orbit
- Energiegewinn nur bei Anstieg bis 140000km



# Interplanetare Missionen

## Prinzip:

- Wie Erdorbits, aber mit Sonnen-, statt Erdmasse zur Bestimmung der Kepler-Parameter
- Hohmann-Transfer immer noch effizienteste Methode
- Extreme Geschwindigkeitsdifferenzen benötigt
- Der Weg nach "Innen" ist schwieriger.

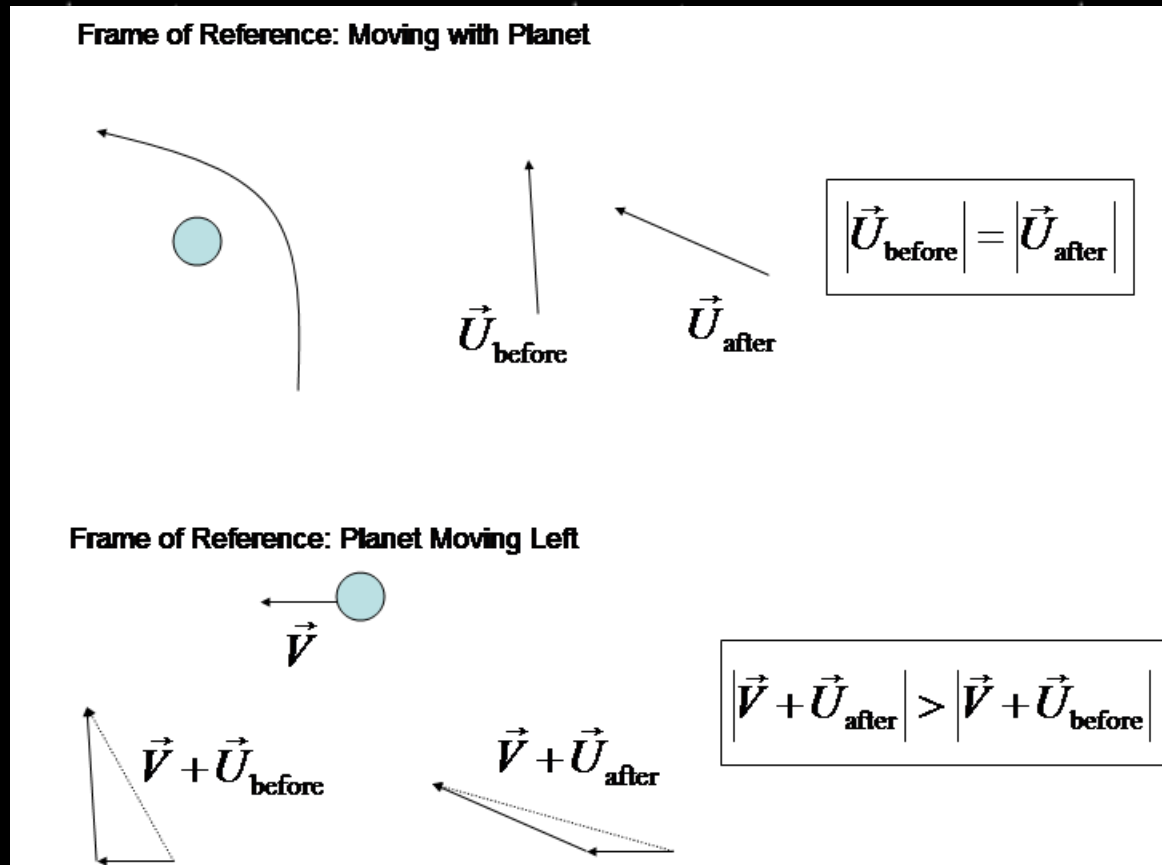


	Start [km/s]	Ankunft [km/s]	Flugzeit [a]
Merkur	-7,5	9,6	0,3
Venus	-2,5	2,7	0,4
Mars	2,9	-2,7	0,7
Jupiter	8,8	-5,4	2,7
Saturn	9,6	-5,4	6,0

# Lösung: Swingby

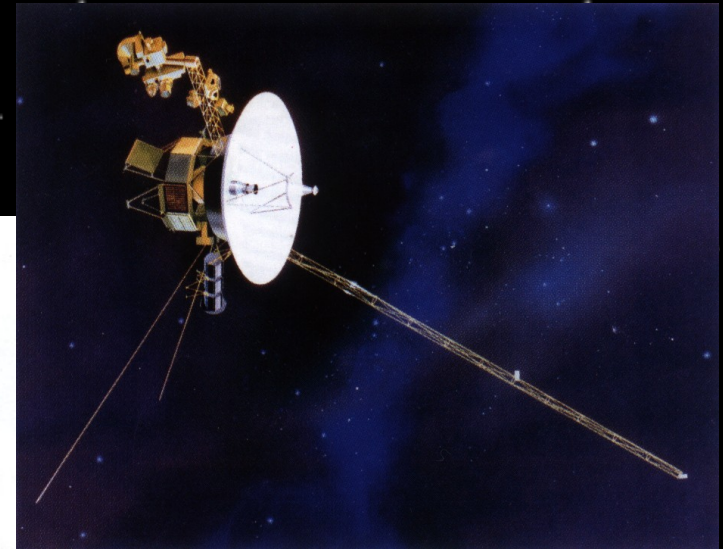
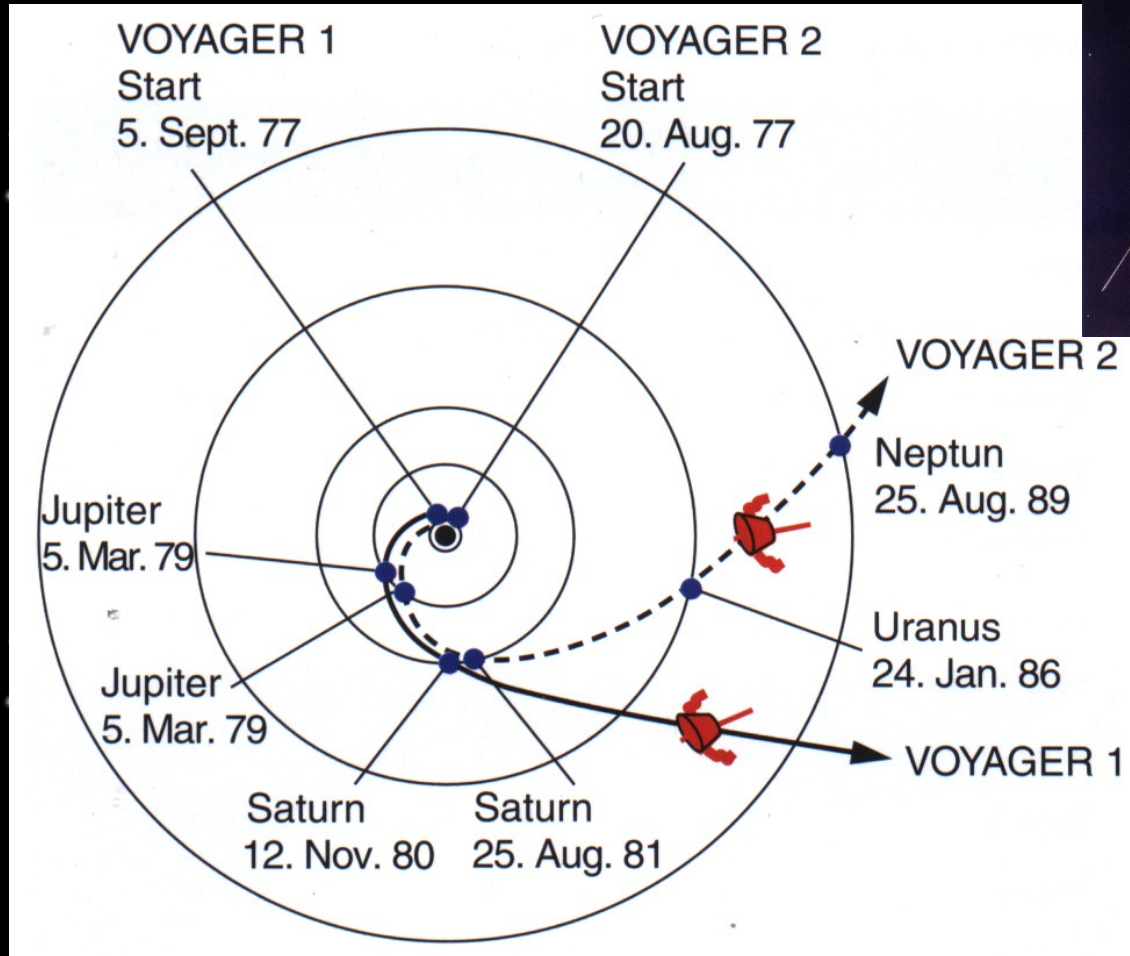
## Prinzip Tischtennisschläger:

- "Abprallen" der Sonde vom bewegten Planeten
- Energiegewinn im "ruhenden" Bezugssystem
- Planet wird abgebremst



