

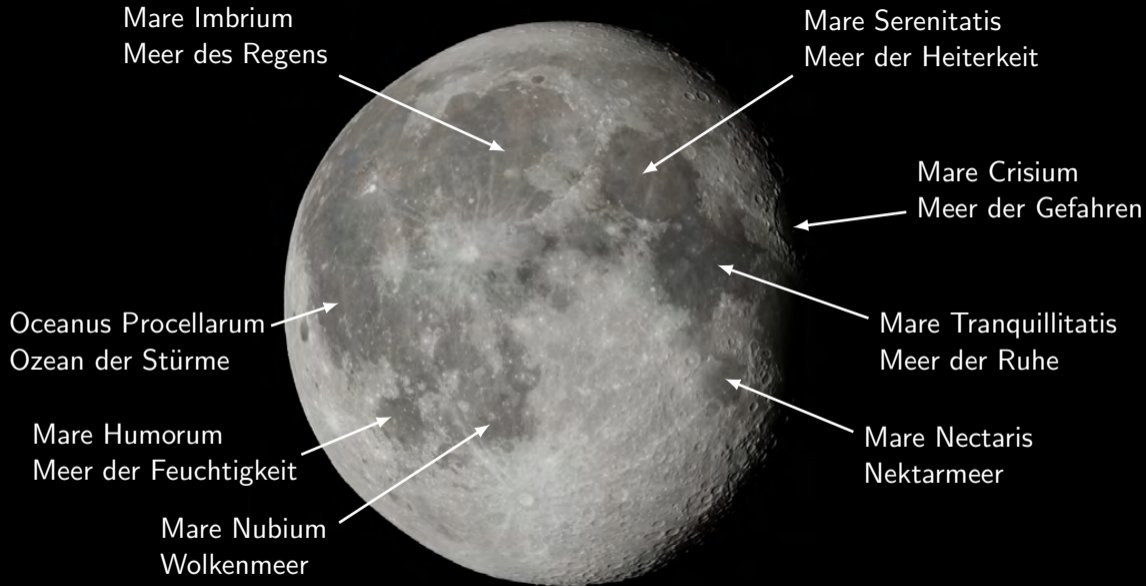
The background features a bright, glowing sun in the lower right quadrant, with rays extending across the frame. Overlaid on this is a circular arrangement of white text that reads "PHYSIK AM FREITAG". The text is partially obscured by the sun and other elements.

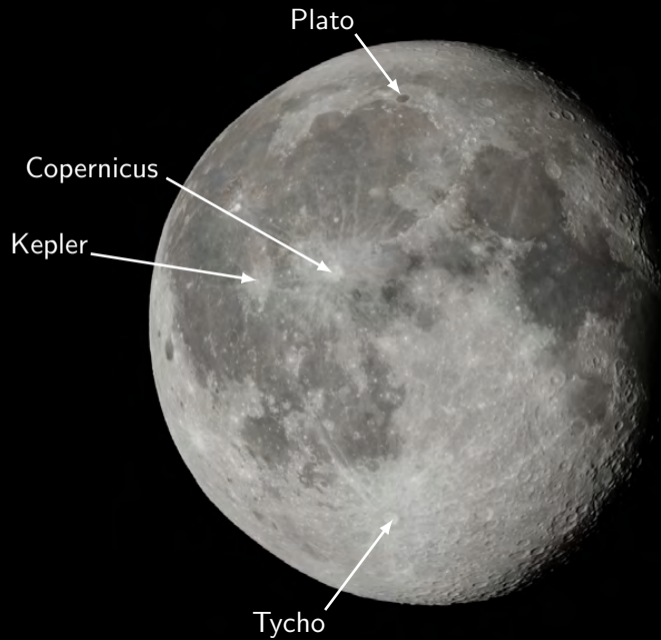
Mit der Gravitationsbrille ins Innere von Himmelskörpern blicken

Daniel Arnold
Astronomisches Institut
Universität Bern (AIUB)

6. Mai 2022





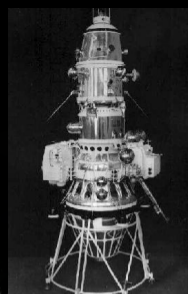


Plato

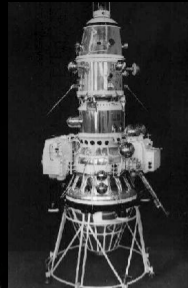
Copernicus

Kepler

Tycho



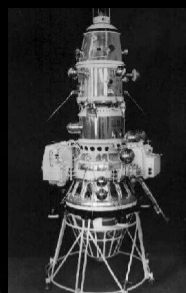
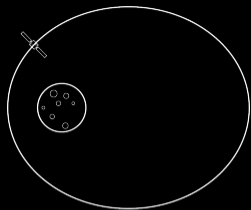
Luna 10 (1966)



Luna 10 (1966)



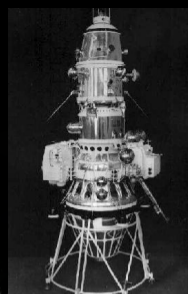
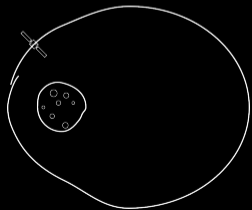
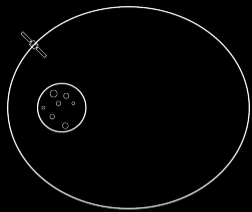
Lunar Orbiter (1966-1967)



Luna 10 (1966)



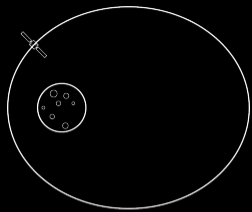
Lunar Orbiter (1966-1967)



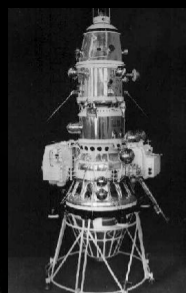
Luna 10 (1966)



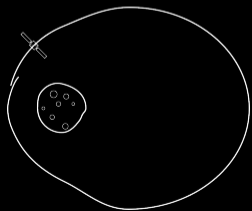
Lunar Orbiter (1966-1967)



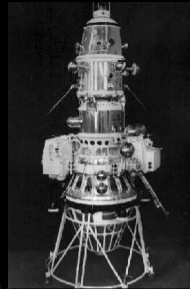
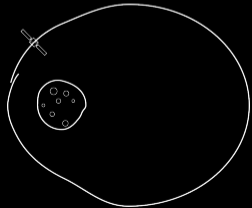
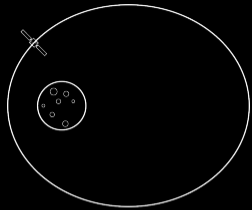
“Mascons” = Mass concentrations



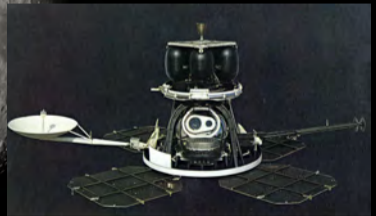
Luna 10 (1966)



Lunar Orbiter (1966-1967)



Luna 10 (1966)



Lunar Orbiter (1966-1967)

Schwerebeschleunigung messen



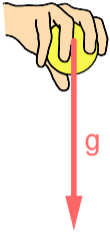
Schwerebeschleunigung messen



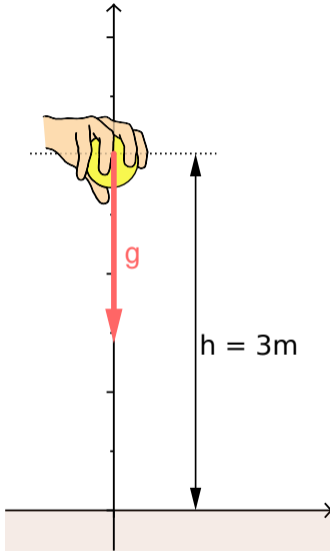
Schwerebeschleunigung messen



Schwerebeschleunigung messen



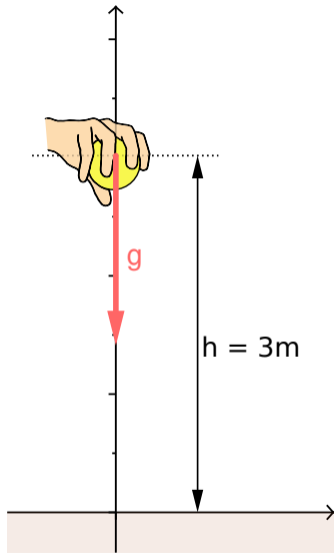
Schwerebeschleunigung messen



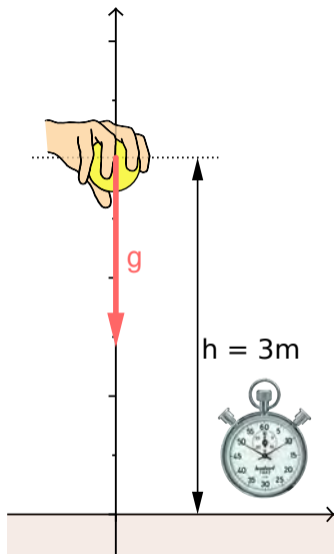
Schwerebeschleunigung messen

Konstante Fallbeschleunigung g :

$$s = \frac{1}{2}gt^2$$



Schwerebeschleunigung messen



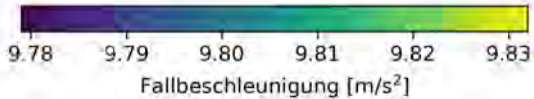
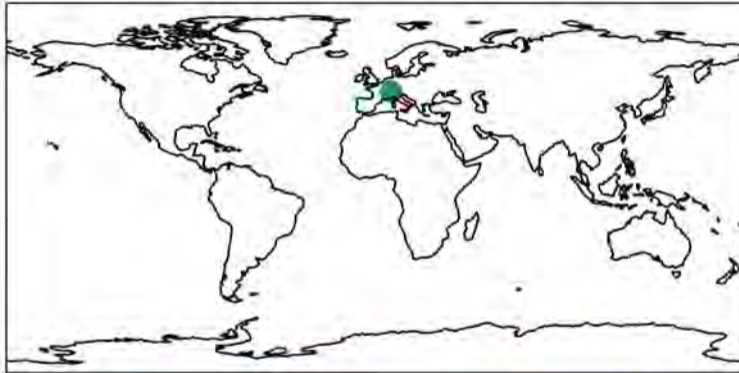
Konstante Fallbeschleunigung g :

$$s = \frac{1}{2}gt^2$$

$$g = \frac{2s}{t^2} = \frac{2h}{t^2}$$

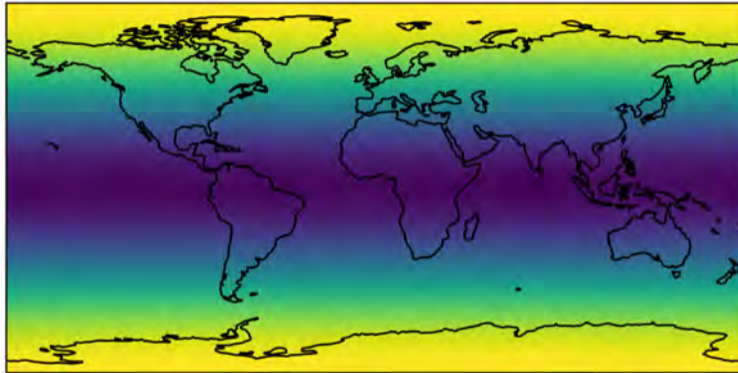
Schwerebeschleunigungen

Messwert in Bern:



