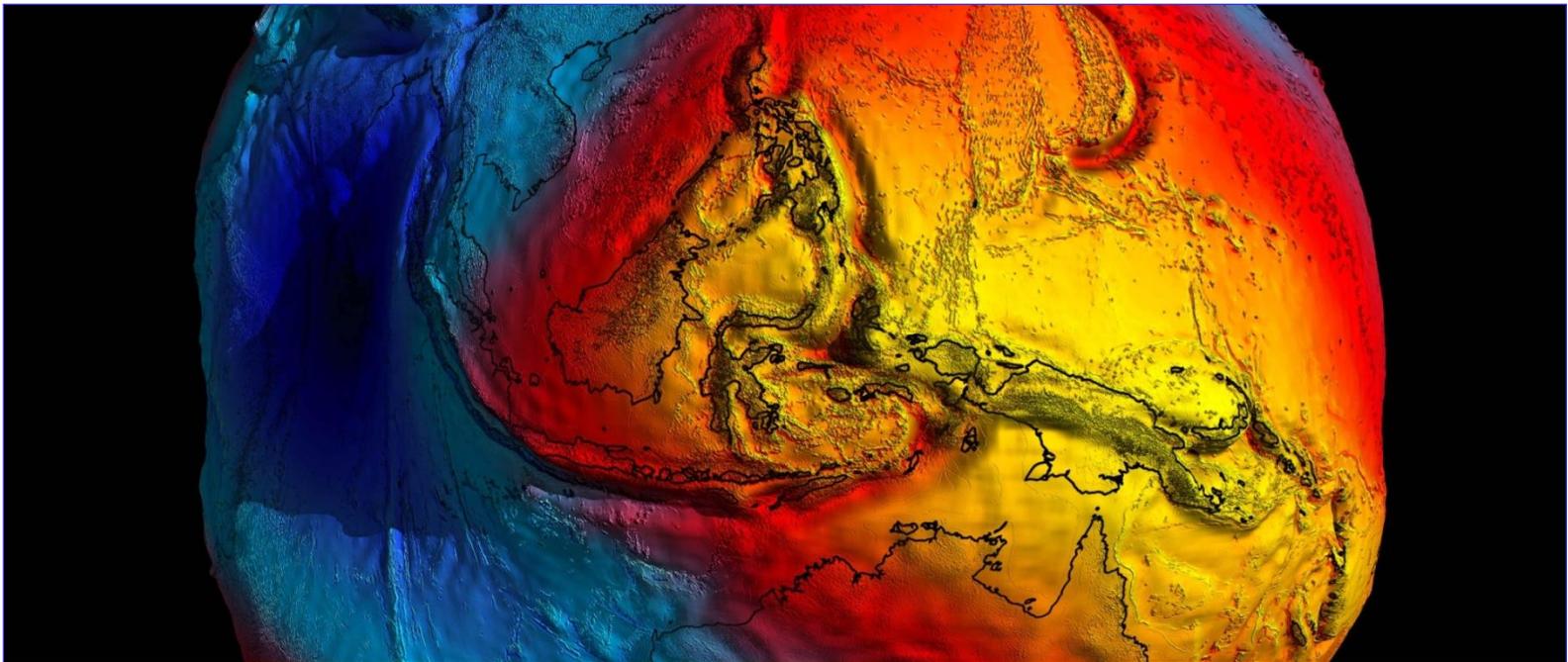


Satellitengestützte Geodäsie: Heute und die Zukunft



Definition: Geodäsie und Gravimetrie

Geodäsie (altgriechisch γῆ gé „Erde“ und δαίρειν daízein „teilen“) ist die Wissenschaft von der Ausmessung und Abbildung der Erdoberfläche:

- ✓ geometrische Figur der Erde (Geoid, Gelände),
- ✓ Erdschwerefeld,
- ✓ Orientierung der Erde im Weltraum (Erdrotation).

(Quelle: Wikipedia)

Gravimetrie (lat. gravitas, „Schwere“, griech. τὸ μέτρον, „das Maß“)

- ✓ Methoden zur Vermessung des Schwerefeldes der Erde.