# Lösung: Swingby

- Voyager Swingby an Jupiter und Saturn

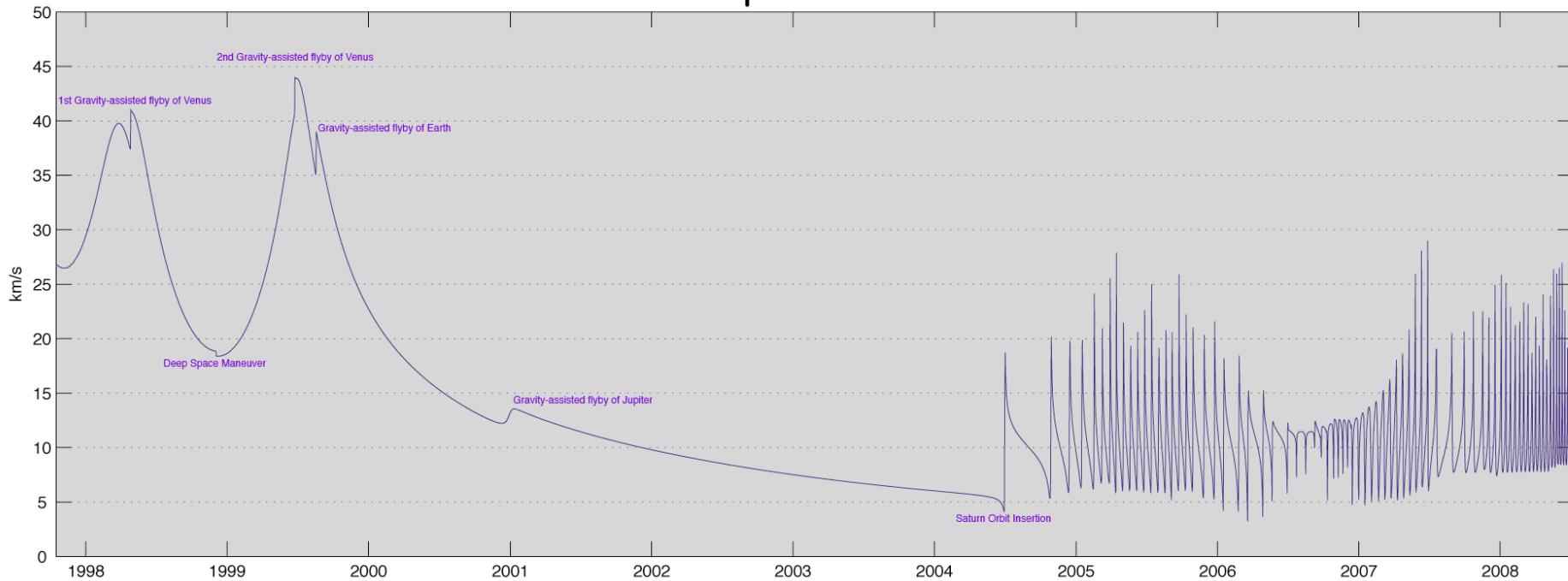


# Cassini zum Saturn

VENUS 1 FLYBY

SATURN ORBIT INSERTION  
1 JUL 2004

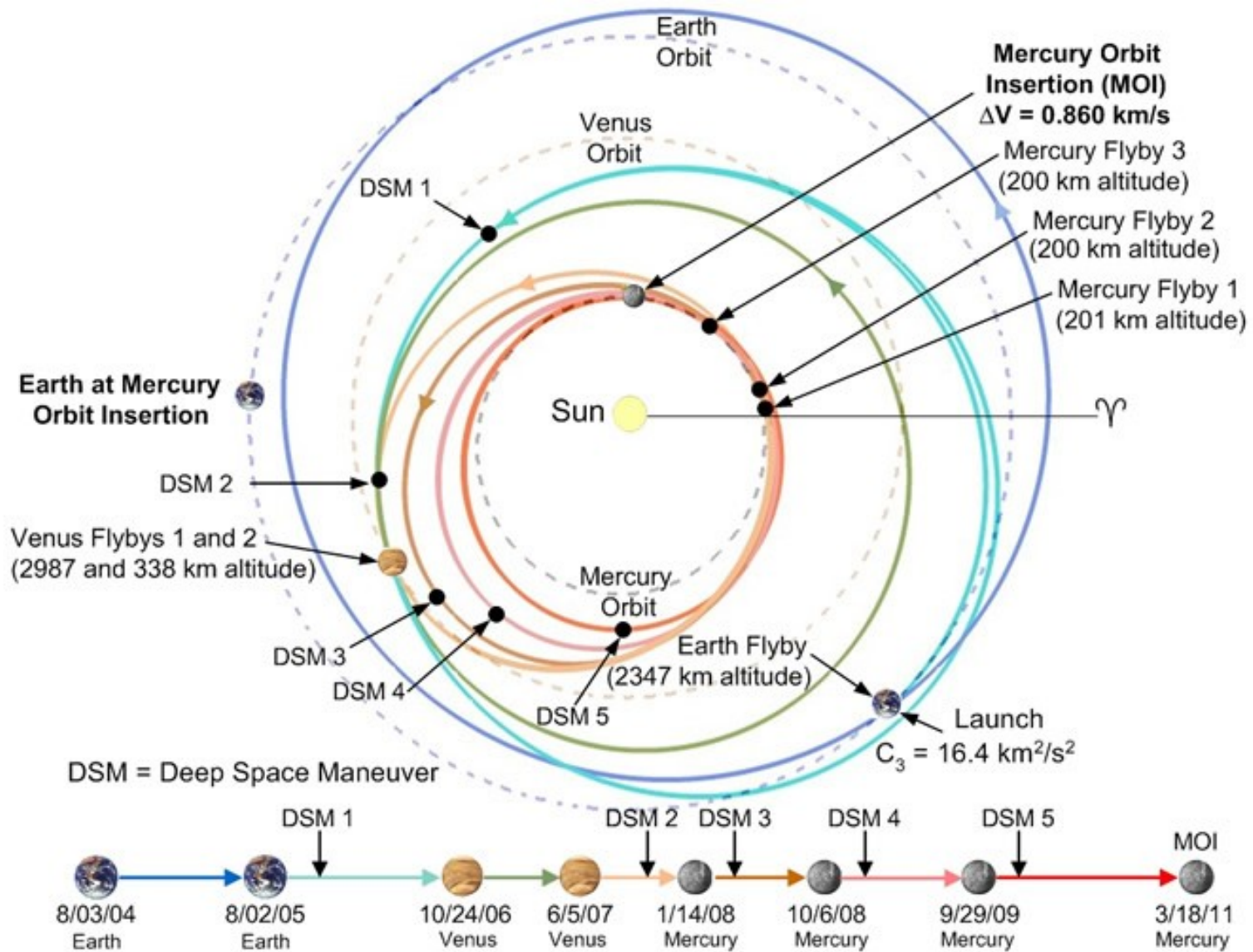
Cassini's speed related to Sun



16 AUG 1999

30 DEC 2000

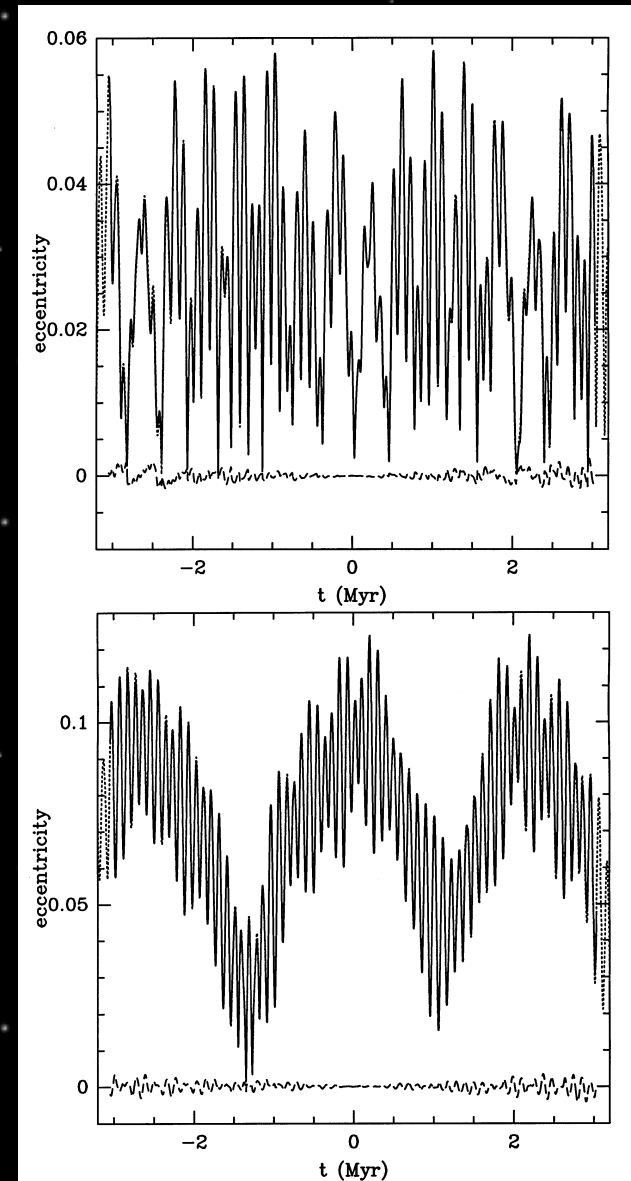
# Messenger zu Merkur



# Die Stabilität des Sonnensystems

- Sonnensystem ist Mehrkörperproblem
- Bewegungen keine einfachen Keplerbahnen, sondern gestörte Bahnen
- Starke Wechselwirkung mit Jupiter bzw. Nachbarplaneten
- Kepler-artige Bahnen nur auf Zeitskalen von  $< 1$  Mio a

