

# WELTBILDER VON PTOLEMÄUS BIS NEWTON

DAS SONNENSYSTEM UND SEINE NÄCHSTEN VERWANDTEN FÜR NICHT-PHYSIKER

MARKUS PÖSSEL

HAUS DER ASTRONOMIE

UNIVERSITÄT HEIDELBERG, WS 2022/2023

Wie bei allen vielschichtigen Themen: Verschiedene Schwerpunktsetzungen möglich

Hier: Unterschiedliche Freiheiten/Flexibilität bei der Weltbeschreibung

# DER ANBLICK DES HIMMELS



# DER ANBLICK DES HIMMELS

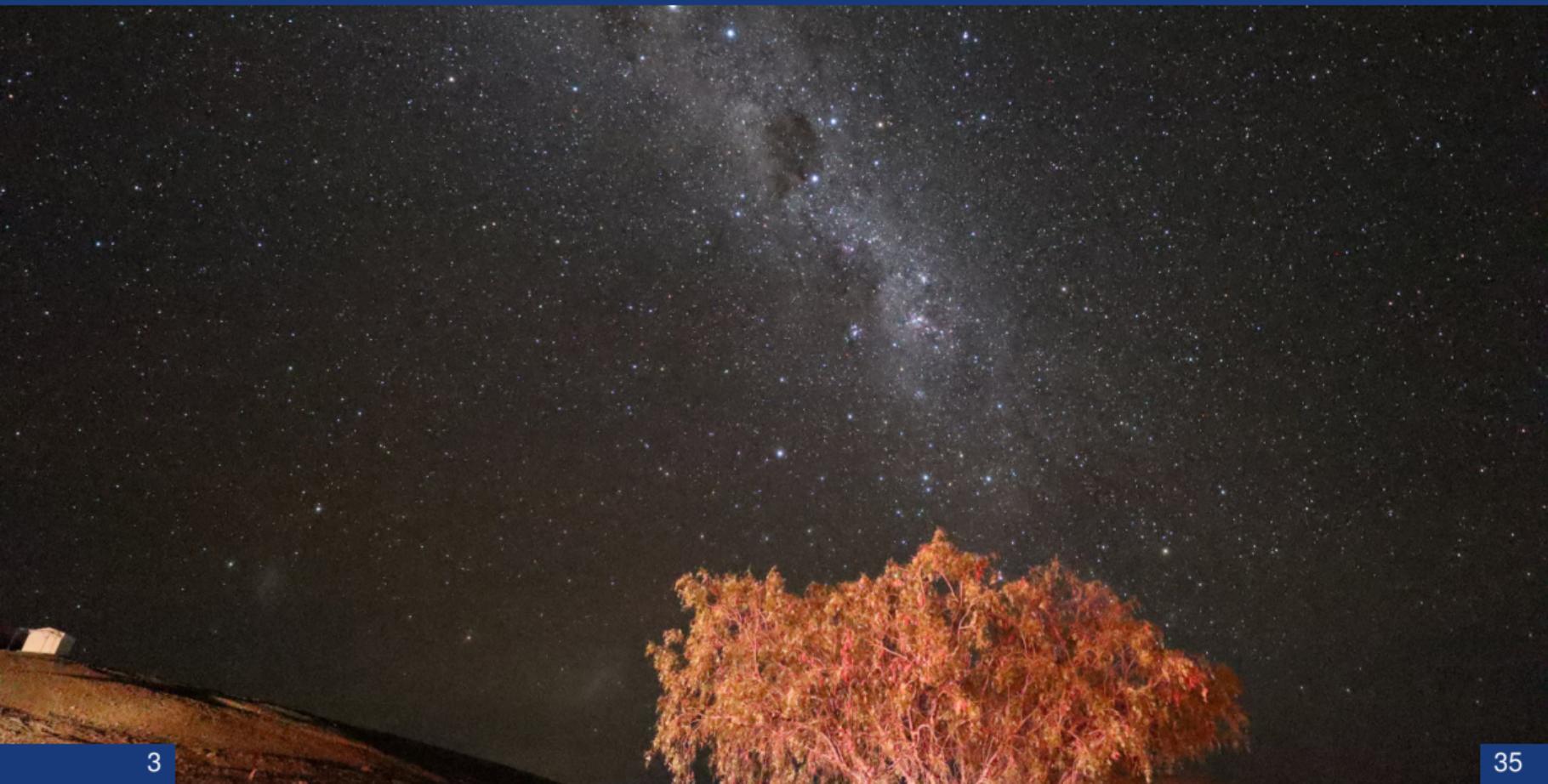




Bild: Stonehenge, Salisbury, von Nutzer Operarius via Wikimedia Commons unter Lizenz CC BY 3.0



Bild: 12-Stunde-Belichtung Richtung Polarstern, Fabrizio Melandri/IAU OAE unter Lizenz CC-BY 4.0