Schwerebeschleunigungen

Messwerte überall:



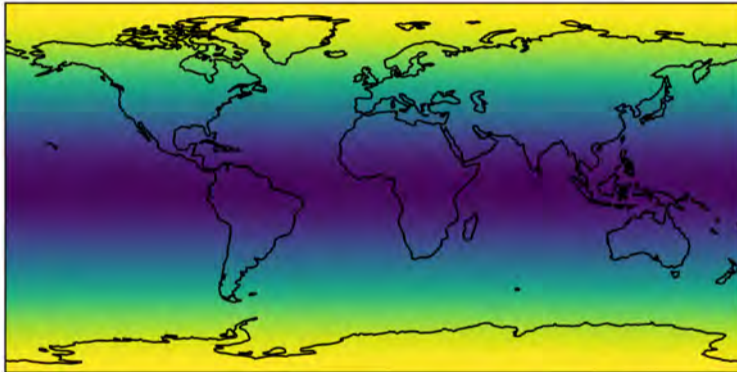
Min. 9.778 m/s²
Max. 9.832 m/s²



Fallbeschleunigung [m/s²]

Schwerebeschleunigungen

Messwerte überall:



Min. 9.778 m/s²

Max. 9.832 m/s²

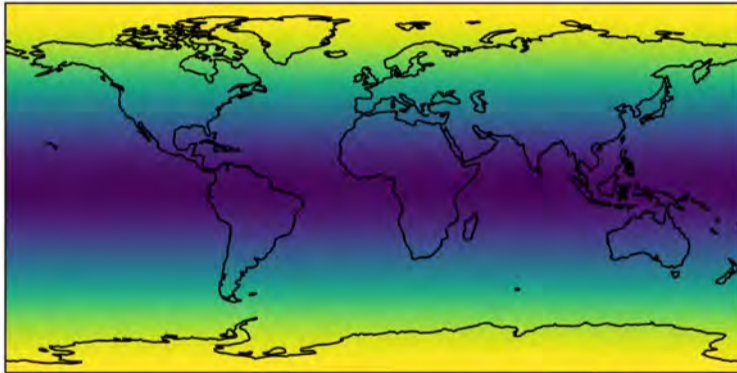
“Schwerefeld”



Fallbeschleunigung [m/s²]

Schwerebeschleunigungen

Messwerte überall:



Fallbeschleunigung [m/s²]

Min. 9.778 m/s²

Max. 9.832 m/s²

“Schwerefeld”

Standardwert **9.81 m/s²**:
45° geografische Breite
und Meereshöhe

Zentrifugalbeschleunigung



Äquatorradius der Erde: $R_E = 6378 \text{ km}$

Zentrifugalbeschleunigung



Äquatorradius der Erde: $R_E = 6378 \text{ km}$

Rotationsgeschwindigkeit am Äquator:

$$v \approx \frac{2\pi R_E}{24 \text{ h}} = 1670 \text{ km/h}$$

Zentrifugalbeschleunigung



Äquatorradius der Erde: $R_E = 6378 \text{ km}$

Rotationsgeschwindigkeit am Äquator:

$$v \approx \frac{2\pi R_E}{24 \text{ h}} = 1670 \text{ km/h}$$

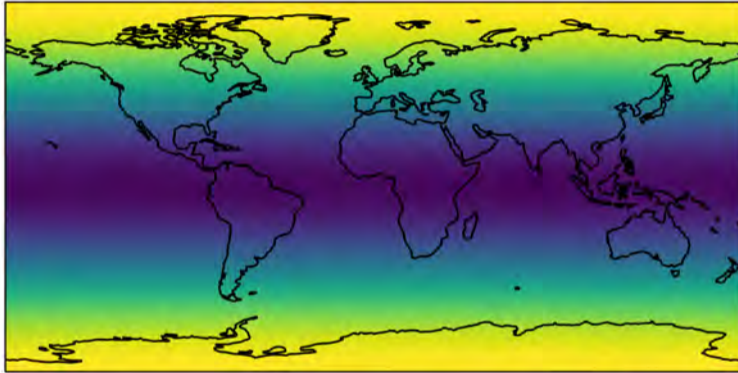
Ein Mensch auf einer Waage:

Am Nordpol: 80.0 kg

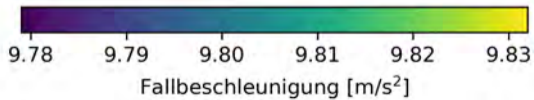
Am Äquator: 79.6 kg

Schwerebeschleunigungen

Messwerte überall:

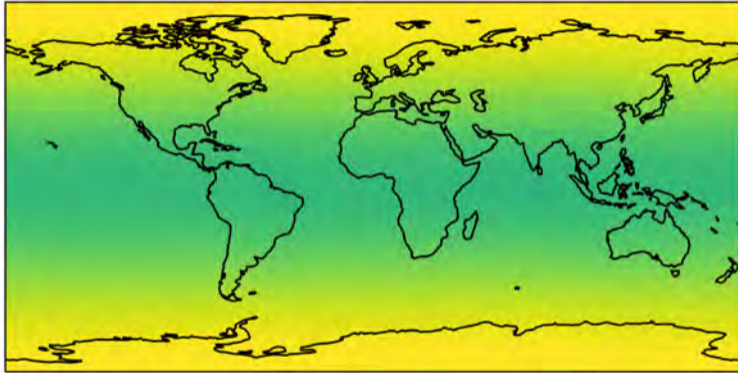


Min. 9.778 m/s²
Max. 9.832 m/s²

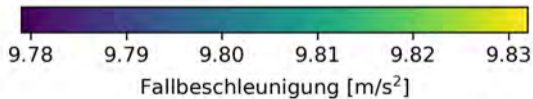


Schwerebeschleunigungen

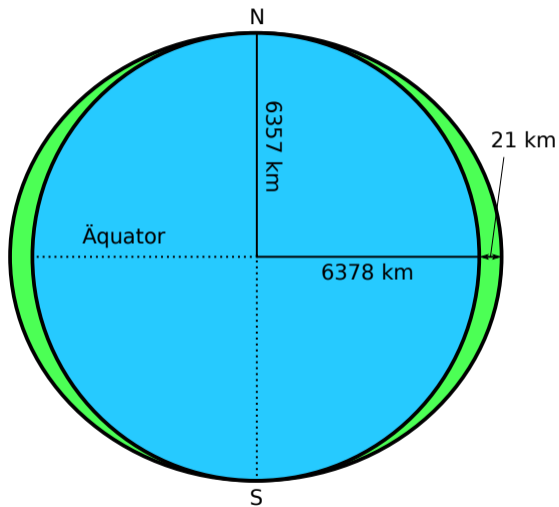
Messwerte überall, ohne Zentrifugalbeschleunigung:



Min. 9.812 m/s²
Max. 9.833 m/s²



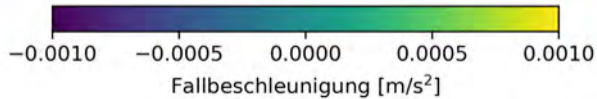
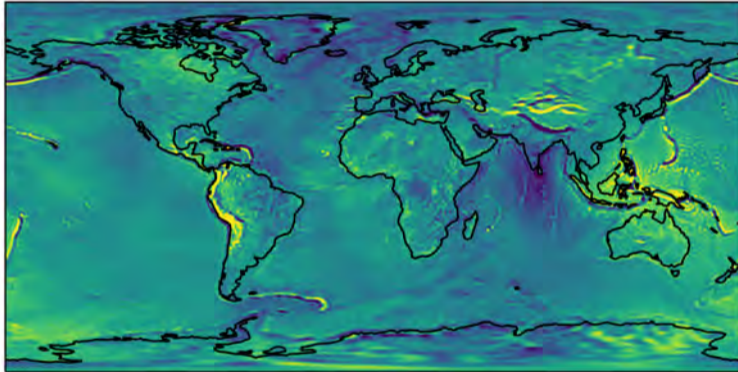
Abplattung der Erde



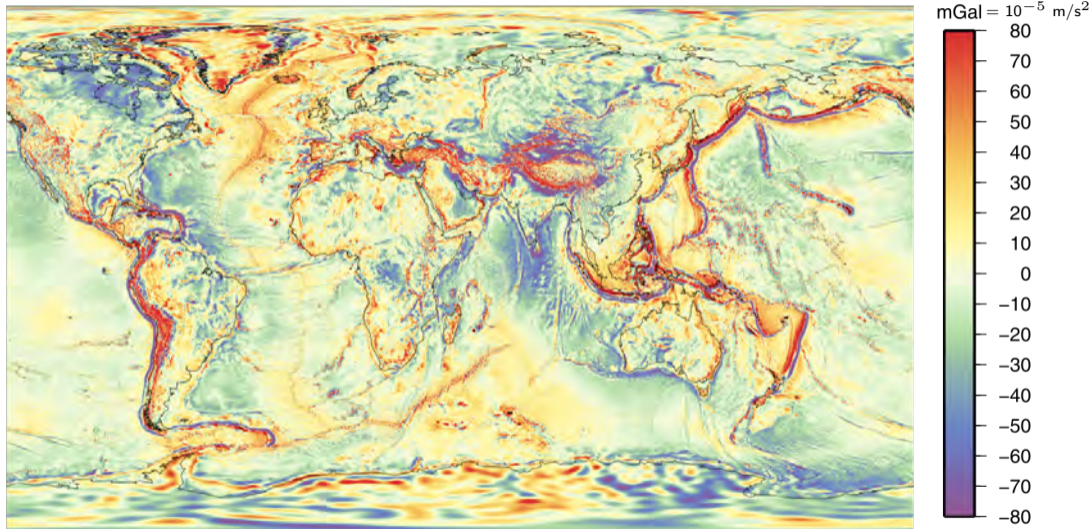
- Die Erde ist in erster Näherung ein **abgeplattetes Rotationsellipsoid**
- Normalschwere: 99.9995 % der gesamten Schwere

Abweichungen von der Normalschwere

Messwerte ohne Zentrifugalbeschleunigung und abzüglich Normalschwere:

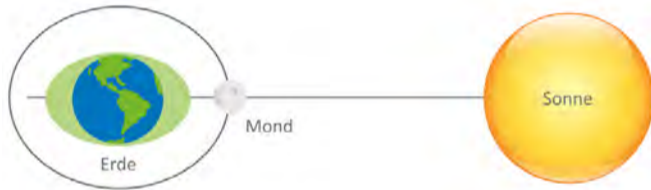


Abweichungen von der Normalschwere



Gezeiten

Das Erdschwerefeld ist nicht statisch.



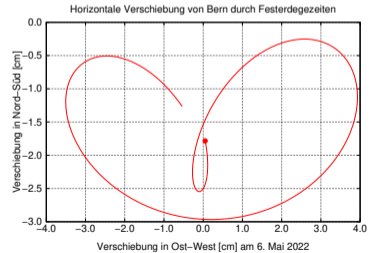
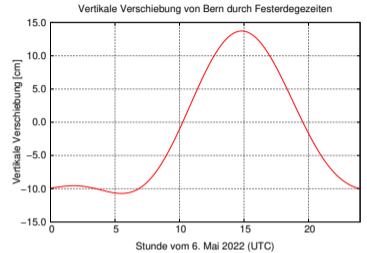
Gezeiten

Das Erdschwerefeld ist nicht statisch.