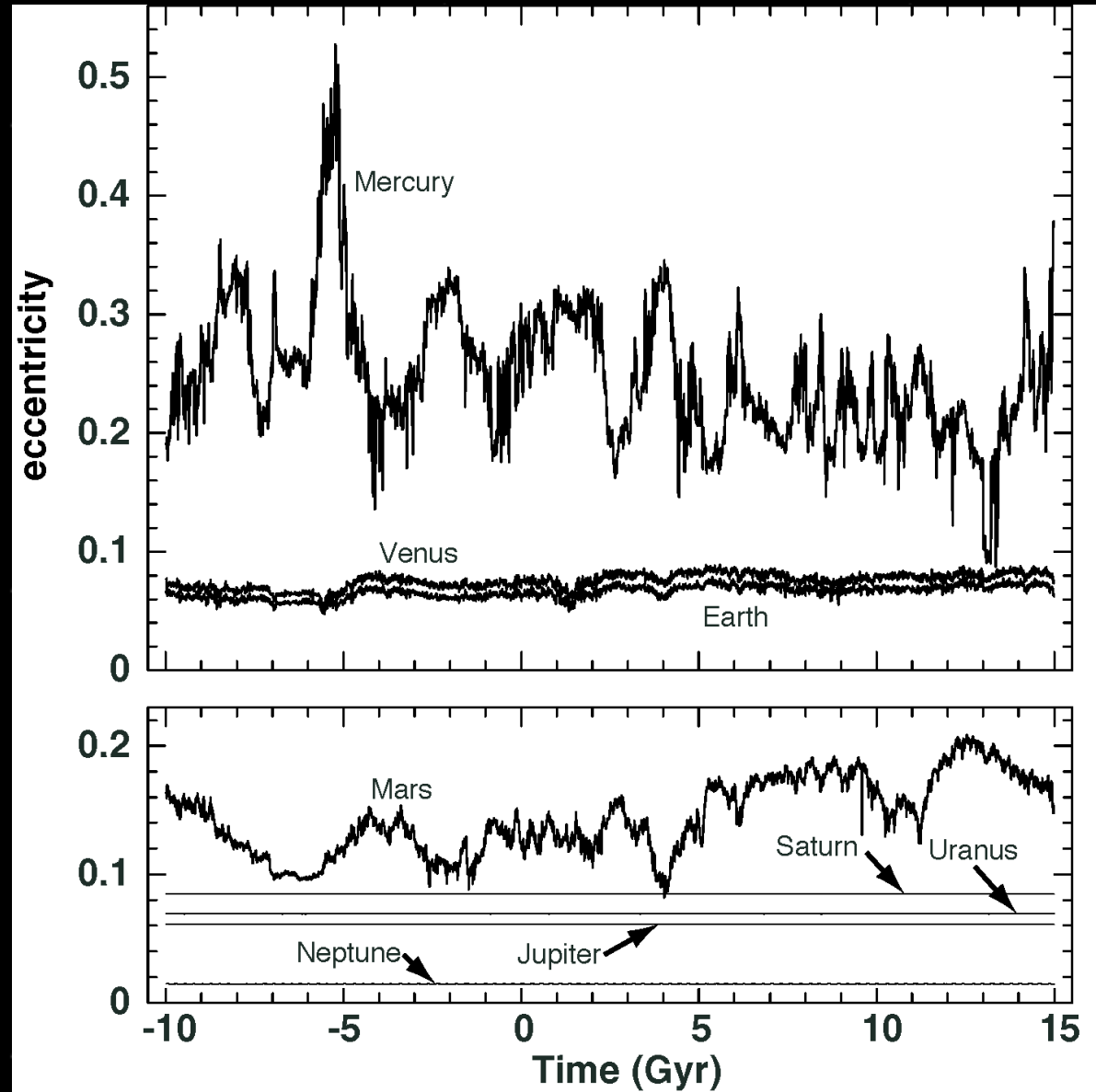
Berechnete Bahnen für Erde und Mars in 6 Ma





# Die Stabilität des Sonnensystems

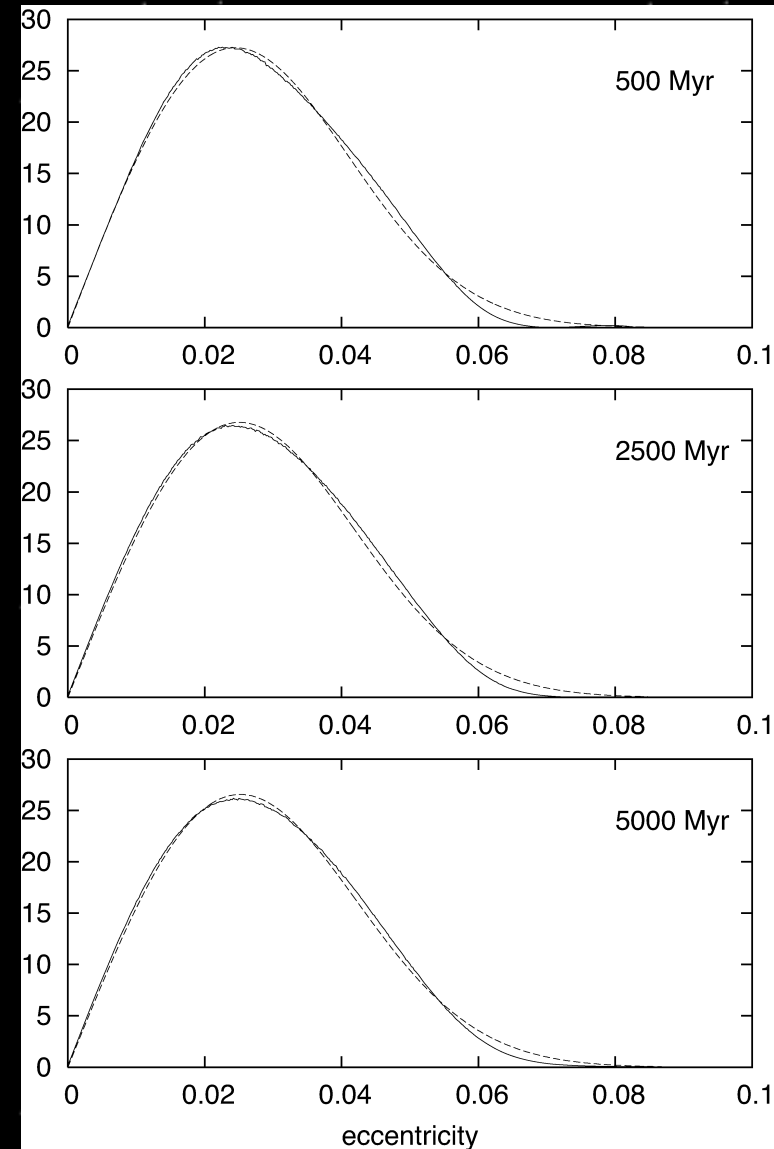
- Chaotisches Verhalten auf großen Zeitskalen