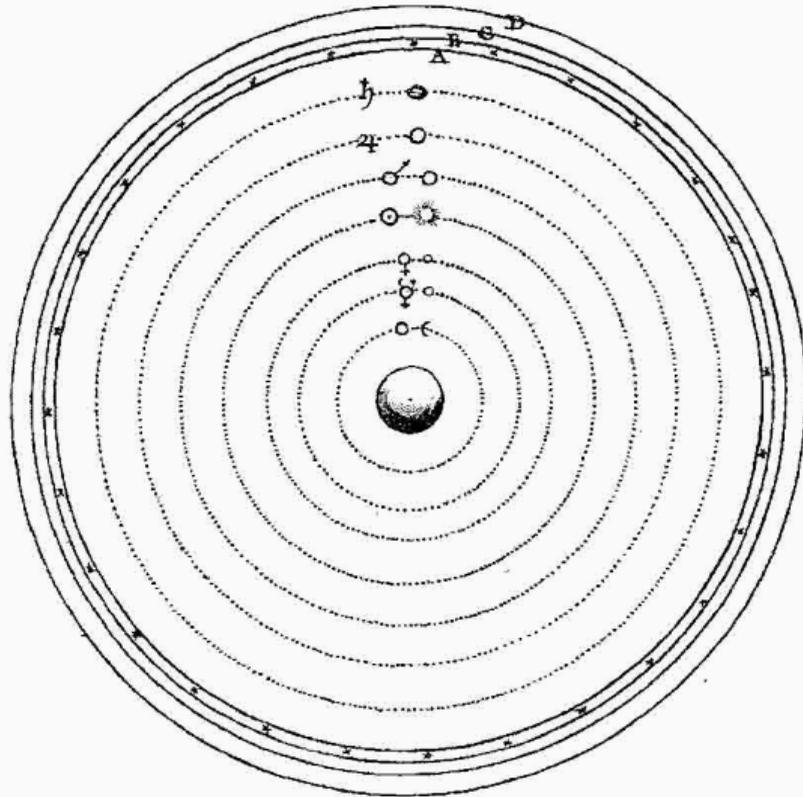


Abb. aus: Diderot/D'Alembert, *Encyclopédie*

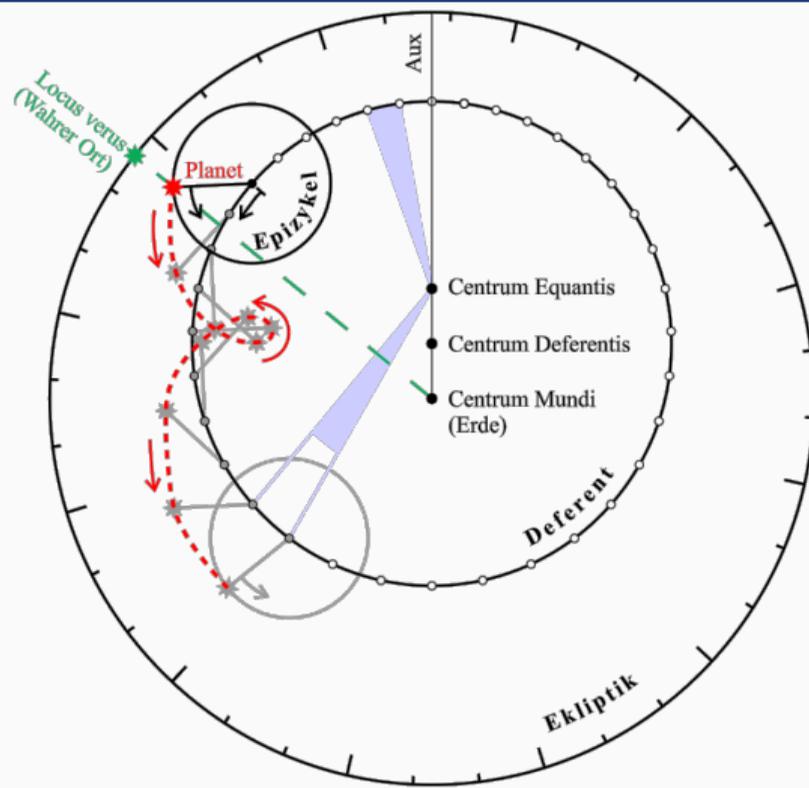
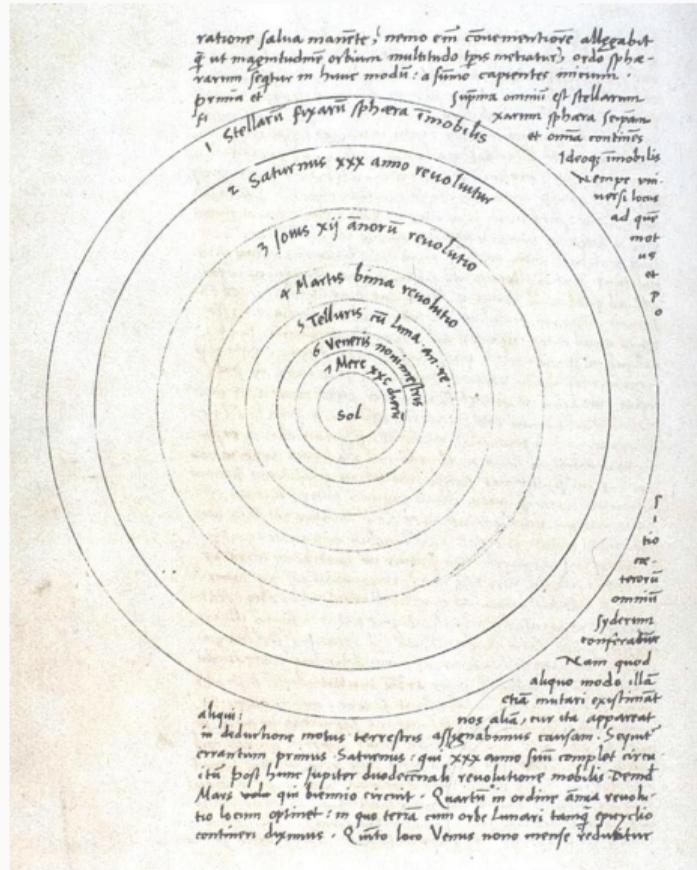


Diagramm: Ptolemäischer Epizykel und Deferent unter Berücksichtigung der drei Zentren.  
 Nutzer Joerg-ks via Wikimedia Commons unter Lizenz CC BY-SA 4.0