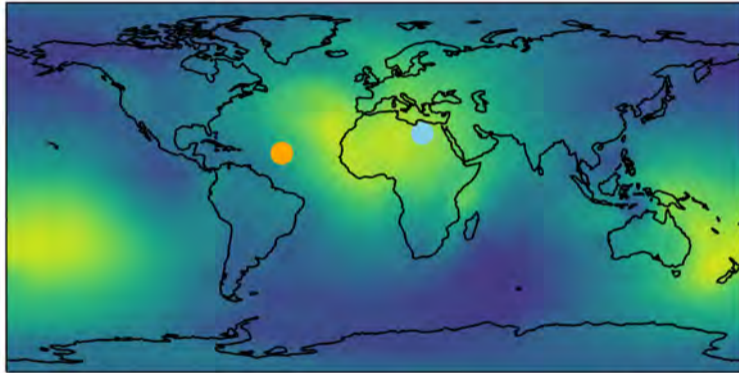
Gezeiten

Das Erdschwerefeld ist nicht statisch.

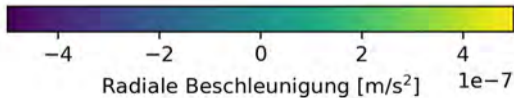


Gezeiten

Durch Gezeiten verursachte Änderungen der Fallbeschleunigung in radialer Richtung:



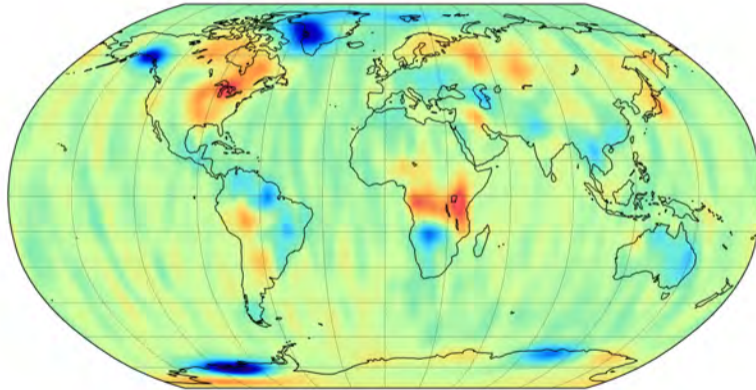
6. Mai 2022
15:00 UTC (17:00 MESZ)



Andere zeitliche Änderungen

Differenzen von monatlichen Schnappschüssen des Erdschwerefeldes gegenüber dem Feld vom 1. Januar 2017:

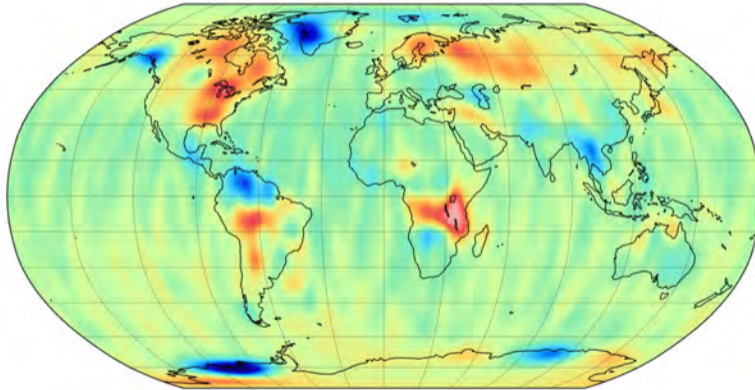
Jan 2020



Andere zeitliche Änderungen

Differenzen von monatlichen Schnappschüssen des Erdschwerefeldes gegenüber dem Feld vom 1. Januar 2017:

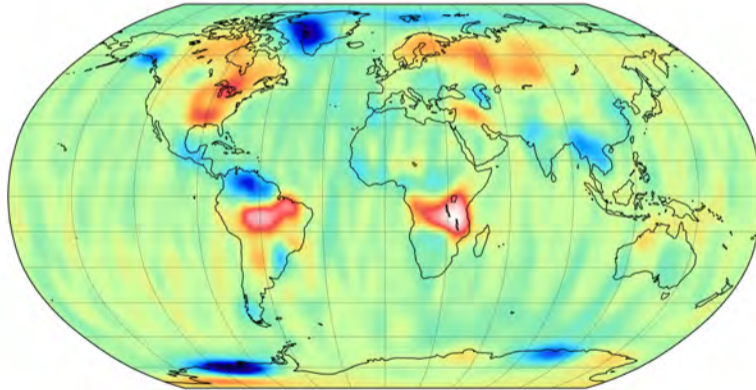
Feb 2020



Andere zeitliche Änderungen

Differenzen von monatlichen Schnappschüssen des Erdschwerefeldes gegenüber dem Feld vom 1. Januar 2017:

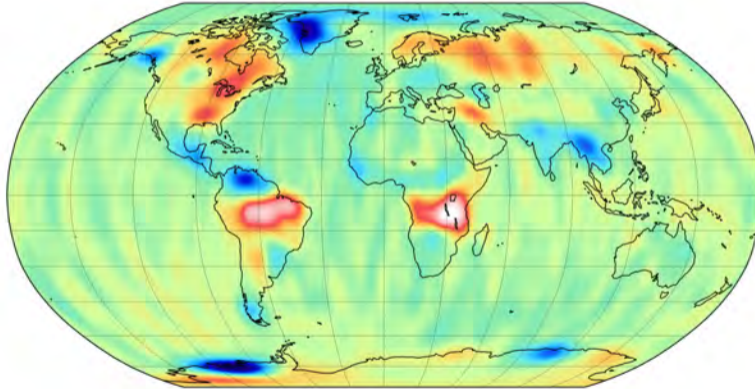
Mär 2020



Andere zeitliche Änderungen

Differenzen von monatlichen Schnappschüssen des Erdschwerefeldes gegenüber dem Feld vom 1. Januar 2017:

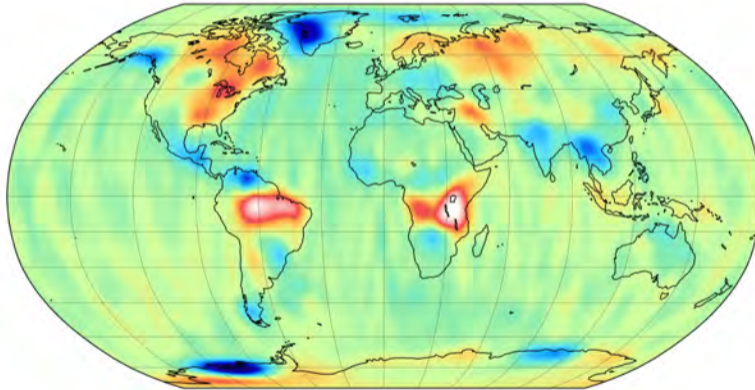
Apr 2020



Andere zeitliche Änderungen

Differenzen von monatlichen Schnappschüssen des Erdschwerefeldes gegenüber dem Feld vom 1. Januar 2017:

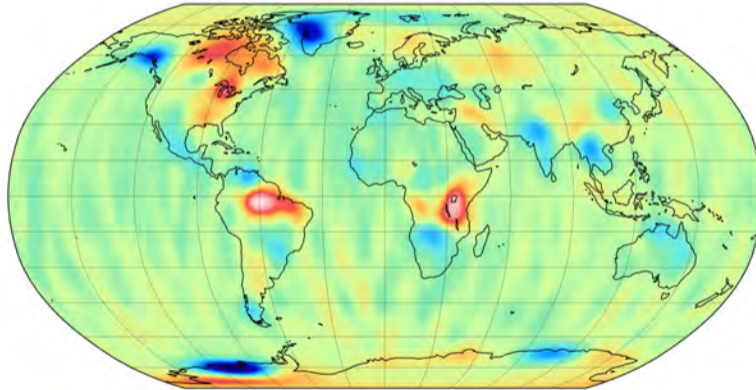
Mai 2020



Andere zeitliche Änderungen

Differenzen von monatlichen Schnappschüssen des Erdschwerefeldes gegenüber dem Feld vom 1. Januar 2017:

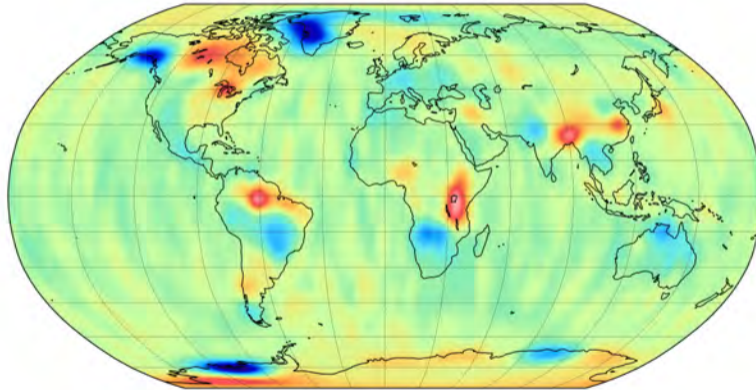
Jun 2020



Andere zeitliche Änderungen

Differenzen von monatlichen Schnappschüssen des Erdschwerefeldes gegenüber dem Feld vom 1. Januar 2017:

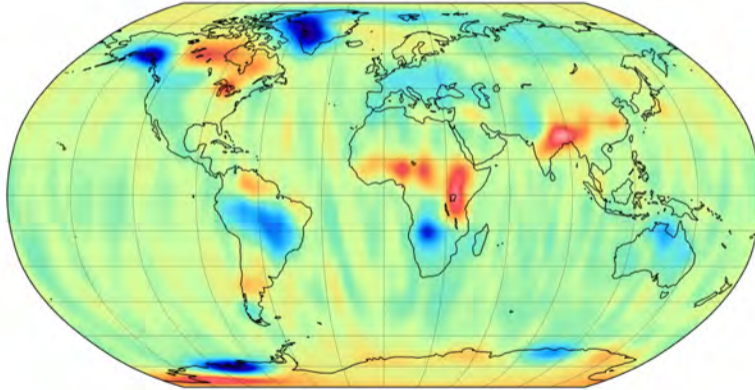
Jul 2020



Andere zeitliche Änderungen

Differenzen von monatlichen Schnappschüssen des Erdschwerefeldes gegenüber dem Feld vom 1. Januar 2017:

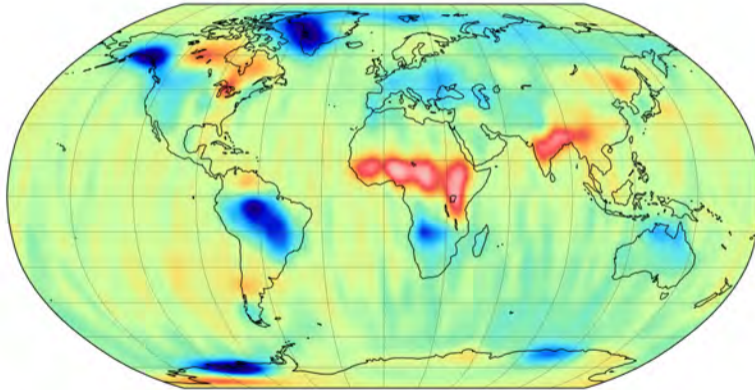
Aug 2020



Andere zeitliche Änderungen

Differenzen von monatlichen Schnappschüssen des Erdschwerefeldes gegenüber dem Feld vom 1. Januar 2017:

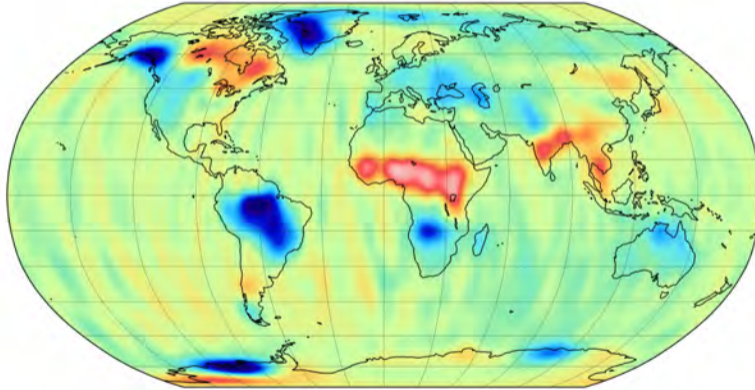
Sep 2020



Andere zeitliche Änderungen

Differenzen von monatlichen Schnappschüssen des Erdschwerefeldes gegenüber dem Feld vom 1. Januar 2017:

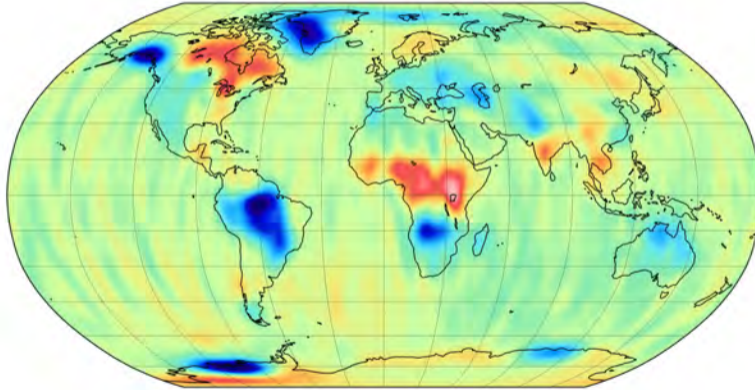
Okt 2020



Andere zeitliche Änderungen

Differenzen von monatlichen Schnappschüssen des Erdschwerefeldes gegenüber dem Feld vom 1. Januar 2017:

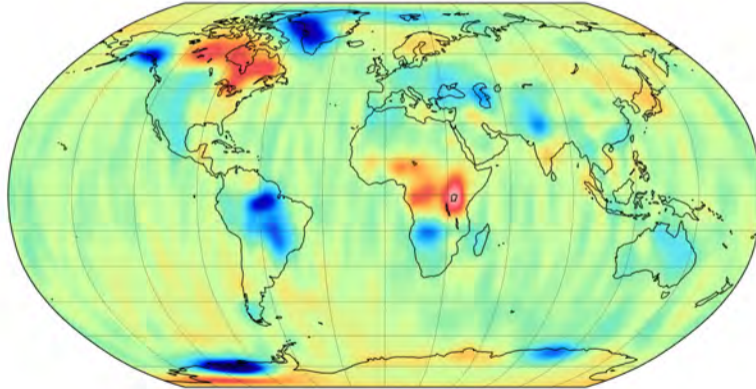
Nov 2020



Andere zeitliche Änderungen

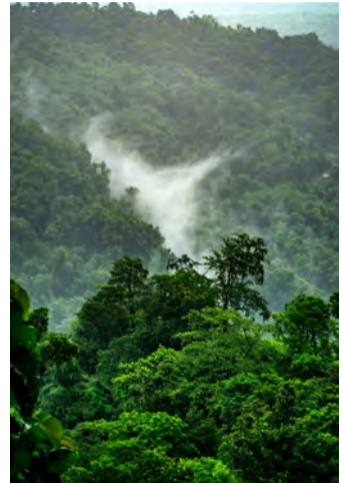
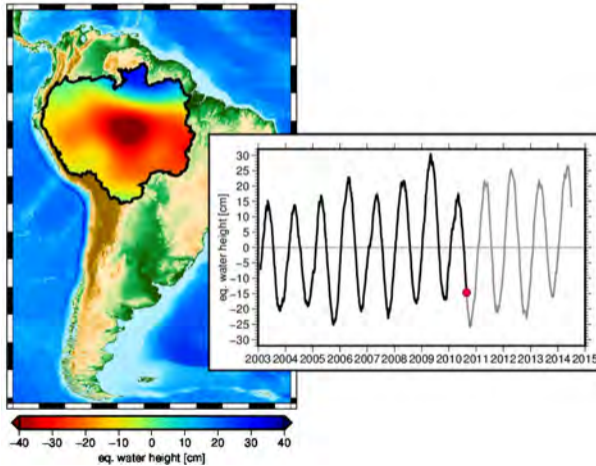
Differenzen von monatlichen Schnappschüssen des Erdschwerefeldes gegenüber dem Feld vom 1. Januar 2017:

Dez 2020



Andere zeitliche Änderungen

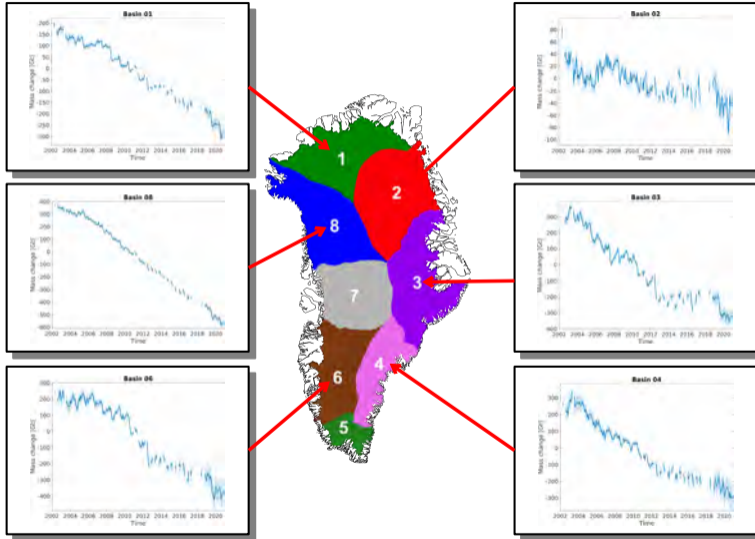
Saisonaler Wasserzyklus im Amazonas-Becken verursacht lokale Änderungen in der Schwerkraft



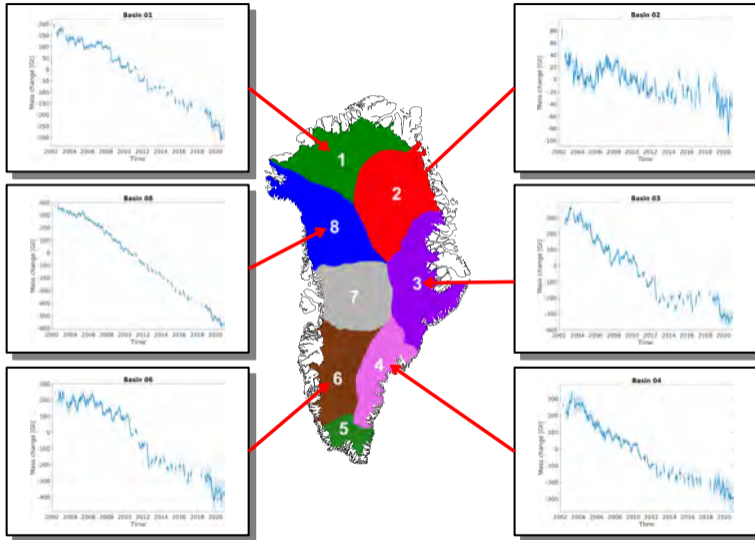
Andere zeitliche Änderungen



Andere zeitliche Änderungen

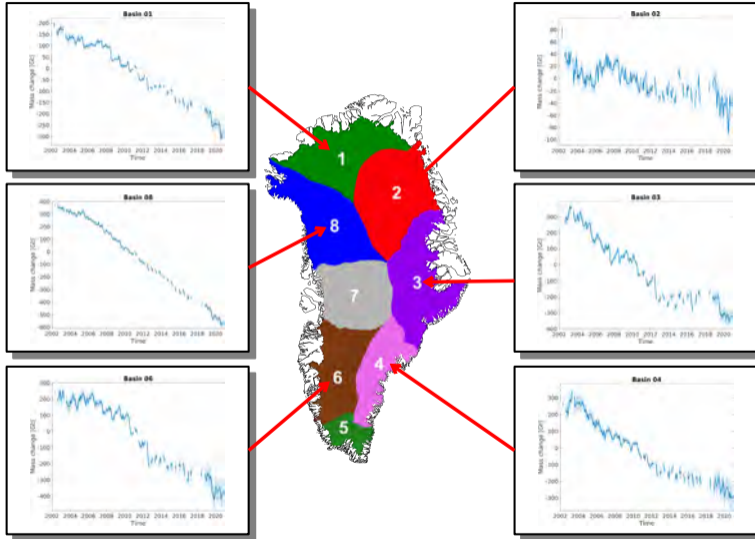


Andere zeitliche Änderungen



Eismassenverlust auf Grönland zwischen 2002 und 2020 (linearer Fit):
ca. 280 Gt/Jahr!

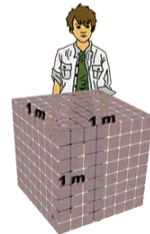
Andere zeitliche Änderungen



Eismassenverlust auf Grönland zwischen 2002 und 2020 (linearer Fit):

ca. 280 Gt/Jahr!

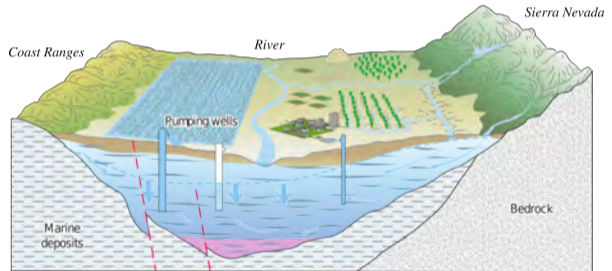
Das sind ca. 10'000 Würfel von 1 m³ pro Sekunde



Andere zeitliche Änderungen



Quantifizierung von Verlust von Grundwasser in Kalifornien durch Schwerefeldmessungen



Aber wie denn nun?



Absolutes Gravimeter

Aber wie denn nun?



Absolutes Gravimeter



Aus Newtons "De mundi systemate liber" (1728)

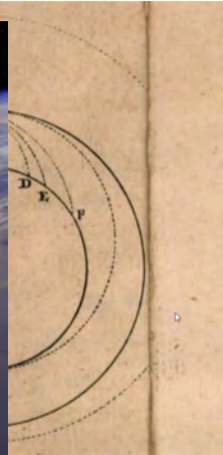
Aber wie denn nun?