# Die Stabilität des Sonnensystems

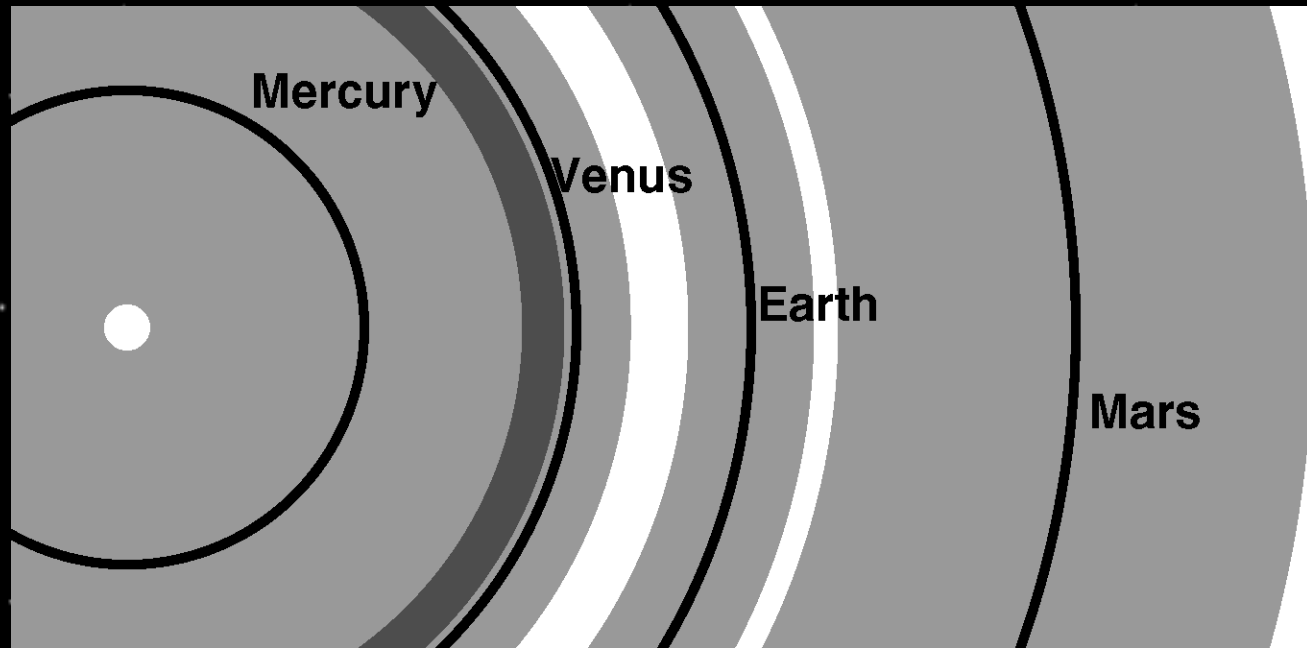
- Chaotisches Verhalten:  
Beschreibung durch  
**Ljapunov-Zeit:  $\sim 200\text{Mio a}$**
- Nach  $t_{ij}$  sind kleinste Störungen  
so stark angewachsen, dass  
keinerlei deterministische Bahn-  
vorhersage mehr möglich ist

-> Beschreibung nur noch über  
Wahrscheinlichkeiten



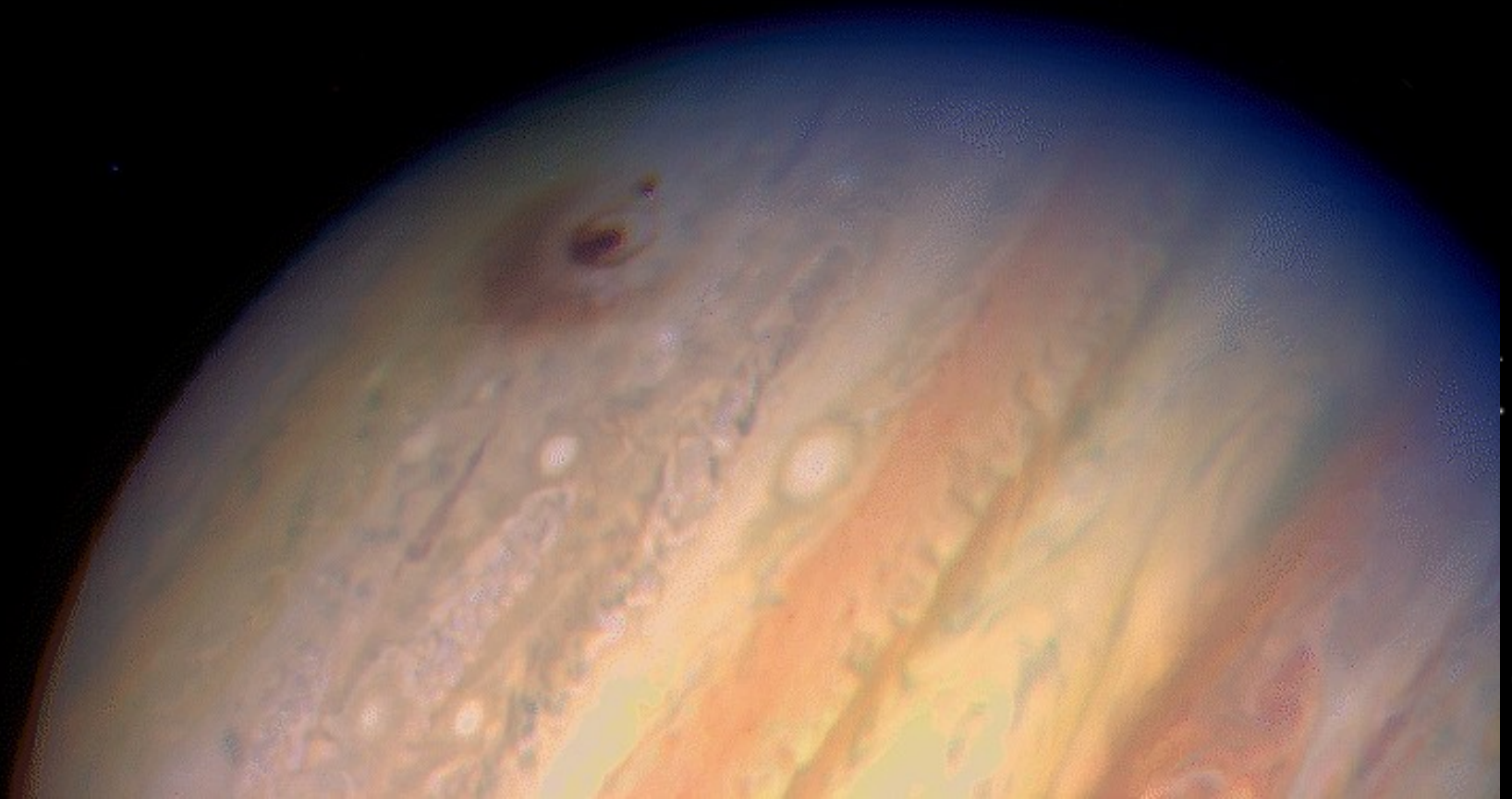
# Die Stabilität des Sonnensystems

- Wahrscheinlichkeitsverteilung für Halbachsen der inneren Planeten



- Die Planetenabstände ergeben sich gerade so, dass alle Planeten ihre Umgebung leerräumen haben
- Merkur und Venus können kollidieren

# Shoemaker-Levy



# Spezielle Relativitätstheorie

## Hypothesen:

- 1) Die Gesetze der Physik sind gleich, egal in welchem Referenzsystem ich mich befinde, solange dies sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegt. (Achtung: Beschleunigungen machen sich bemerkbar.)
- 2) Die Geschwindigkeit von Licht ( $c$ ) ist immer gleich egal aus welchem Referenzsystem ich sie messe!

## Konsequenzen:

- 1) Bewegte Gegenstände sind für den RUHENDEN Beobachter kürzer.
- 2) Bewegte Uhren laufen für den RUHENDEN Beobachter langsamer.
- 3) Die Masse eines Objektes nimmt zu, wenn es sich schneller bewegt. (Um ein Objekt auf eine Geschwindigkeit schneller als  $c$  zu beschleunigen, braucht man unendlich viel Energie.)

# Allgemeine Relativitätstheorie (1915)

## Hypothesen:

1) Materie verformt Raum und Zeit.

## Einige Konsequenzen:

- Lichtpfad wird von (schweren) Objekten gebogen → Gravitationslinsen
- Gravitationsbedingte Rotverschiebung
- Schwarze Löcher

**Newtons Theorie:** Raum ist unendlich. Zeit läuft gleichschnell.

Darin befinden sich Gegenstände. Gravitation ist eine Kraft. → Gut für das tägliche Leben, Flugbahn der Spaceshuttle.

**Einsteins AR:** Gravitation verformt den Raum und die Zeit.

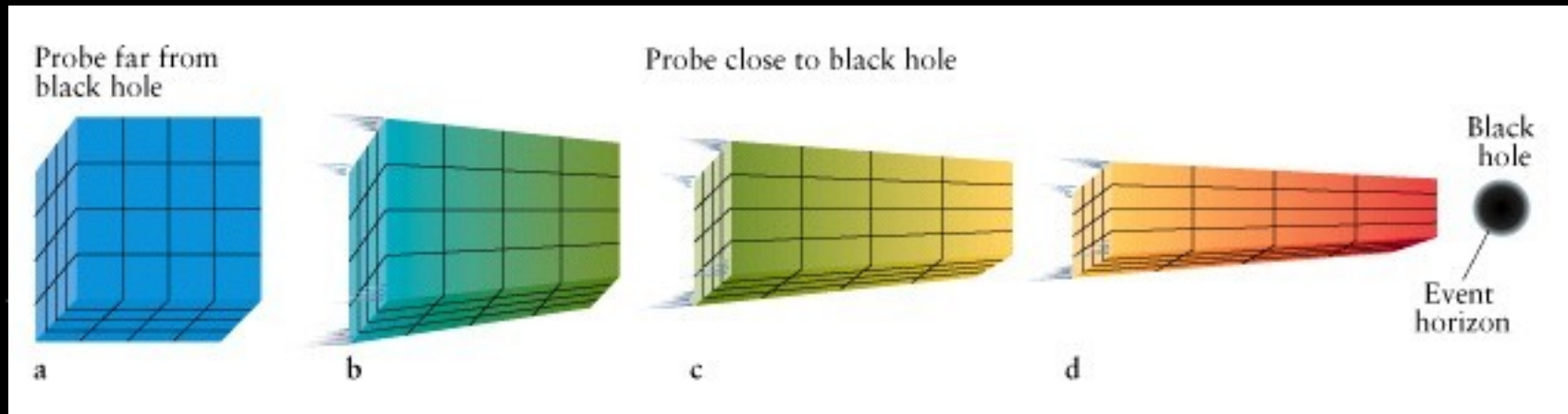
→ Umlaufbahn von Merkur, Kollaps eines Neutronensterns, ...