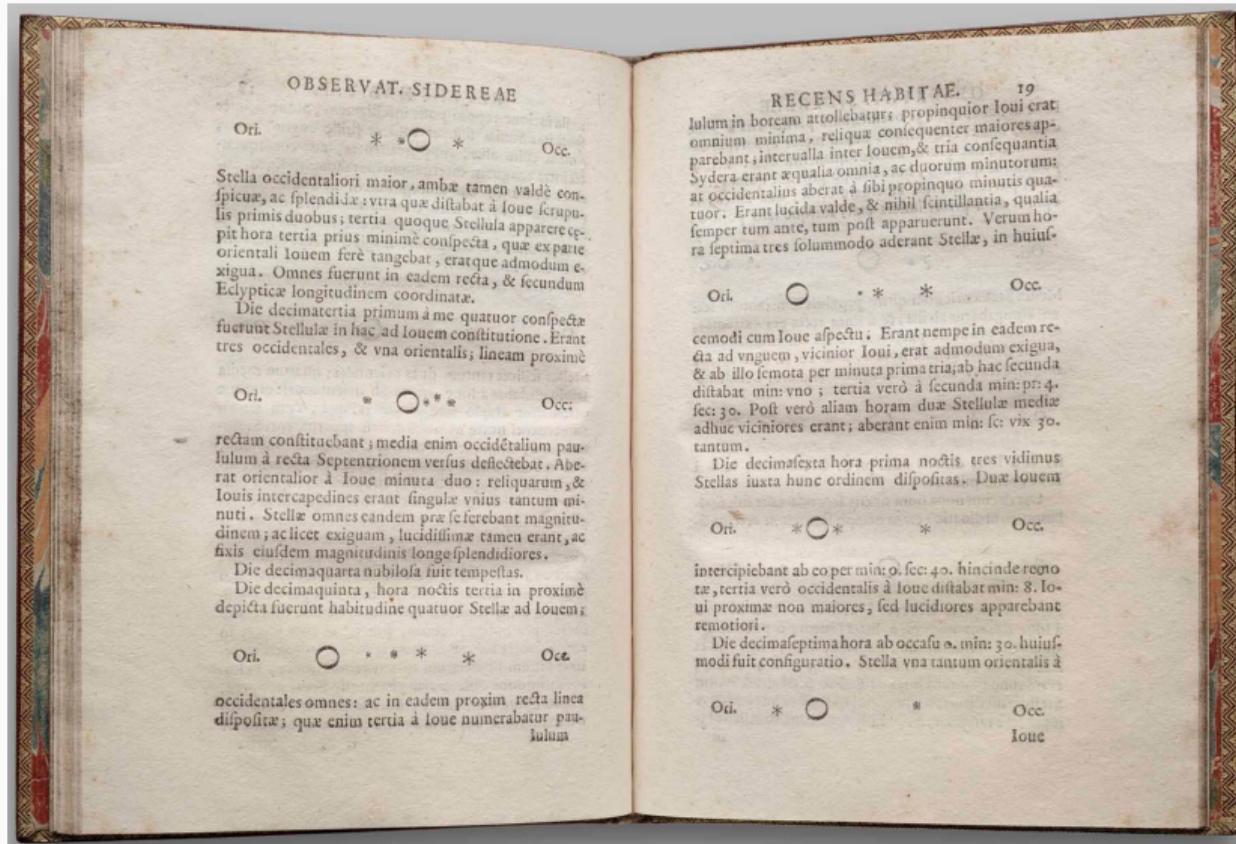


De revolutionibus orbium  
coelestium (1543)



Mauerquadrant von Tycho Brahe, wahrscheinlich aus *Astronomiae instauratae mechanica* (1598), später koloriert, Genauigkeit  $< 1'$

# GALILEI'S BEOBACHTUNGEN: SIDEREUS NUNCIUS (1610)



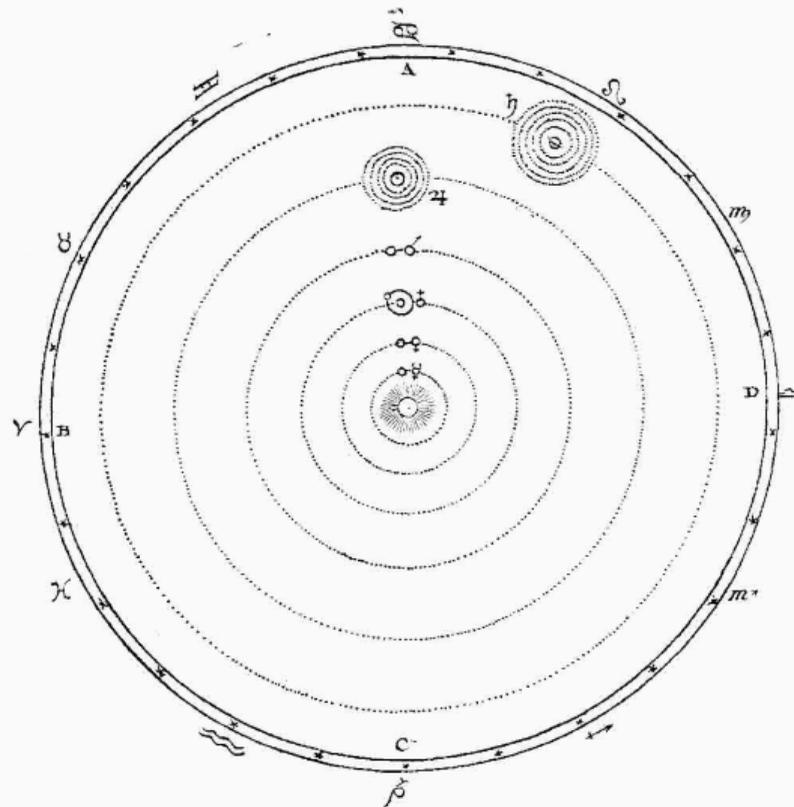
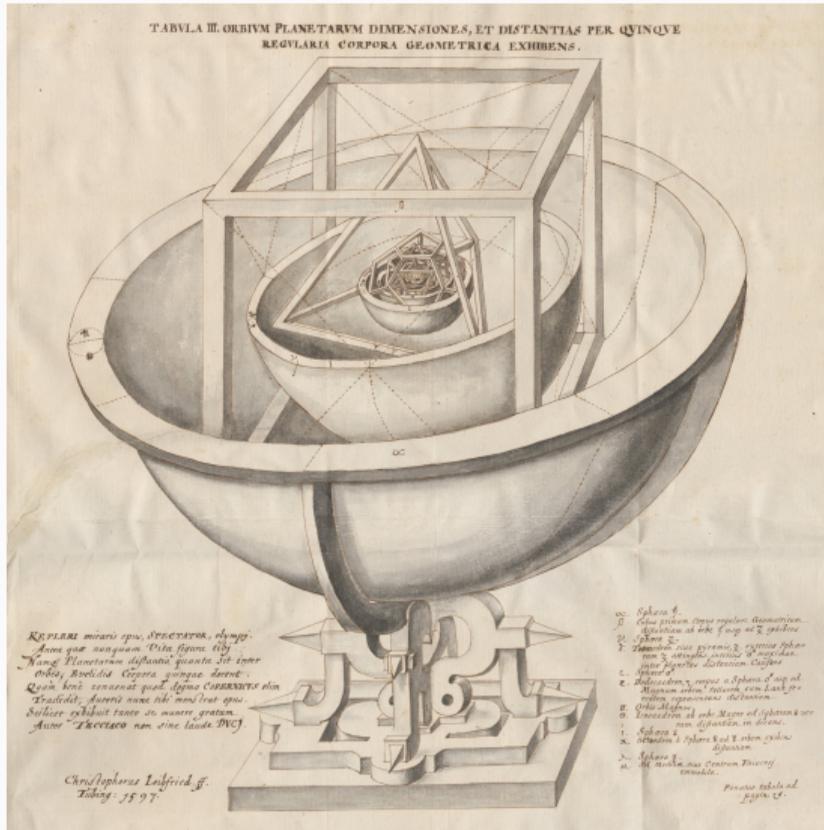