Absolutes Gravimeter



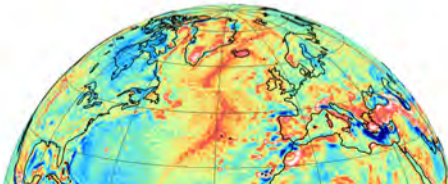
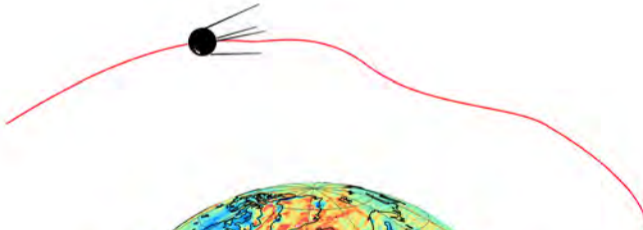
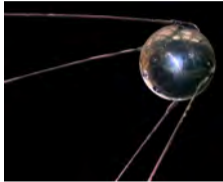
GRACE (1720)



Keplermundi systemate

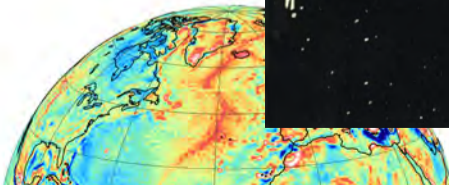
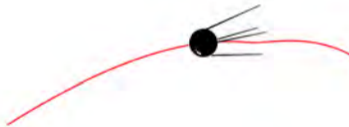
Bahn- und Schwerfeldbestimmung

Sputnik (4. Oktober 1957)

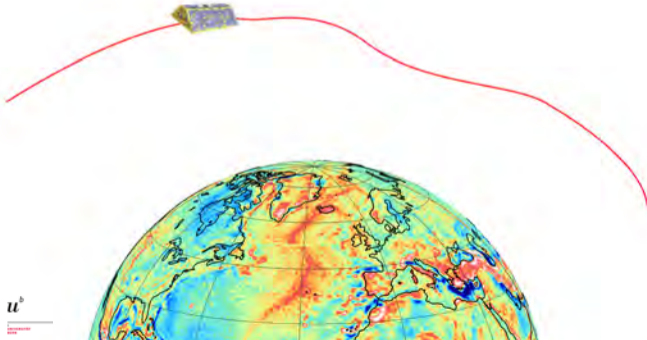


Bahn- und Schwerfeldbestimmung

Sputnik (4. Oktober 1957)

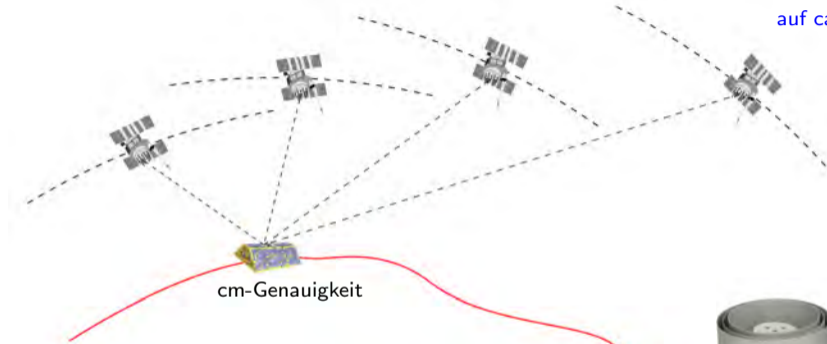


Bahn- und Schwerefeldbestimmung



Bahn- und Schwerfeldbestimmung

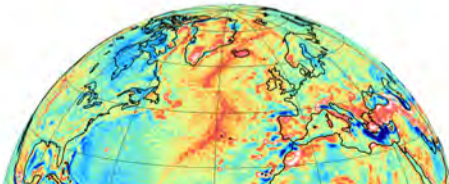
GNSS: "Globales Navigationssatellitensystem" (z.B. GPS, Galileo)
auf ca. 20'000 km Höhe



cm-Genauigkeit

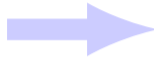


GNSS-Antenne und -Empfänger auf
tieffliegendem (200-2'000 km) Satelliten



Bahn- und Schwerefeldbestimmung

- Physikalische Kräftemodelle
(gravitativ + nicht-gravitativ)
- Bewegungsgleichungen
 $m\ddot{\vec{r}} = \vec{F}(t, \vec{r}, \dots)$
- Startwerte für Schwerefeld

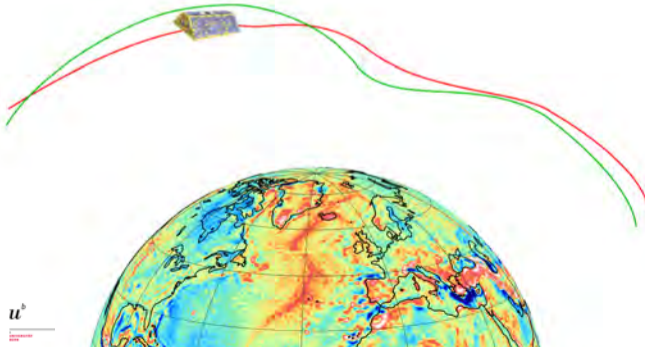


Berechnete Bahn

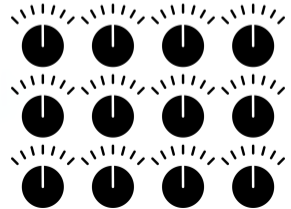


Vergleich

Beobachtete Bahn

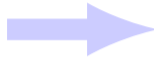


Stellschrauben Schwerefeld



Bahn- und Schwerefeldbestimmung

- Physikalische Kräftemodelle (gravitativ + nicht-gravitativ)
- Bewegungsgleichungen
 $m\ddot{\vec{r}} = \vec{F}(t, \vec{r}, \dots)$
- Startwerte für Schwerefeld

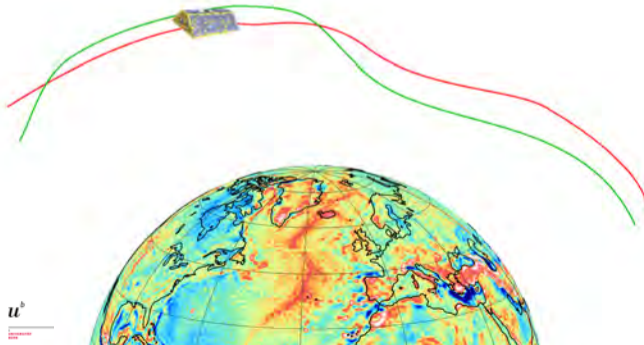


Berechnete Bahn

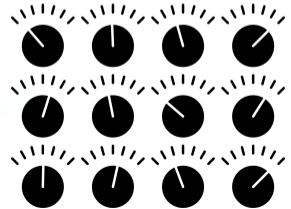


Vergleich

Beobachtete Bahn

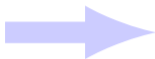


Stellschrauben Schwerefeld



Bahn- und Schwerefeldbestimmung

- Physikalische Kräftemodelle (gravitativ + nicht-gravitativ)
- Bewegungsgleichungen
 $m\ddot{\vec{r}} = \vec{F}(t, \vec{r}, \dots)$
- Startwerte für Schwerefeld

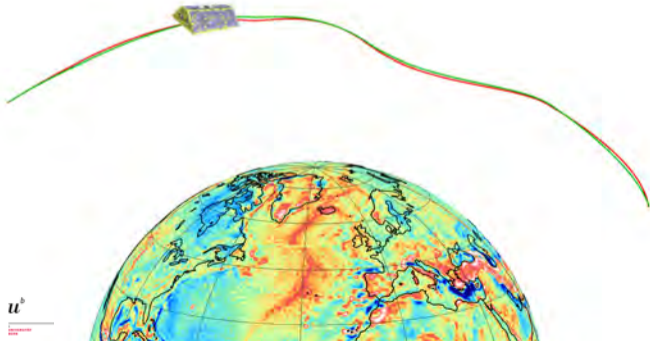


Berechnete Bahn

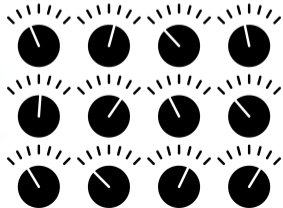


Vergleich

Beobachtete Bahn



Stellschrauben Schwerefeld

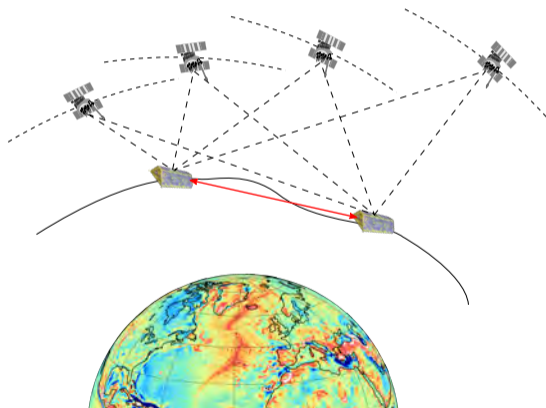
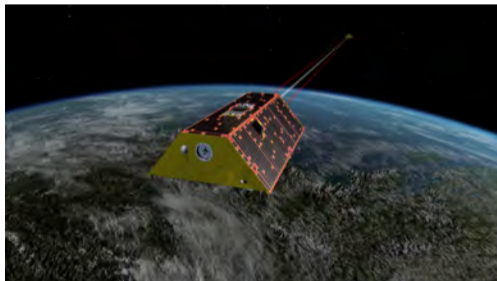


Schwerefeldmissionen: GRACE / GRACE-FO

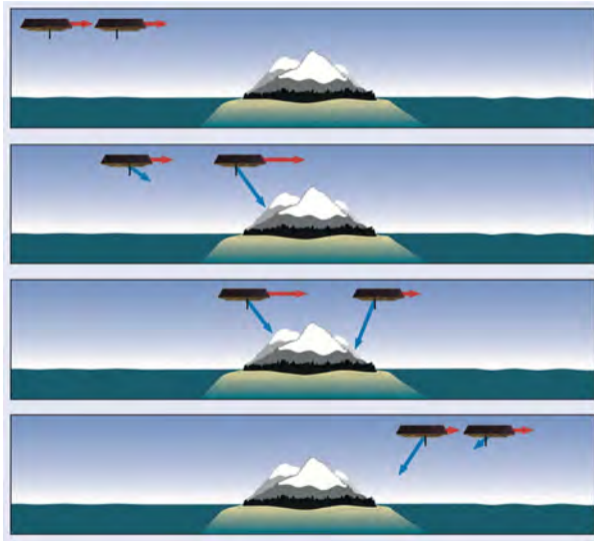
GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment): 2002-2017

GRACE-Follow On: seit 2018

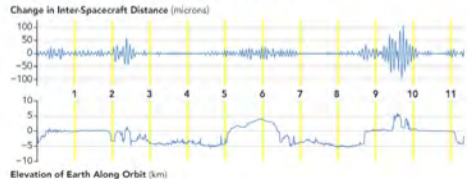
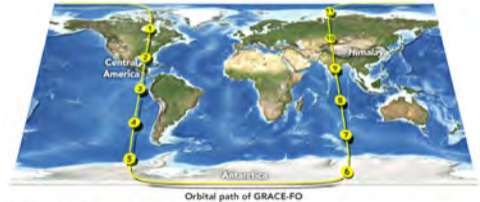
NASA & DLR



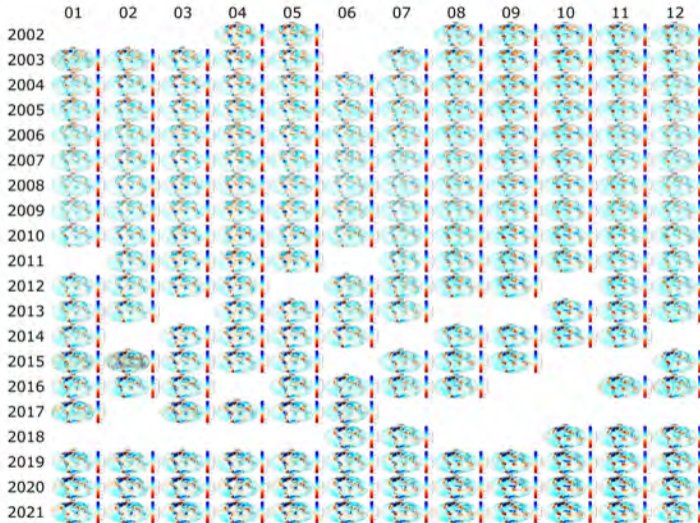
Schwerefeldmissionen: GRACE / GRACE-FO



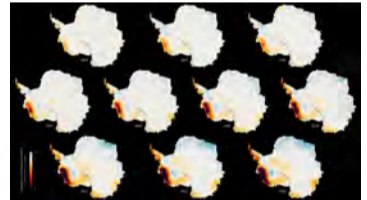
- Distanz etwa 220 km
- Wird als zusätzliche Observable hochgenau vermessen:
 - Mikrowellen-Link: μm
 - Laser-Link (GRACE-FO): nm