# Fall ins schwarze Loch

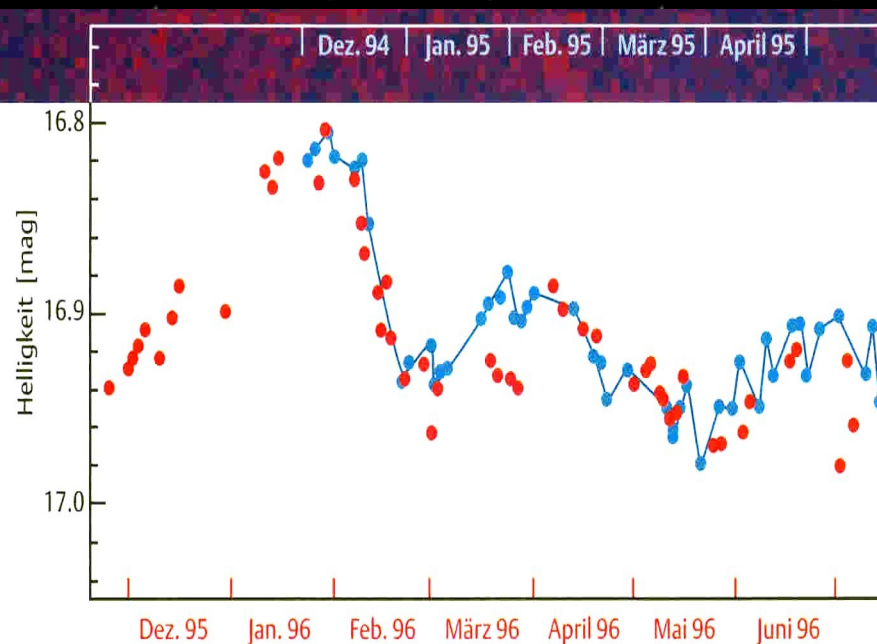
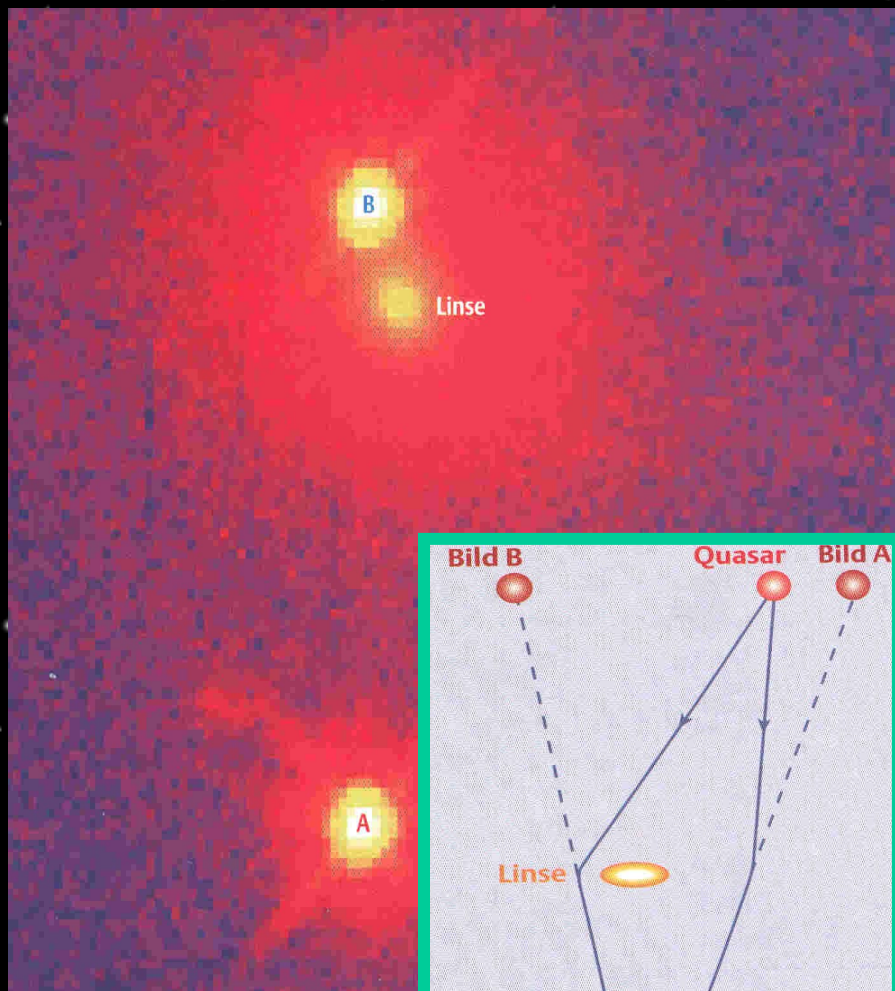
Eine Volumen-Probe - hier ein blauer Würfel - wird

- 1) Langgezogen
- 2) Dünnegezogen
- 3) Die Photonen werden roter (gravitational redshift)
- 4) Zeitdilatation für den Beobachter außen (Uhren der Probe bleiben am Ereignishorizont stehen)

Normale Zeit und Fall aufs schwarze Loch für den Beobachter in der Probe.



# Gravitationslinsen & Verdopplung

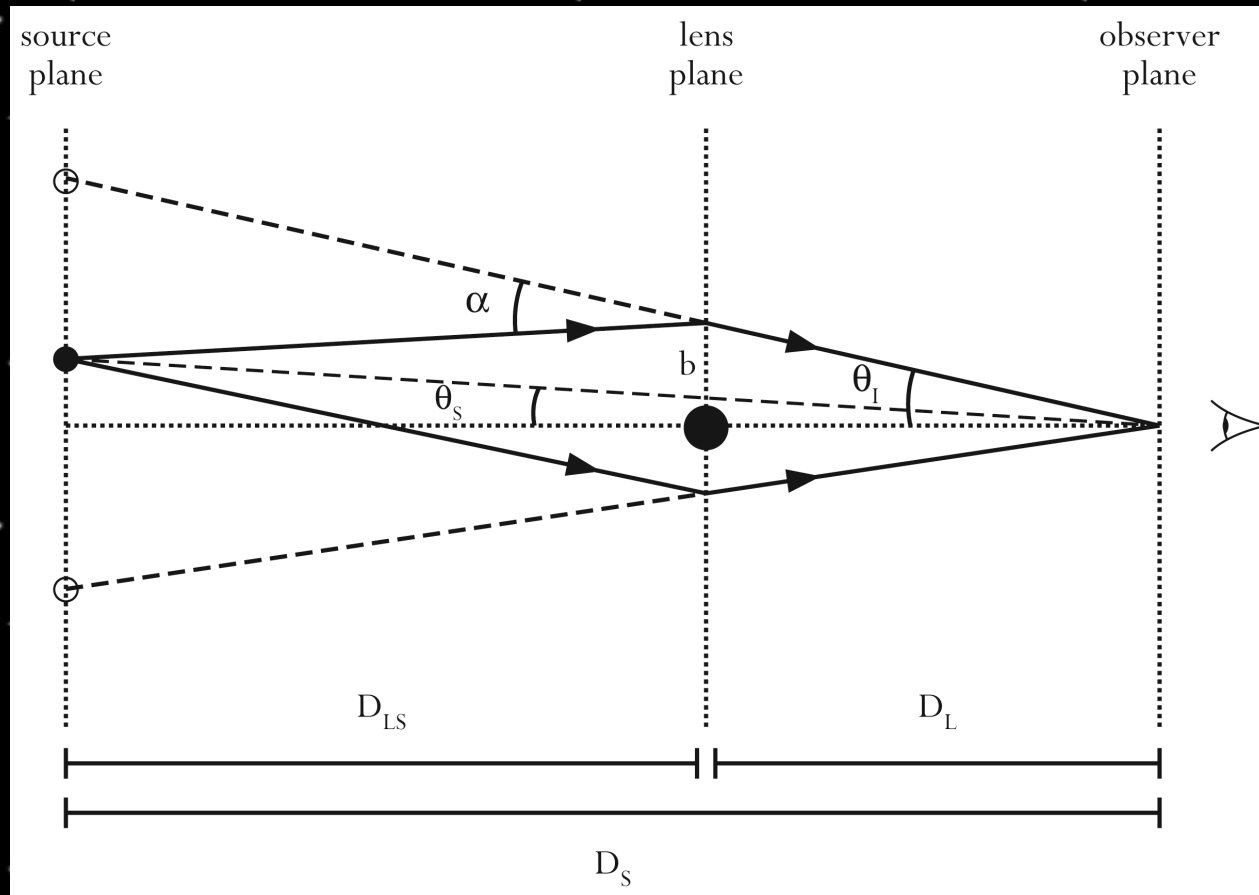


Oben: Aufnahme des Hubble-Weltraumteleskops vom Doppelquasar Q 0957+561 im infraroten Licht. Die beiden Quasarbilder sind 6.1 Bogensekunden voneinander getrennt. Der helle Fleck nahe Bild B ist das Zentrum der als Linse wirkenden Galaxie. Unten: Helligkeitsverlauf der beiden Bilder A und B. Ändert der Quasar seine Helligkeit, sehen wir das zuerst im Bild A, und nach einer Zeitverschiebung von etwa 417 Tagen in Bild B. Im Diagramm sind die Lichtkurven der beiden Bilder überlagert – Bild A: blaue Symbole, Bild B: rote Symbole, verschoben um 417 Tage nach links. (NASA/ESA)