Abb. aus: Diderot/D'Alembert, Encyclopédie

# ABSTANDS-ABFOLGE ERKLÄREN: GEOMETRIE (KEPLER)



Kepler, *Mysterium Cosmographicum* (1596)

Planetenabstände aus Geometrie

Schachtelung mit platonischen Körpern

Schränkt ein:

- Abstände
- Gesamtzahl Planeten

Verbleibende Flexibilität

z.B. Dicke der Kugelschalen



# ABSTANDS-ABFOLGE ERKLÄREN: ALGEBRA (TITIUS UND BODE)

Johann Daniel Titius (1729–1796), Johann Elert Bode (1747–1826)  
Formel für Planetenabstände von Sonne:

$$R_n = 4 + 3 \cdot 2^n$$

bzw. große Halbachse Erdbahn zu 1 gesetzt (Johann Friedrich Wurm):

$$a_n = (0.4 + 0.3 \cdot 2^n) \text{ AE}$$

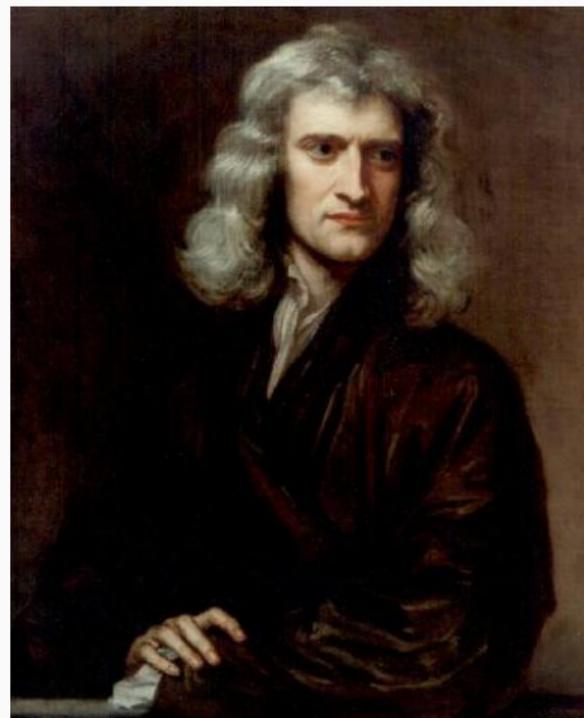
Name	Merkur	Venus	Erde	Mars	Asteroiden	Jupiter	Saturn	Uranus	Neptun	Pluto
n	$-\infty$	0	1	2	3	4	5	6	–	7
$a_n$	0.4	0.7	1	1.6	2.8	5.2	10	19.6	–	38.8
reales a	0.387	0.723	1	1.52		5.20	9.57	19.17	30.18	39.48

Siehe Vorbereitungsvideo <https://bit.ly/3S6JwEn>

- Mechanik = allgemeine Bewegungslehre
- Drei Newtonsche Axiome:
  - ▶ Trägheitssatz
  - ▶  $F = m \cdot a$
  - ▶ Aktion = Reaktion
- Kraftgesetz für Gravitation

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

- Irdisches und Himmlisches nicht mehr getrennt
- Grundlage Kepler-Gesetze plus Massenbestimmung
- Physik beschrieben durch Differenzialgleichungen



Isaac Newton (1642-1727)  
by Sir Godfrey Kneller  
via Wikimedia Commons

Warum ist die Newton'sche Formel

$$F = \frac{GMm}{r^2}$$

so nützlich?

- Weil sich daraus direkt die Keplerschen Gesetze ableiten lassen
- Weil die Gravitation in der Formel mit dem Quadrat des Abstandes abfällt, wie es in der Astronomie immer der Fall ist
- Weil sie allgemein für kugelförmige Massen gilt, und viele astronomische Objekte näherungsweise Kugeln sind
- Weil astronomische Objekte sich im Gegensatz zu irdischen Objekten mittels der Gravitation anziehen



Bild: Martin Federspiel, Simone Bolzoni

Martin Federspiel, „Wie ich die Mondentfernung bestimme“ in *Sterne und Weltraum* 2/2008, S. 76-79

Daniel Ahrens, „Lippstadt und Kapstadt greifen zu den Sternen“, *Wissenschaft in die Schulen* 2/2008.

# ABSTANDSSKALA IM SONNENSYSTEM

Direkte Messungen Sonnenparallaxe schwierig — insbesondere: kein sichtbarer Sternhintergrund!

Lösung: *Venustransit* — jeweils zwei, 8 Jahre auseinander, dann mehr als 100 Jahre Pause.

Vorteile: Direkte Messung ist Zeitmessung (Transitanfang/-ende).

Ab 1769 gute, konsistente Ergebnisse,  
1 AU ~ 150 Mio. km,  
Parallaxe  $8'',57 \pm 0'',04$  (5‰)

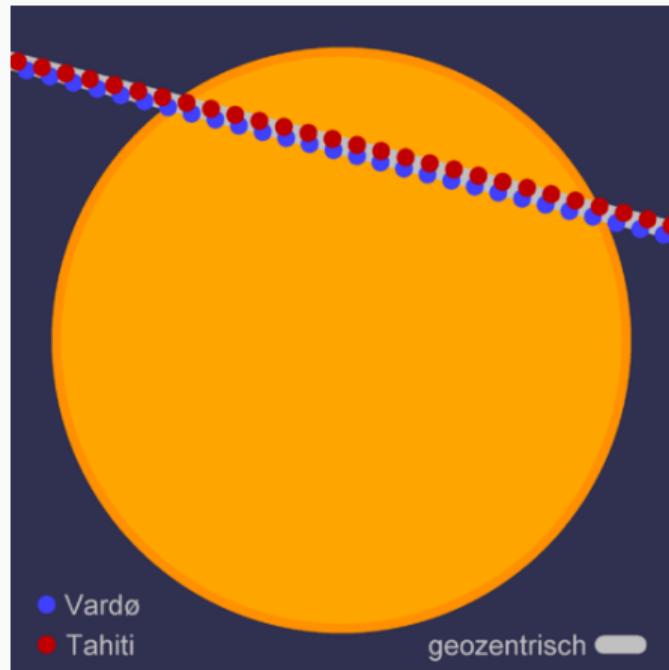


Bild: Benutzer Sch via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0

# NEWTONSCHE GRAVITATION: ERFOLGE IN DER HIMMELSMECHANIK

Beschreibung von *Wechselwirkungen* zwischen Planeten, Kometen, ...  
führt zu deutlich genaueren Vorhersagen!