Schwerfeldmissionen: GRACE / GRACE-FO



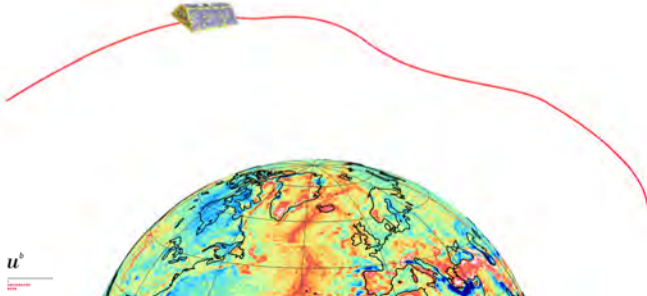
GRACE hat die Vermessung des zeitvariablen Erdschwerfeldes revolutioniert



Mittels GRACE gemessener Eismassenverlust in der Antarktis

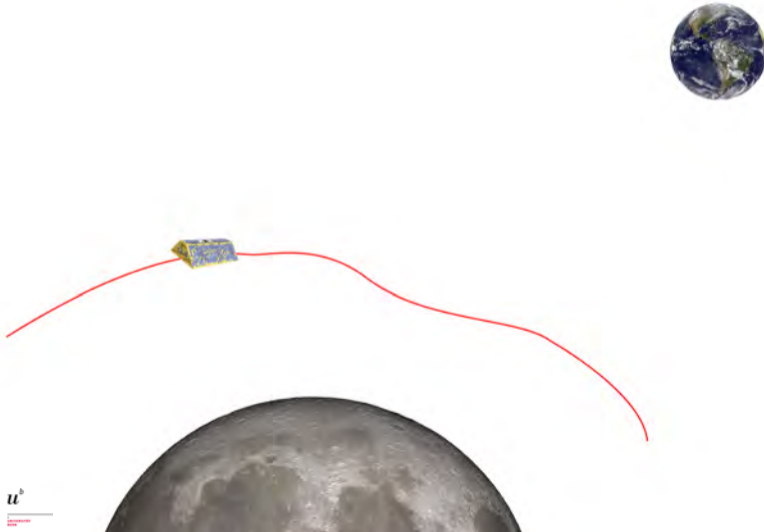
Zurück zum Mond

(Noch) kein GPS auf dem Mond. Was tun?



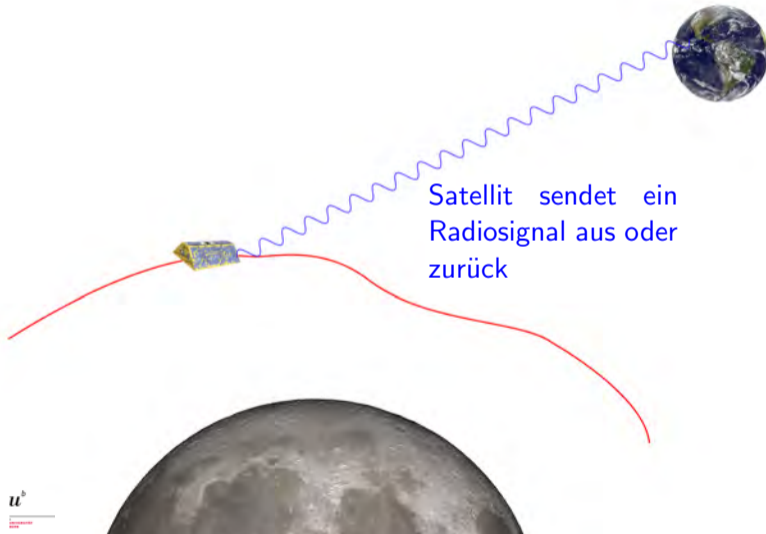
Zurück zum Mond

(Noch) kein GPS auf dem Mond. Was tun?



Zurück zum Mond

(Noch) kein GPS auf dem Mond. Was tun?



Bodenstationen

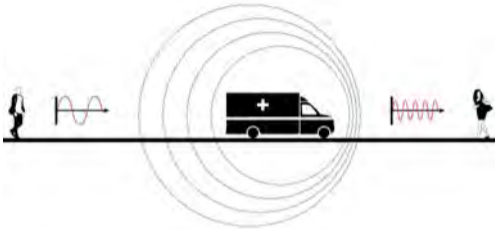


NASA Deep Space Network (DSN)
Hier: Goldstone, Kalifornien



ESA Tracking Station Network (ESTRACK)
Hier: Cebreros, Spanien

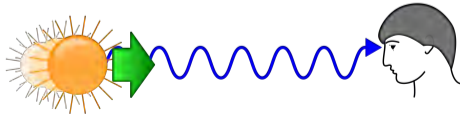
Dopplerverschiebung



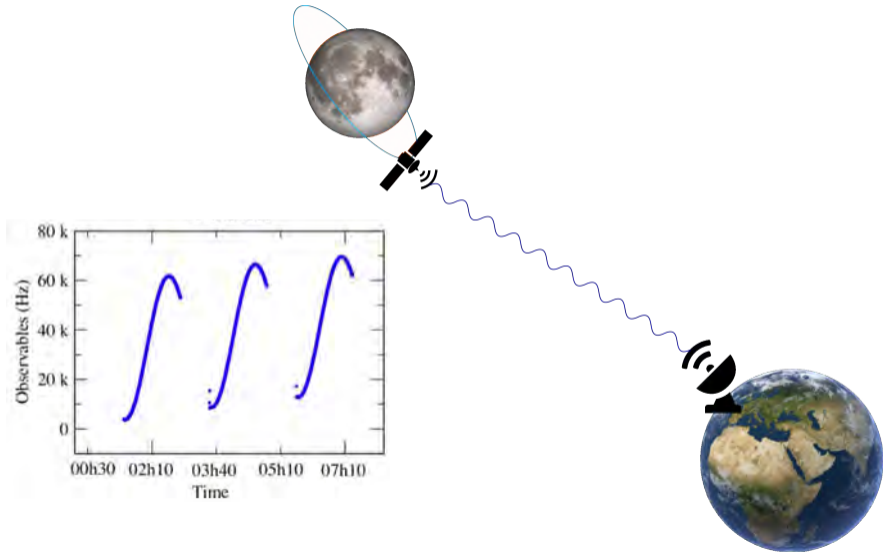
Doppler-Verschiebung von
Schallwellen



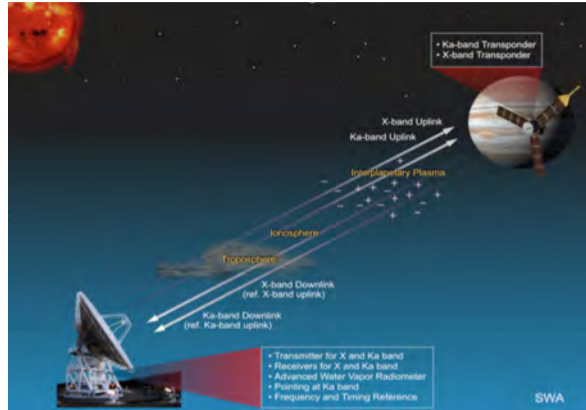
Doppler-Verschiebung von
elektromagnetischen Wellen



Dopplerverschiebung

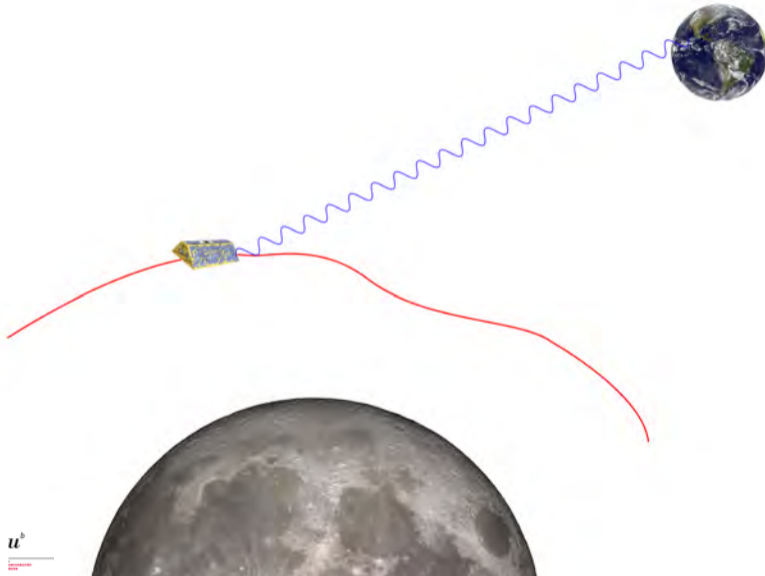


Signalausbreitung



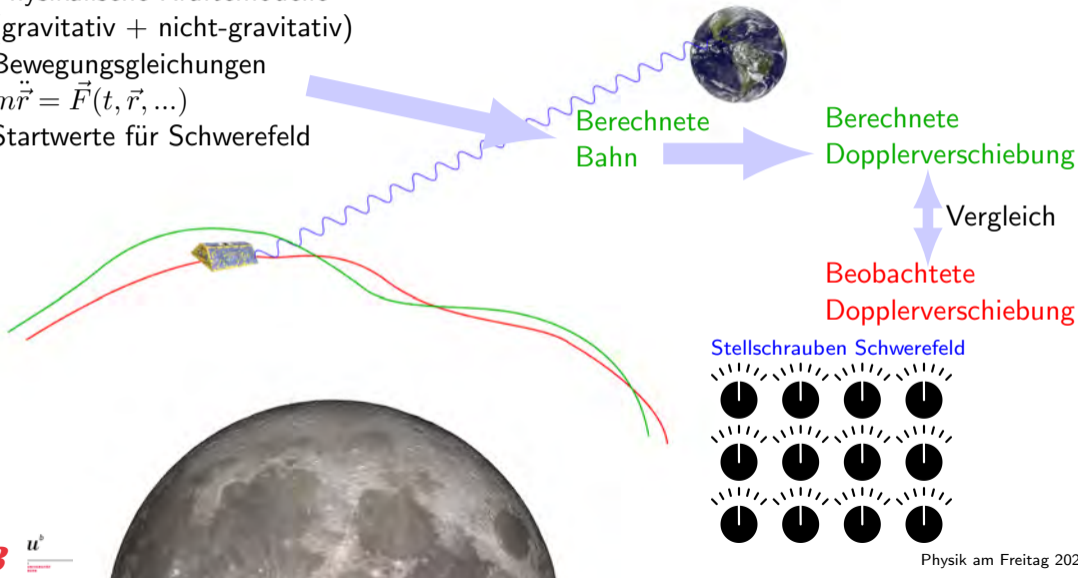
- Relativistische Korrekturen zur Berechnung der Signallaufzeit nötig
- Signalausbreitung wird durch diverse Medien beeinflusst