# Einsteinring

Quelle, Linse und Beobachter befinden sich hintereinander

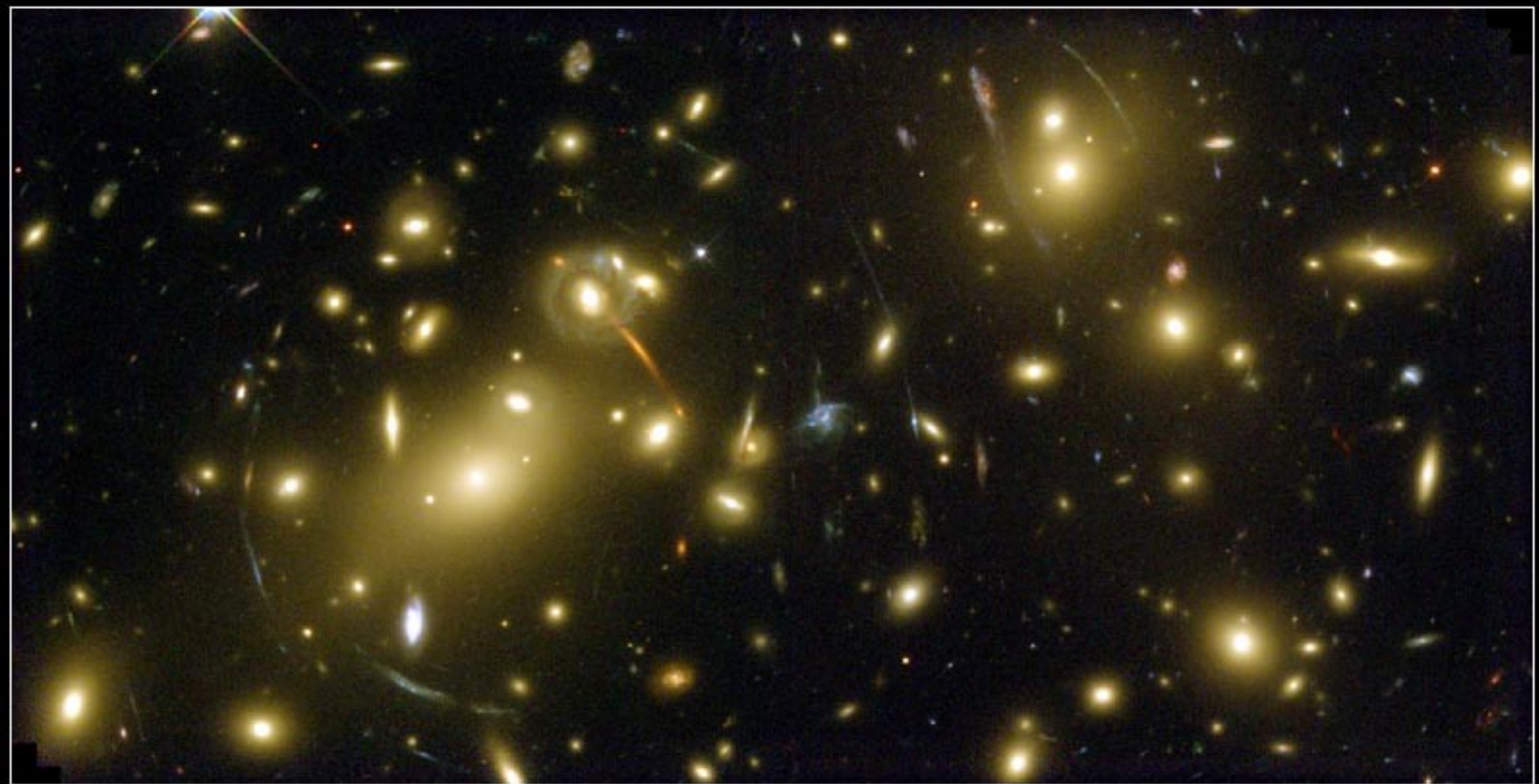


# Gravitationslinsen & Ringbildung: CL 0024+1654



5 Milliarden Lj

# Abell 2218

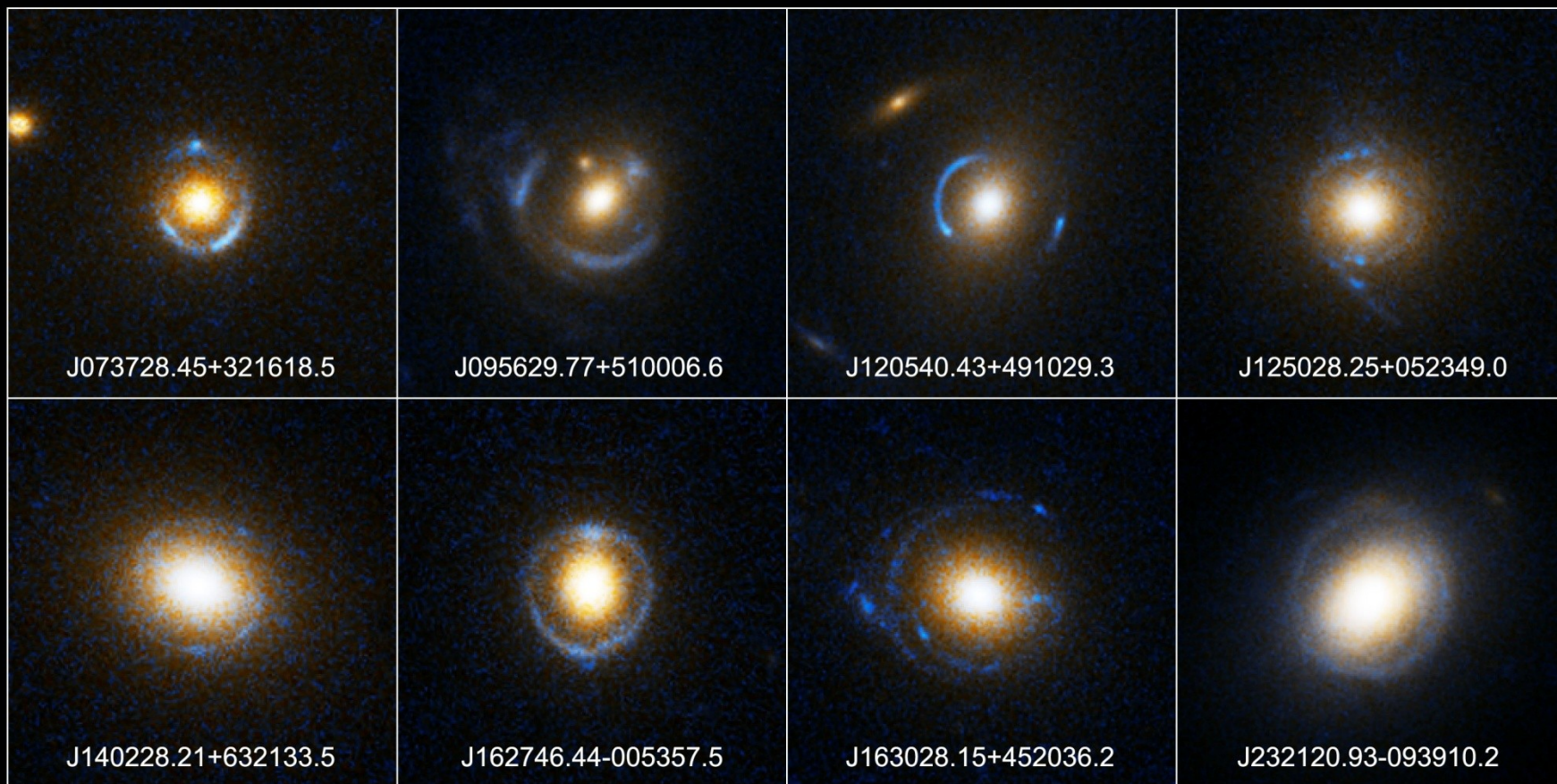


**Galaxy Cluster Abell 2218**

**HST • WFPC2**

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI) • STScI-PRC00-08