Bild: NASA/W. Liller

Halleys Vorhersage für 1758:  
Halleyscher Komet

Offene Bahnen (Hyperbel, Parabel) möglich

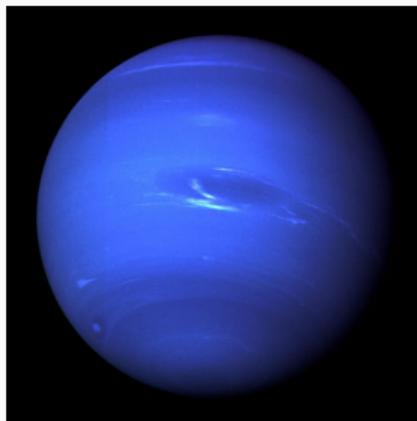


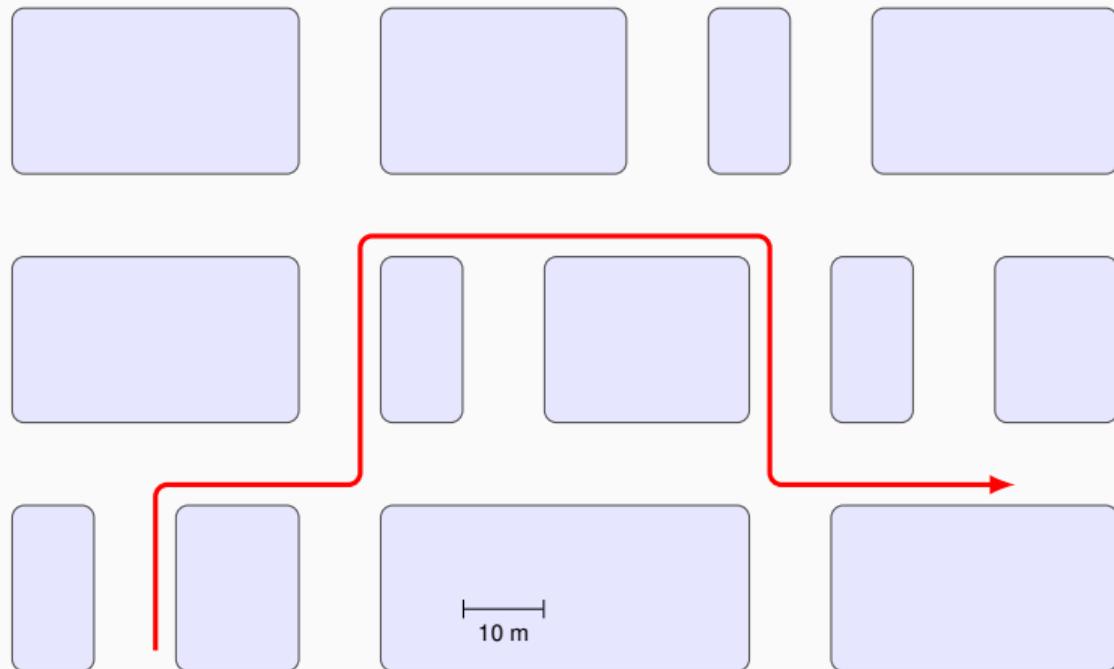
Bild: NASA/JPL

Neptun 1840er:  
Voraussage Le Verrier und Adams  
Nachweis Galle und d'Arrest 1846

# ARTEN VON GESETZEN

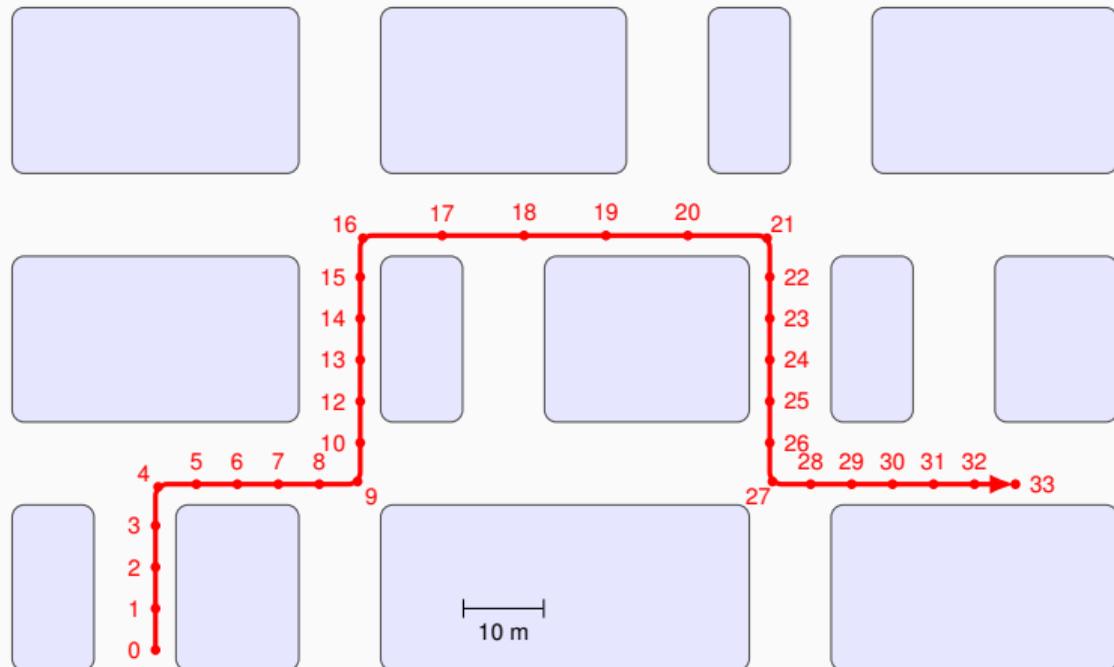
Beispiel: Fahrendes Auto, das eine bestimmte Strecke abfährt.