Bahn- und Schwerfeldbestimmung



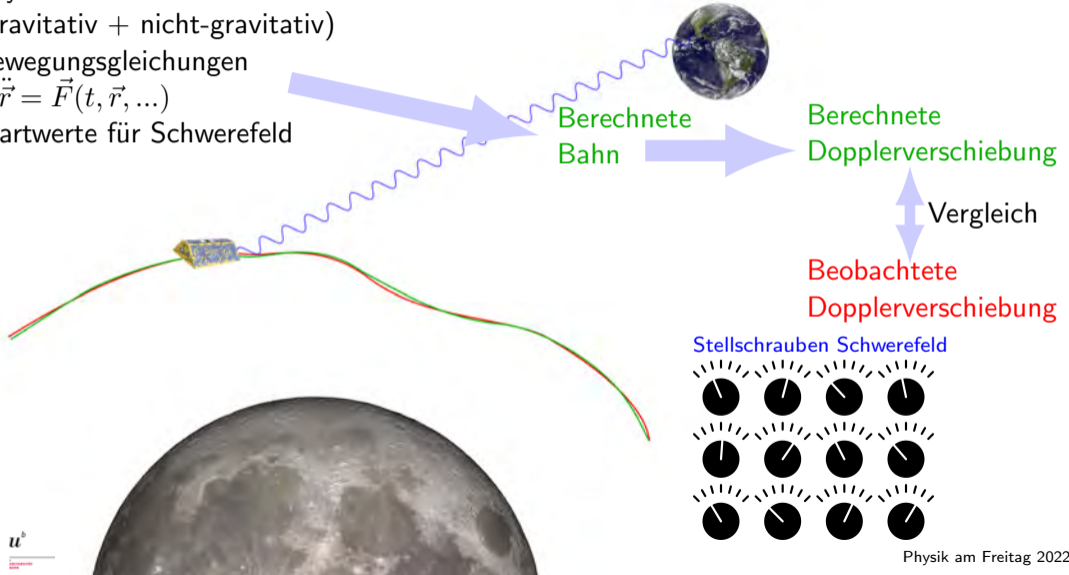
Bahn- und Schwerfeldbestimmung

- Physikalische Kräftemodelle (gravitativ + nicht-gravitativ)
- Bewegungsgleichungen $m\ddot{\vec{r}} = \vec{F}(t, \vec{r}, \dots)$
- Startwerte für Schwerfeld



Bahn- und Schwerfeldbestimmung

- Physikalische Kräftemodelle (gravitativ + nicht-gravitativ)
- Bewegungsgleichungen
 $m\ddot{\vec{r}} = \vec{F}(t, \vec{r}, \dots)$
- Startwerte für Schwerfeld

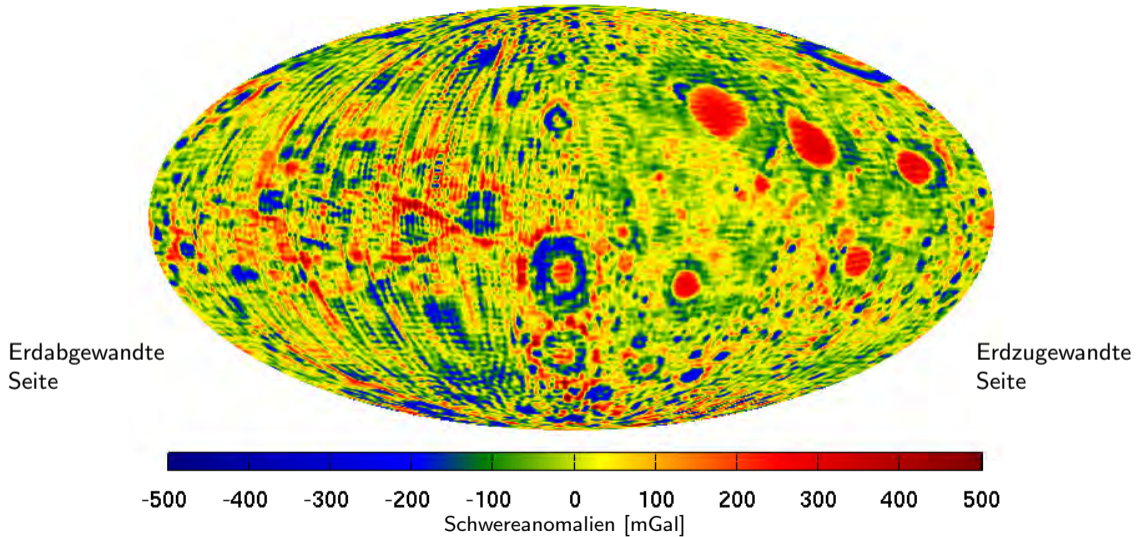


Lunar Prospector



- NASA, 1998-1999
- Missionsziele: Studium der Oberflächenzusammensetzung, Messung von Magnet- und Schwerefeld
- Problem: Die erdabgewandte Seite!

Lunar Prospector



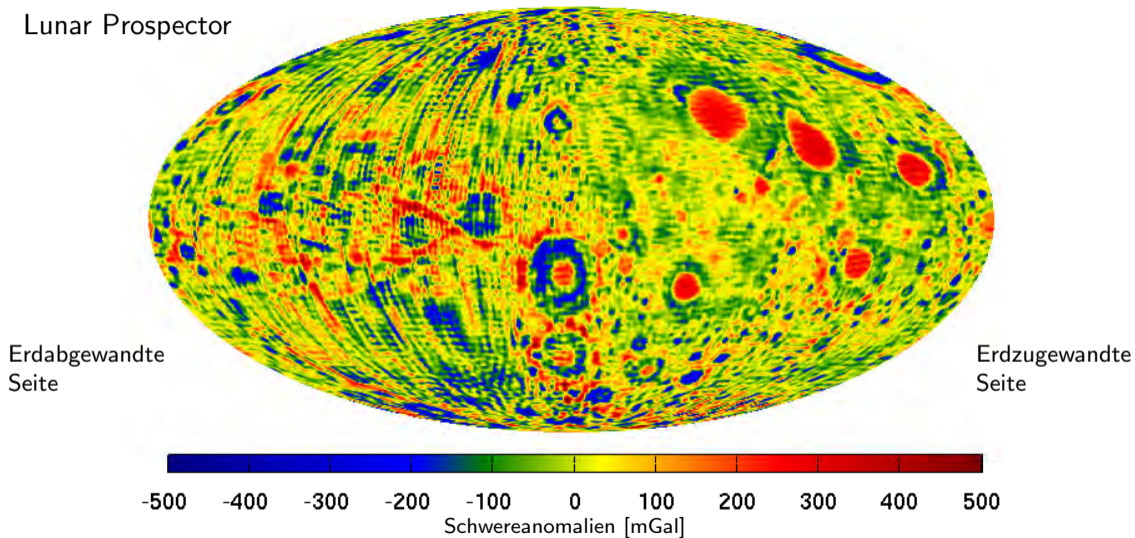
SELENE/Kaguya



- JAXA (Japan), 2007-2009
- Ein Hauptsatellit und zwei Relais-Satelliten

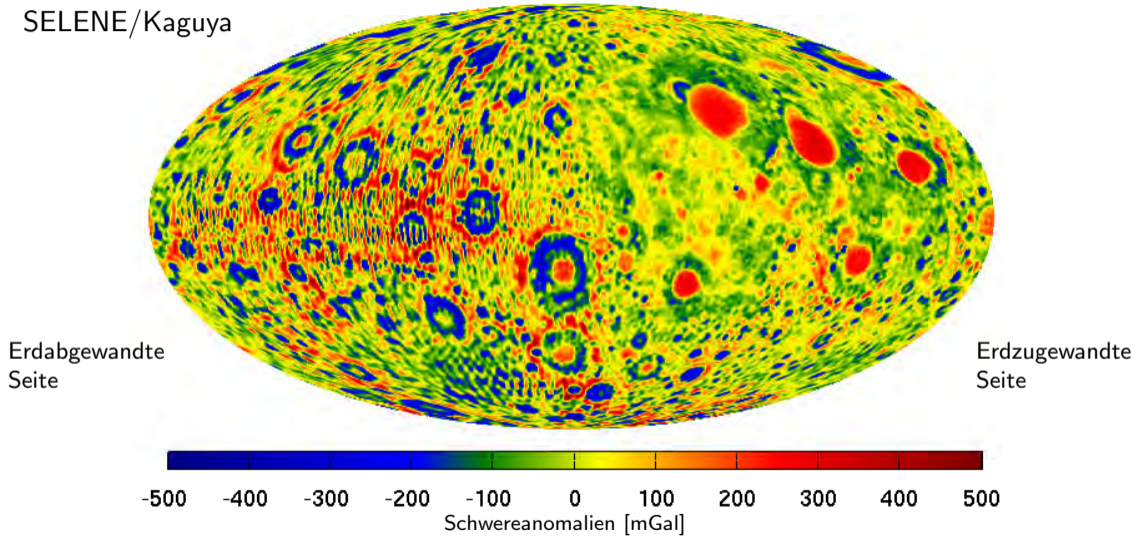
SELENE/Kaguya

Lunar Prospector



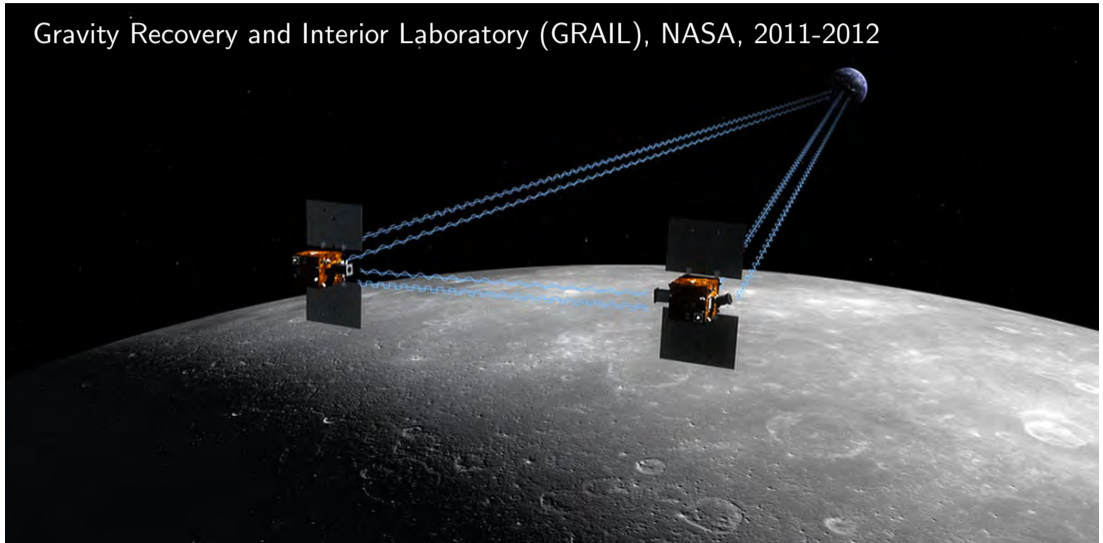
SELENE/Kaguya

SELENE/Kaguya



GRAIL

Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL), NASA, 2011-2012

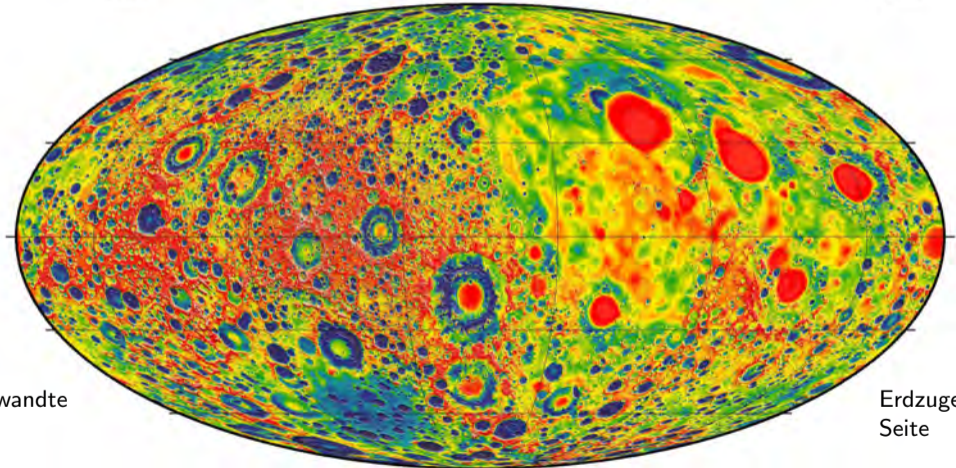


GRAIL



- “GRACE auf dem Mond”
- Hochgenaue Zwischensatellitenmessungen auch auf der Rückseite des Mondes
- Flog gegen Ende nur 5 km über der Mondoberfläche