2 Milliarden Lj

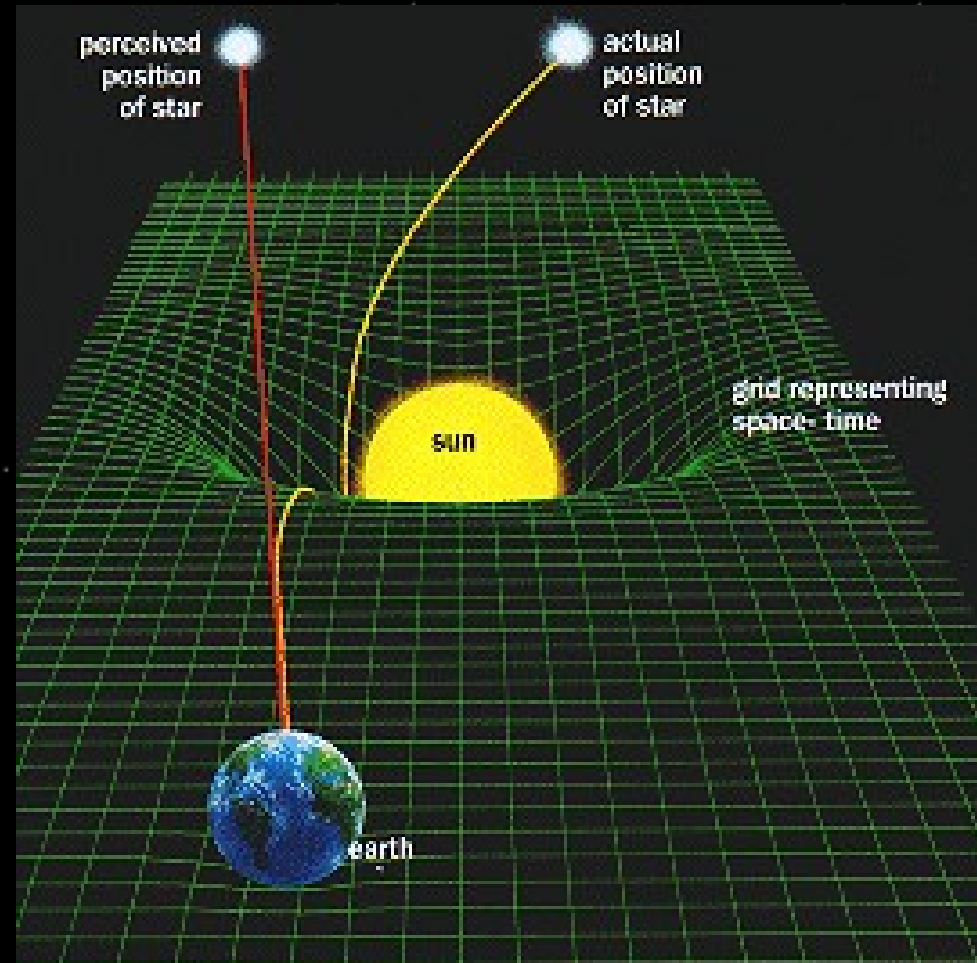


**Einstein Ring Gravitational Lenses**  
*Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys*

# Wurmlöcher

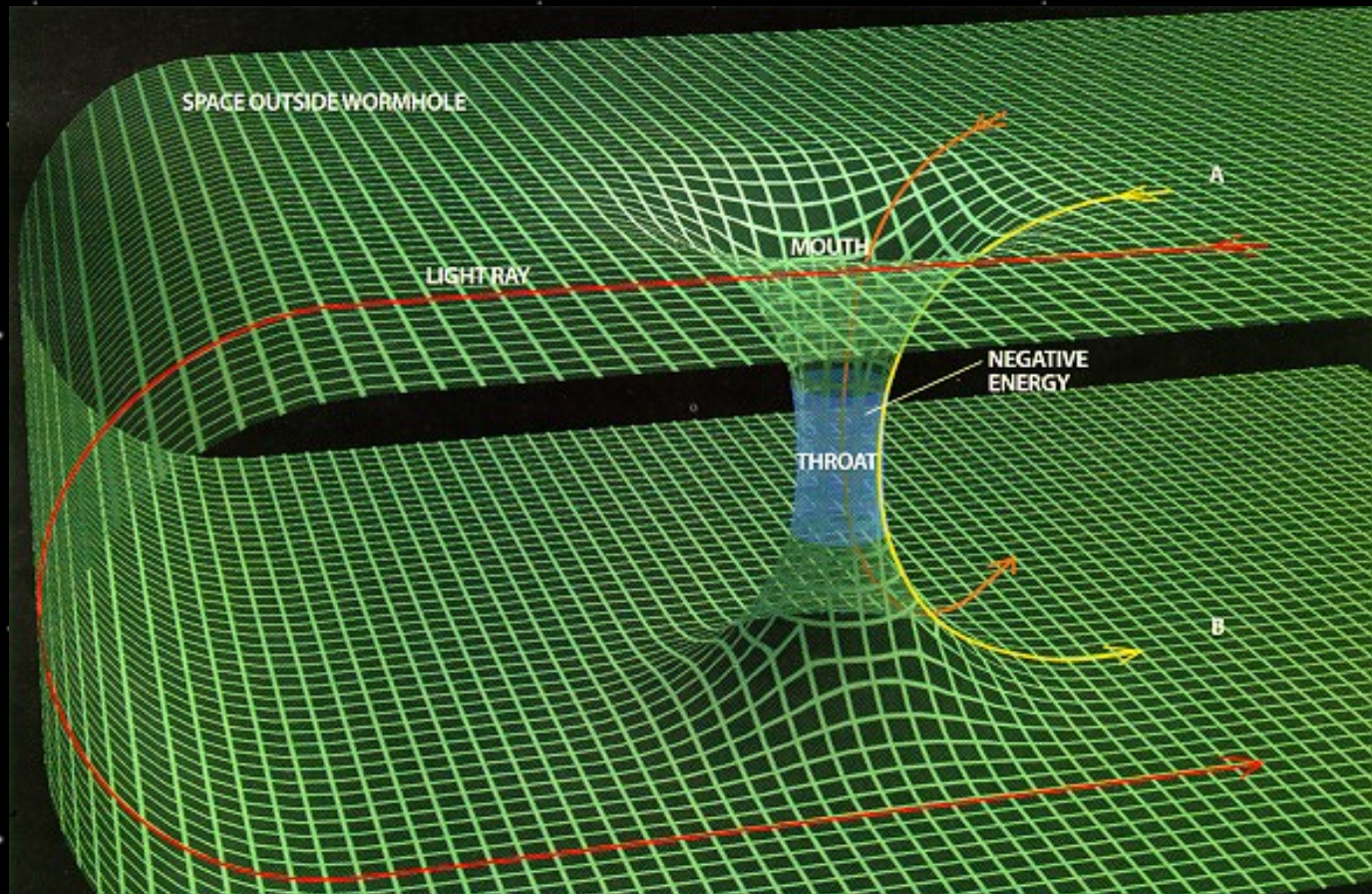
Grundprinzip:  
jede Masse verformt den  
Raum in ihrer Umgebung