Wie kann man das beschreiben/vorschreiben?

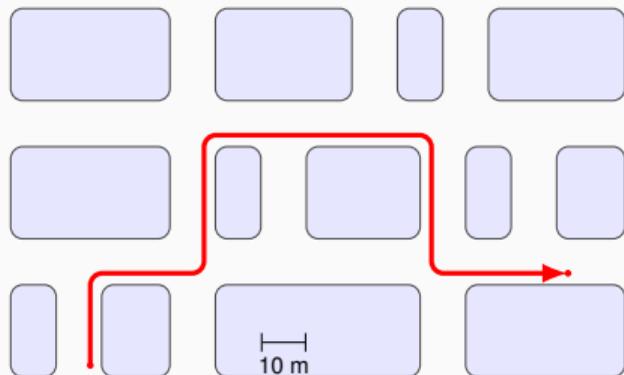


# ARTEN VON GESETZEN: ORTSGESETZ

Ein **Ortsgesetz** (kein Fachbegriff!) schreibt vor, wo ein Objekt zu einer bestimmten Zeit zu sein hat.



Ein **Geschwindigkeitsgesetz** (kein Fachbegriff!) schreibt vor, wann sich ein Objekt wie schnell in eine bestimmte Richtung bewegt.



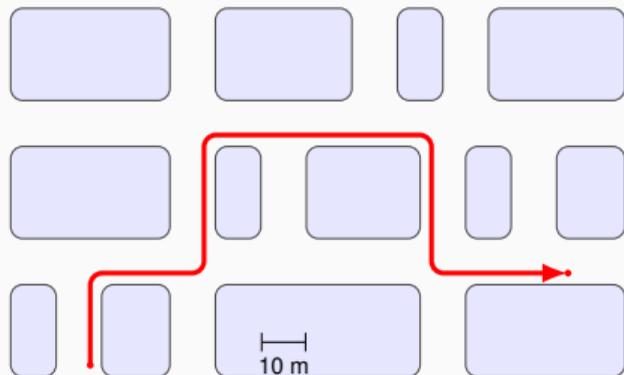
Zeit	Richtung	Geschwindigkeit
0–4 s	N	5 m/s
4–9 s	O	5 m/s
9–16 s	N	5 m/s
16–21 s	O	10 m/s
21–27 s	S	5 m/s
27–33 s	O	5 m/s

Vorgegebener Geschwindigkeitsverlauf plus Angabe des Anfangsortes bestimmen die Bahn ebenfalls!



# ARTEN VON GESETZEN: BESCHLEUNIGUNGSGESETZ

Ein **Beschleunigungsgesetz** (kein Fachbegriff!) schreibt vor, wie ein Objekt beschleunigt: schneller werden, abbremsen, Richtungsänderungen.



Beim Auto:

Vorgabe, wie und zu welchen Zeitpunkten  
Steuerrad, Gaspedal, Bremspedal betätigt  
werden

Vorgegebener Beschleunigungsverlauf  
plus Anfangsgeschwindigkeit  
plus Anfangsort  
bestimmen die Bahn!

Alltagserfahrung sagt:

Das ist die Art und Weise, wie wir den Ablauf der Ereignisse beeinflussen!

Meine Begriffswahl	Fachbegriff	Bahn eindeutig beschrieben...
Ortsgesetz	Gleichung für Ortsfunktion	... durch Gesetz
Geschwindigkeitsgleichung	Differentialgleichung 1. Ordnung	... durch Gesetz & Anfangsort
Beschleunigungsgleichung	Differentialgleichung 2. Ordnung	... durch Gesetz, Anfangsort, Anfangsgeschwindigkeit

Allgemeine Eigenschaft von Differentialgleichungen:

Verlauf wird bestimmt durch **Differentialgleichung** und **Anfangsbedingungen**

# PHYSIKALISCHE GESETZE = DIFFERENTIALGLEICHUNGEN 2. ORDNUNG

Allgemeines Muster in der Physik:

Gesetze sind **Differentialgleichungen 2. Ordnung** (für Beschleunigungen).

**Grundaufbau** und **Gesetz** und **Anfangsbedingungen** bestimmt Verlauf.

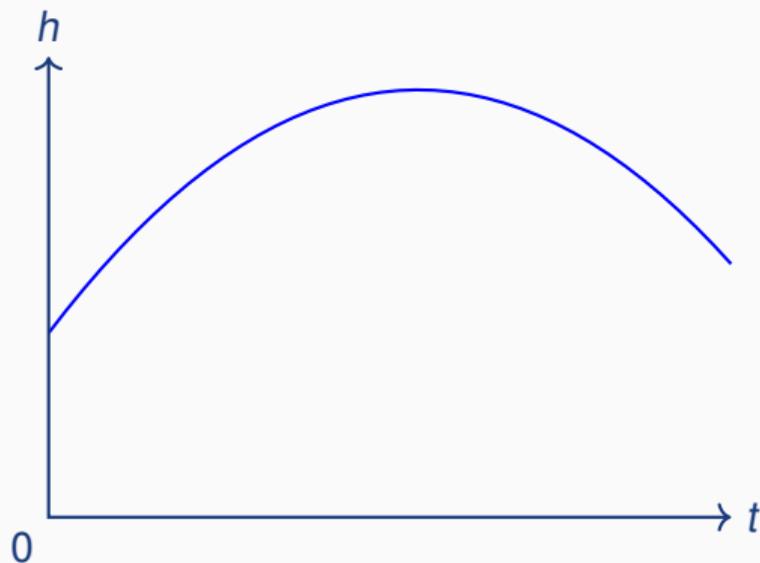


Bild: Robert Fludd, *Utriusque cosmi maioris scilicet...* (1617)

## ANFANGSBEDINGUNGEN: SPIELZEUGMODELL

Kurve  $h = h(t) = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + h_0$  (quadratische Kurve).