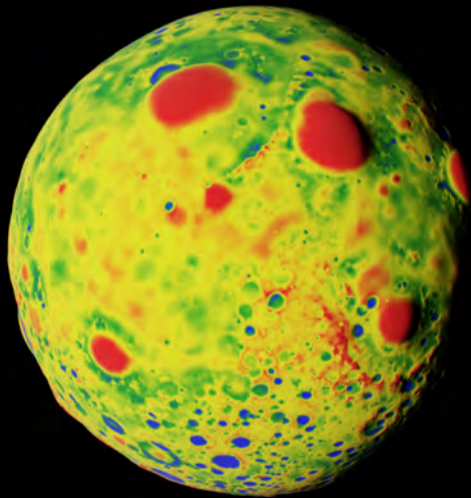
GRAIL

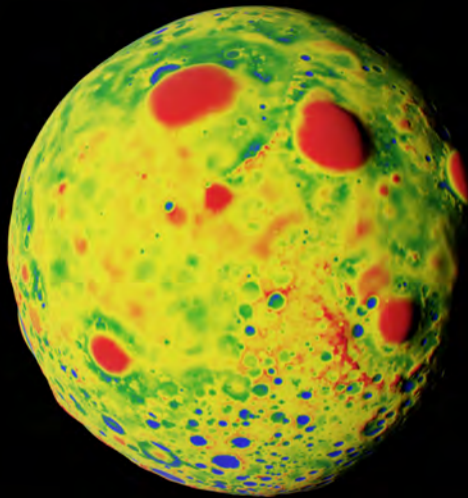


Erdabgewandte
Seite

Erdzugewandte
Seite



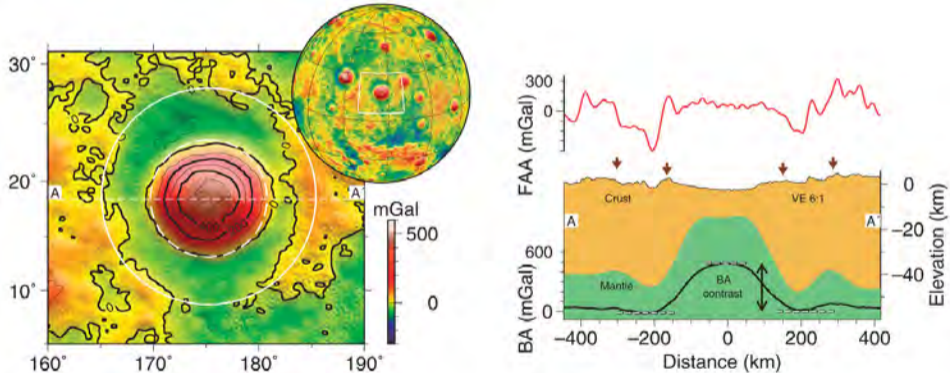




Räumlich überhöhtes Selenoid, farblich die Schwereanomalien

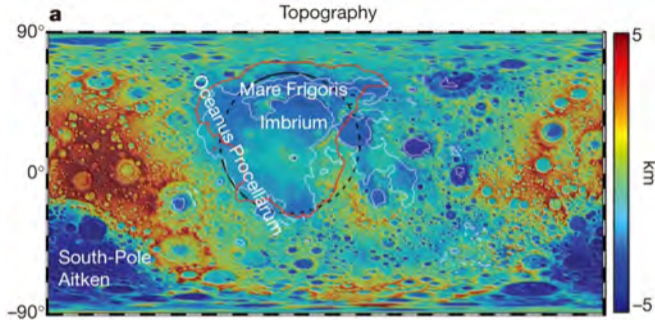
Blick ins Mondinnere

Die mittels GRAIL gewonnenen Schwerfeld-Modelle des Mondes haben viele neue Erkenntnisse gebracht.

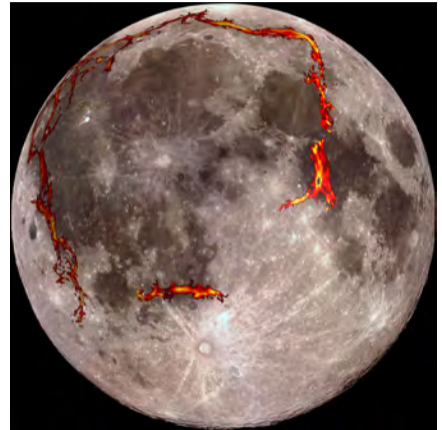


Charakterisierung von Einschlagbecken (Neumann et al., 2015, Science advances).

Blick ins Mondinnere

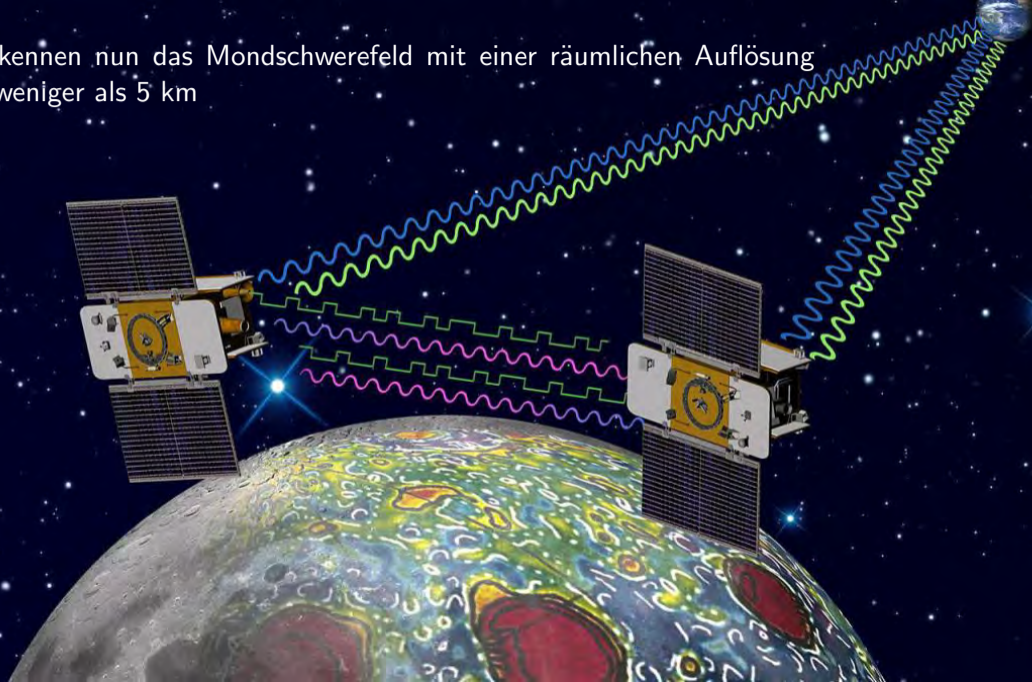


Der Ozean der Stürme (Oceanus Procellarum) ist kein Einschlagbecken, sondern das Produkt vulkanischer Aktivität (Andrews-Hanna et al., 2014, Nature).

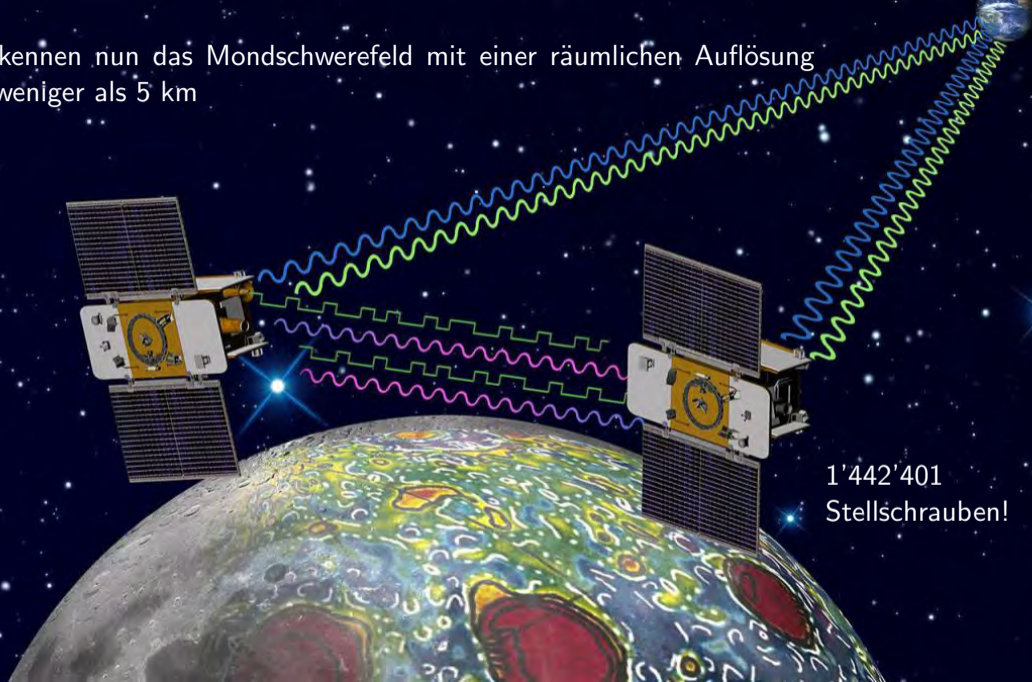


Mittels GRAIL aufgespürte urzeitliche Grabenbrüche

Wir kennen nun das Mondschwerefeld mit einer räumlichen Auflösung von weniger als 5 km



Wir kennen nun das Mondschwerefeld mit einer räumlichen Auflösung von weniger als 5 km



1'442'401
Stellschrauben!

Lust auf mehr?

Falls Sie mehr über Schwerfelder, aber auch über andere unserer Aktivitäten erfahren möchten:



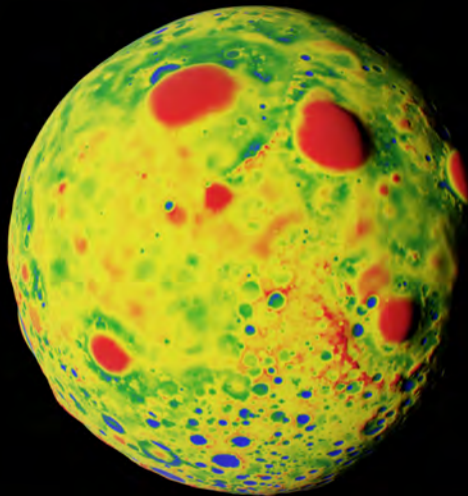
Nacht der Forschung an der Universität Bern:
10. September 2022

www.nachtderforschung.unibe.ch



Doppeljubiläum Alte Sternwarte Bern (200 Jahre)
und AIUB (100 Jahre)

Öffentliche Vorträge und Aktivitäten
25./26. November 2022



Vielen Dank!