Bsp:  
Ablenkung des Sternen-  
lichts durch das Gravi-  
tationsfeld der Sonne



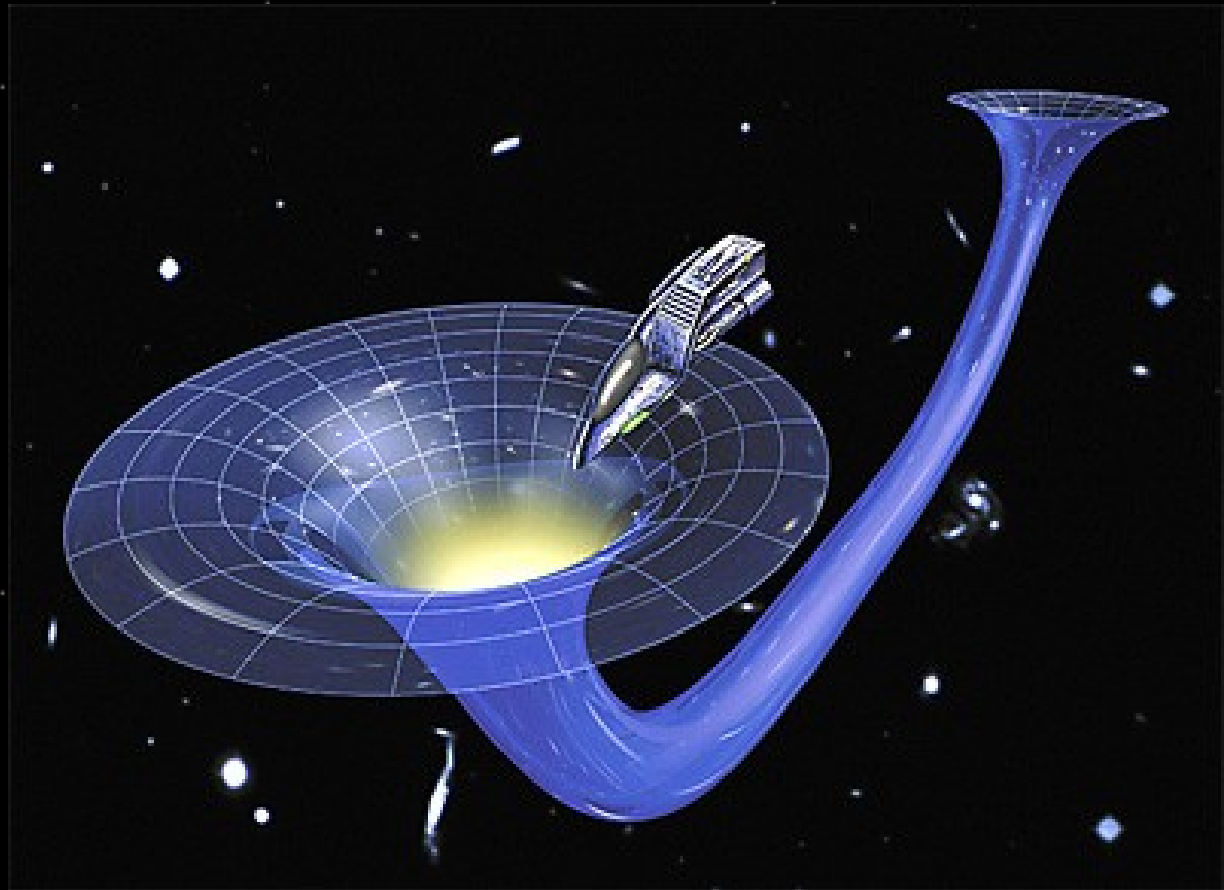
# Wurmlöcher

Krümmung des Raumes kann so groß werden, dass der Raum sich auf sich selbst krümmt.



# Wurmlöcher

- Reise mit „Überlichtgeschwindigkeit“ zwischen zwei Orten möglich.
- Auf nm-Skalen nachgewiesen

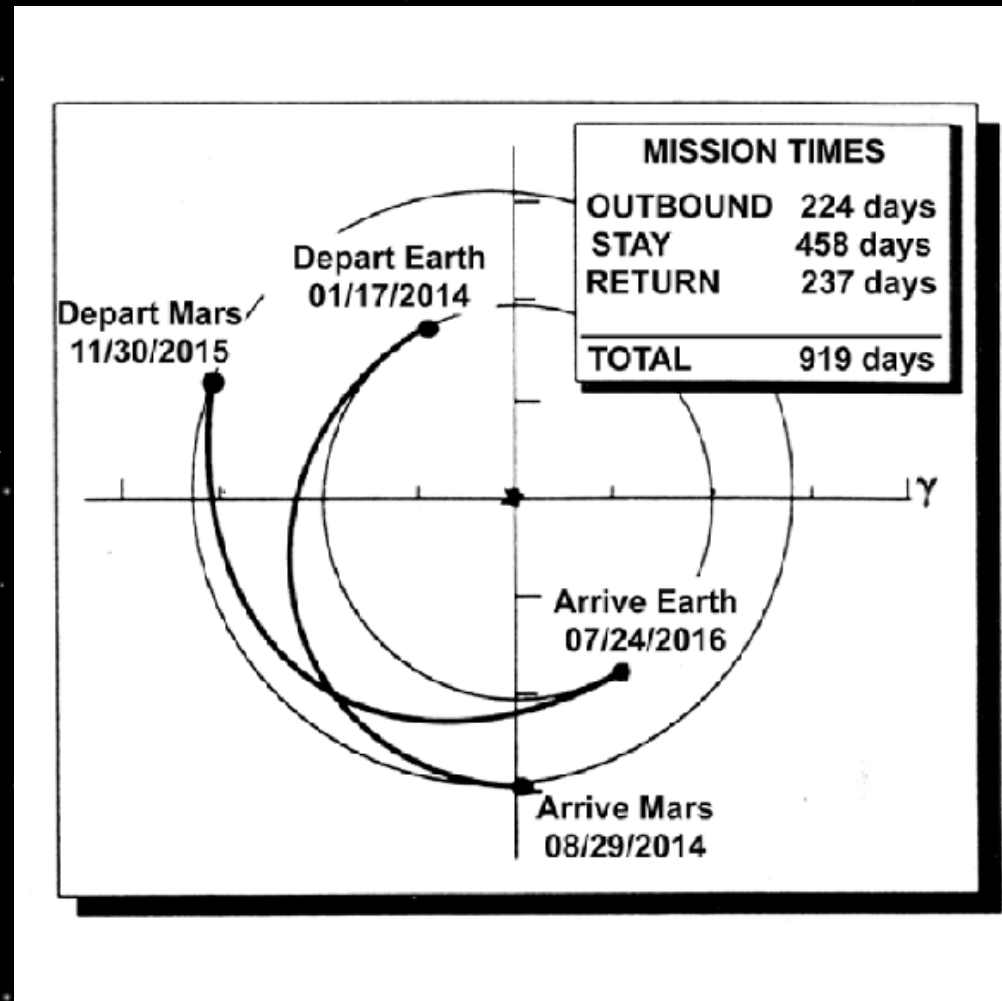


# Beispiel Marsmissionen

3 mögliche Szenarien:

a) direkter Transfer,  
kurzer Aufenthalt

- mittleres Risiko in Transferphase
- hoher Energieverbrauch

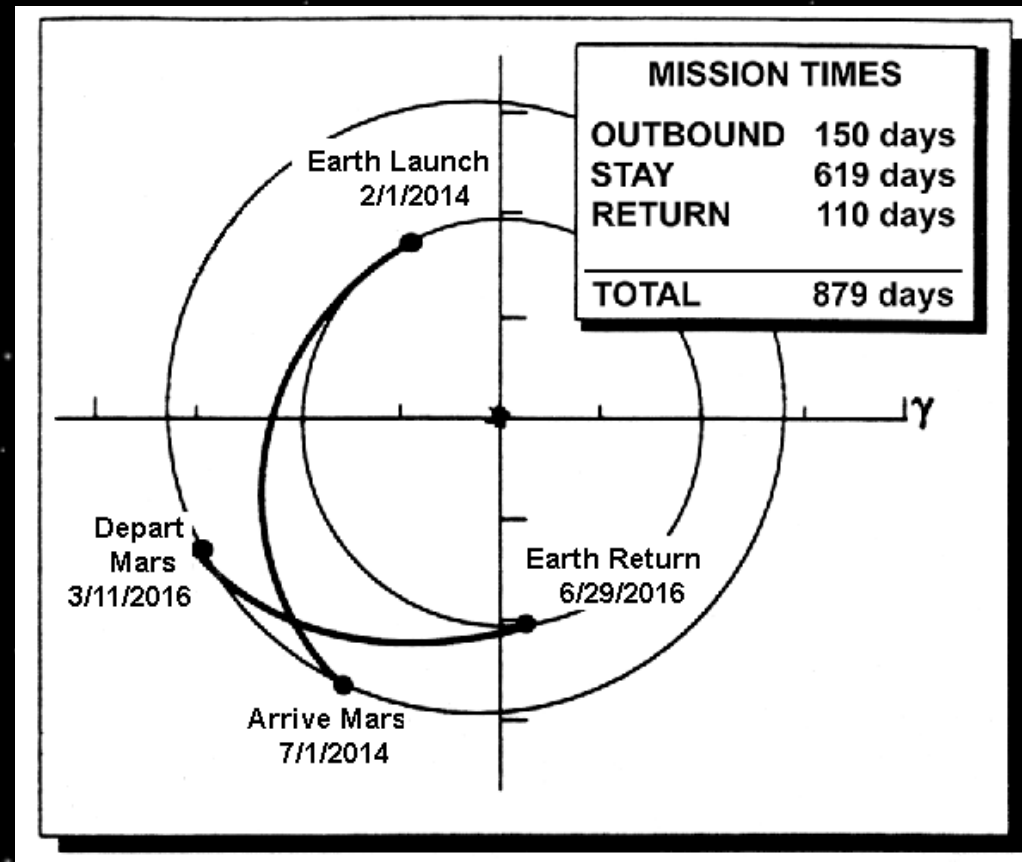




# Beispiel Marsmissionen

## b) direkter Transfer, langer Aufenthalt

- geringes Risiko in Transferphase
- sehr hoher Energieverbrauch



# Beispiel Marsmissionen

c) indirekter Transfer, sehr kurzer Aufenthalt

## Venus-Flyby

- hohes Risiko in Transferphase
- geringe Energieverbrauch