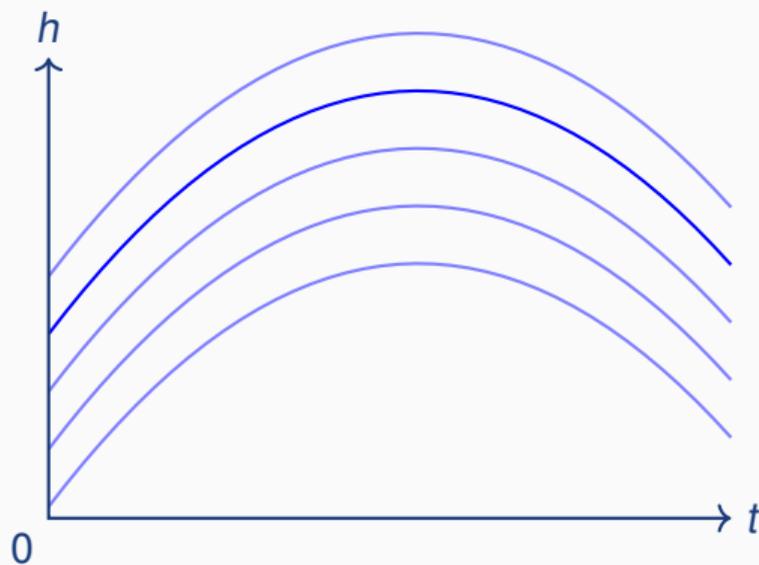
Restriktivste Möglichkeit: Ganze Kurve fest vorgegeben ( $a, v_0, h_0$  vorgegeben):



## ANFANGSBEDINGUNGEN: SPIELZEUGMODELL

Kurve  $h = h(t) = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + h_0$  (quadratische Kurve).

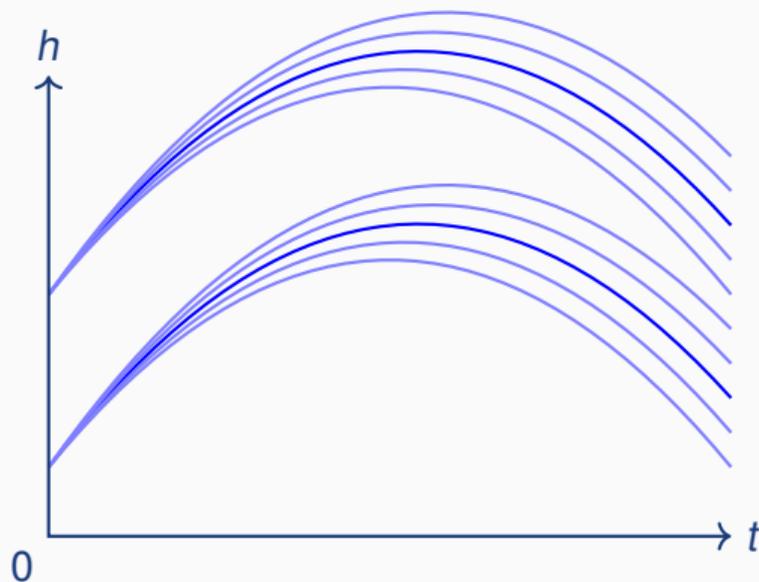
Alle Änderungsraten vorgeben ( $a, v_0$  fest):



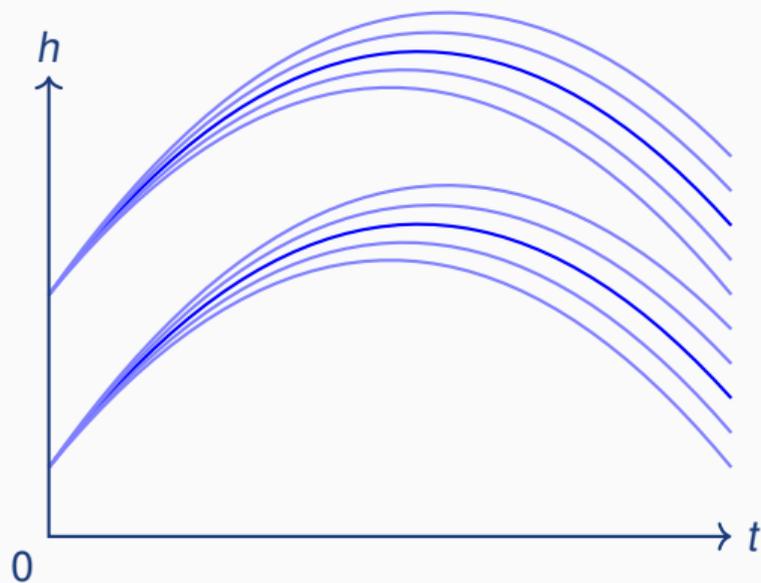
## ANFANGSBEDINGUNGEN: SPIELZEUGMODELL

Kurve  $h = h(t) = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + h_0$  (quadratische Kurve).

Nur zweite Ableitung vorgegeben ( $a$  fest):

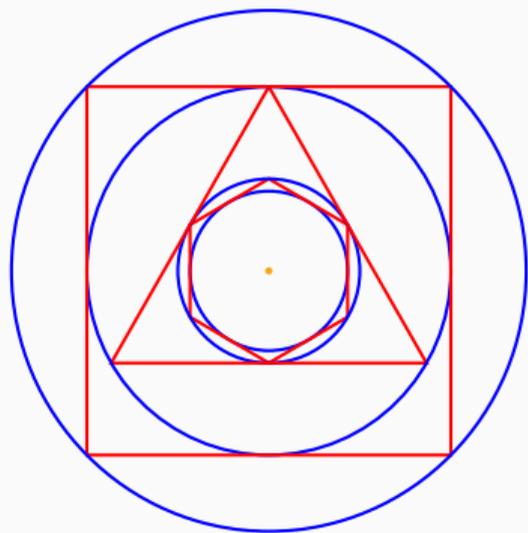


Kurve  $h(t) = -\frac{1}{2}gt^2 + v_0t + h_0$  für den freien Fall nahe der Erdoberfläche



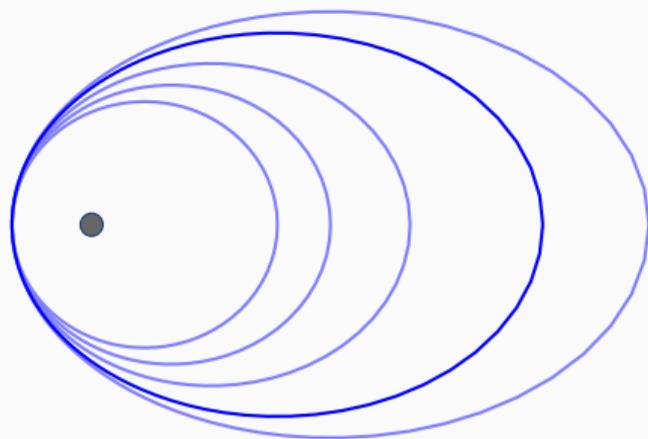
- $g = 9,81 \text{ m/s}^2$   
Gravitationsbeschleunigung)  
vorgegeben
- $v_0$  und  $h_0$  beeinflussbar = wählbar

# ANFANGSBEDINGUNGEN: PRÄ-NEWTON VS. NEWTON

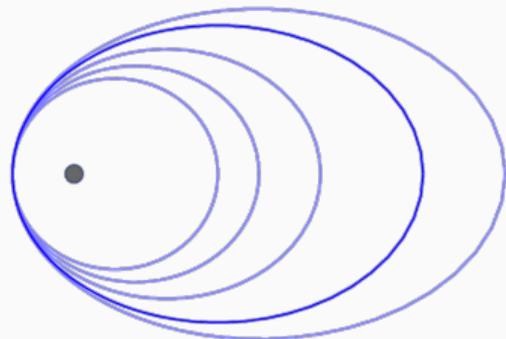
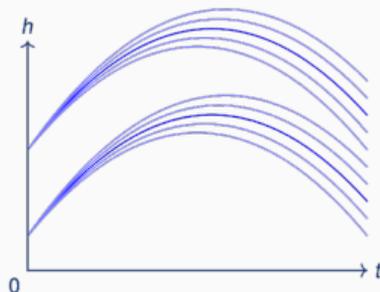
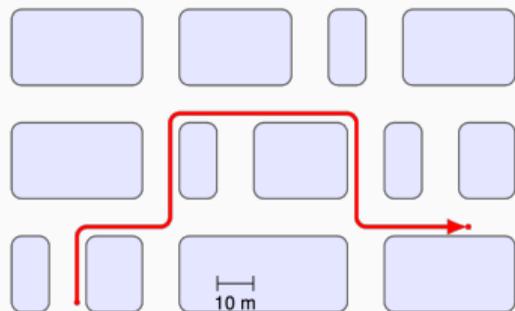


Kepler, *Mysterium Cosmographicum* (1596):  
Planetenabstände aus Geometrie

Titius-Bode: Abstände aus Formel

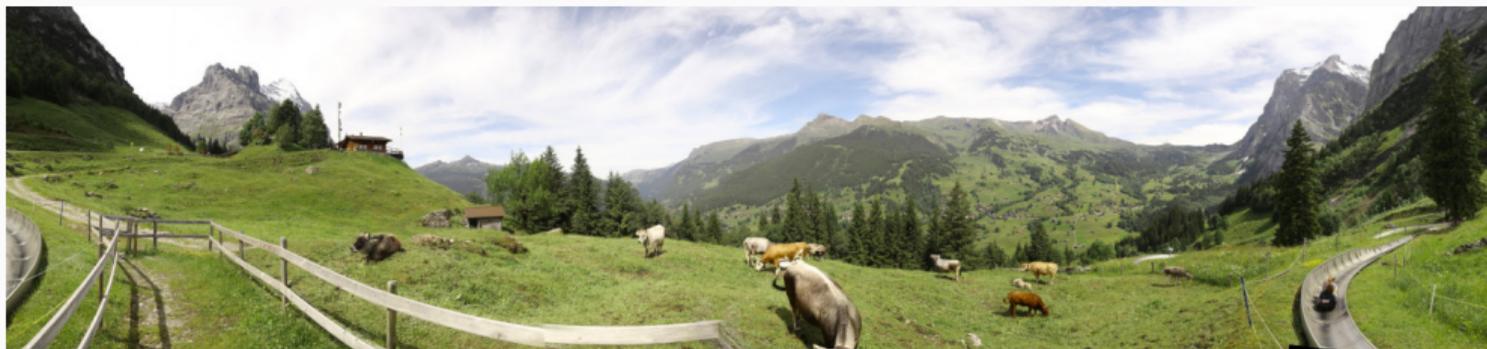


Newton: Je nach Anfangsbedingungen vieles möglich!  
**Entstehungsgeschichte** wird wichtig.



- Freiheit, Situation zu wählen und Anfangsbedingungen zu setzen, macht die Naturgesetze zu allgemein anwendbaren Gesetzen, die (viele!) Spezialfälle beschreiben!
- Differenzialgleichungen zweiter Ordnung (Beschleunigungen vorgegeben) sind in der Physik die Norm
- Physik von Feldern (Gravitationsfeld etc.): außer den Zeitableitungen spielen auch räumliche Ableitungen (wie ändert sich eine Eigenschaft von Ort zu Ort?) eine Rolle

# ANWENDUNGSBEISPIEL: DIE ERDE IST IDEAL FÜR MENSCHLICHES LEBEN GEEIGNET!



- Menschen können nur in einem bestimmten Temperaturbereich leben; auf der Erde sind solche Temperaturen vorhanden! (Noch.)
- Menschen brauchen Schlaf — die Erde bietet Tag und Nacht!
- Menschen brauchen Sauerstoff — in der Erdatmosphäre reichlich vorhanden!

Erklärung früher: **Vorsehung**

„Was für ein Glück, dass wir ausgerechnet auf der Erde leben und nicht z.B. auf Mars!“

- Vielfalt von Planetensystemen — allein in Milchstraße ca. 200 Mia.
- Abschätzbar (unsicher) wieviele Planeten im Prinzip habitabel sind (flüssiges Wasser)
- Leben entsteht aus Chemie, durchläuft Evolution
- Anthropisches Argument: Beobachter per Definition auf lebensfreundlichen Planeten



Bild: NASA, "Blue Marble"

- Von direkten Erklärungen des Ist-Zustandes zu Differentialgleichungen
- irdische und Himmelsmechanik einheitlich beschrieben
- Wechselwirkungen im Sonnensystem wichtig für die Vorhersagen

## Wie weiter?

- Vielfalt durch Vergleich mit anderen Systemen  $\Rightarrow$  Exoplaneten 31.10.
- Entstehungsgeschichte wird wichtig  $\Rightarrow$  ab 7.11.