(Quelle: Wikipedia)

Inhaltsverzeichnis

- ✓ Motivation
- ✓ Bekannte Methoden der Geodäsie
- ✓ Neue Ansätze: GRACE Follow-On und relativistische Geodäsie
- ✓ Zusammenfassung und Ausblick

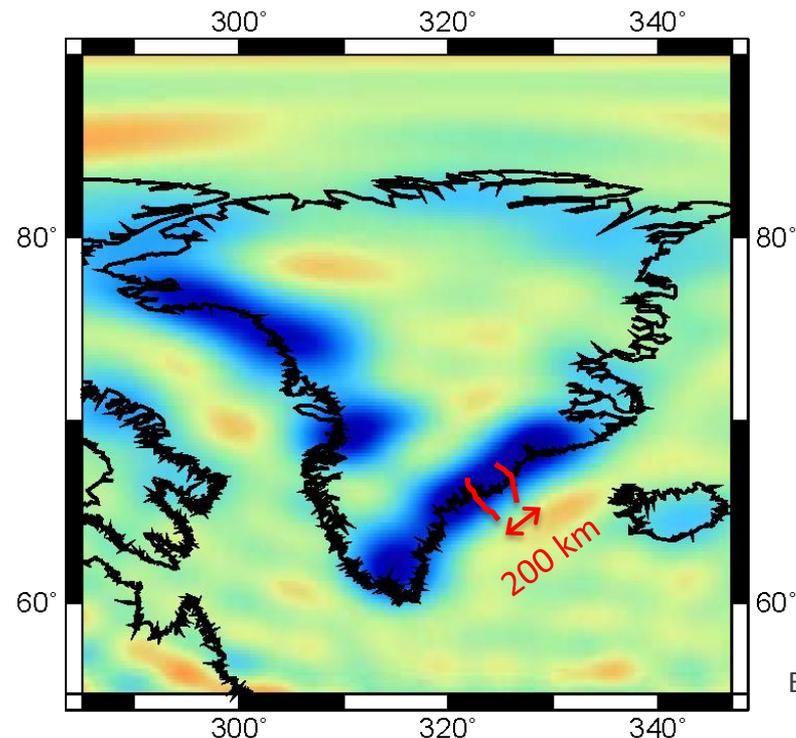
Inhaltsverzeichnis

- ✓ **Motivation**
- ✓ Bekannte Methoden der Geodäsie
- ✓ Neue Ansätze: GRACE Follow-On und relativistische Geodäsie
- ✓ Zusammenfassung und Ausblick

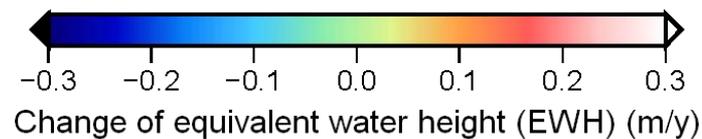
Eisschmelze in Grönland (gemessen von GRACE)

- ✓ Messung wichtig, um **klimatische Veränderungen** sowie den **Anstieg des Meerwasserspiegels** zu verstehen und zu beschreiben

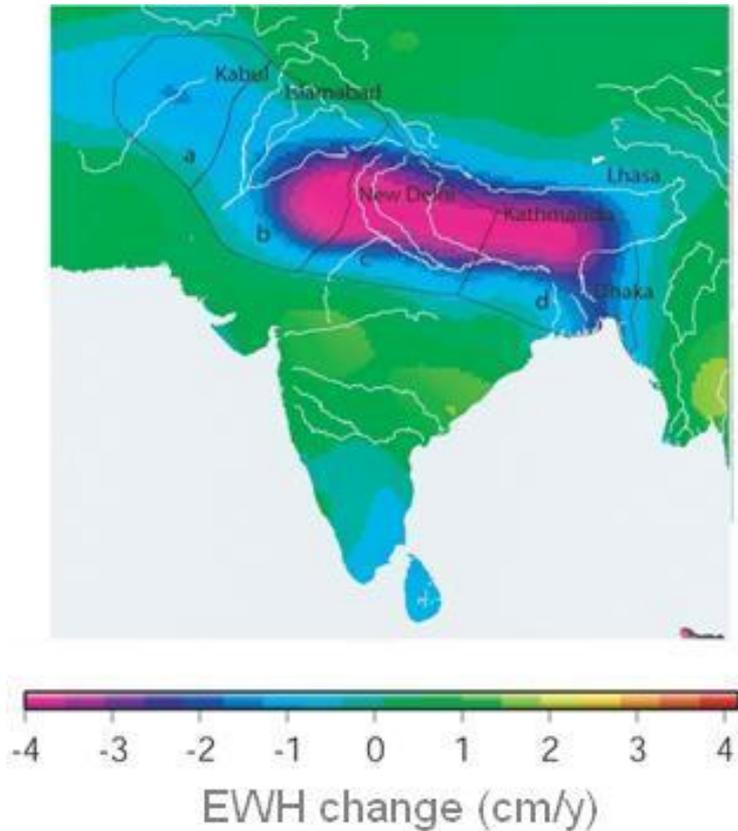
- ✓ **aber: Auflösung** (400 km) zu grob, um Variationen in der Gletscherstruktur festzustellen (200 km räumliche Auflösung benötigt)



Eicker et al. 2013



Absinken des Grundwasserspiegels in Indien



Tiwari et al. 2009

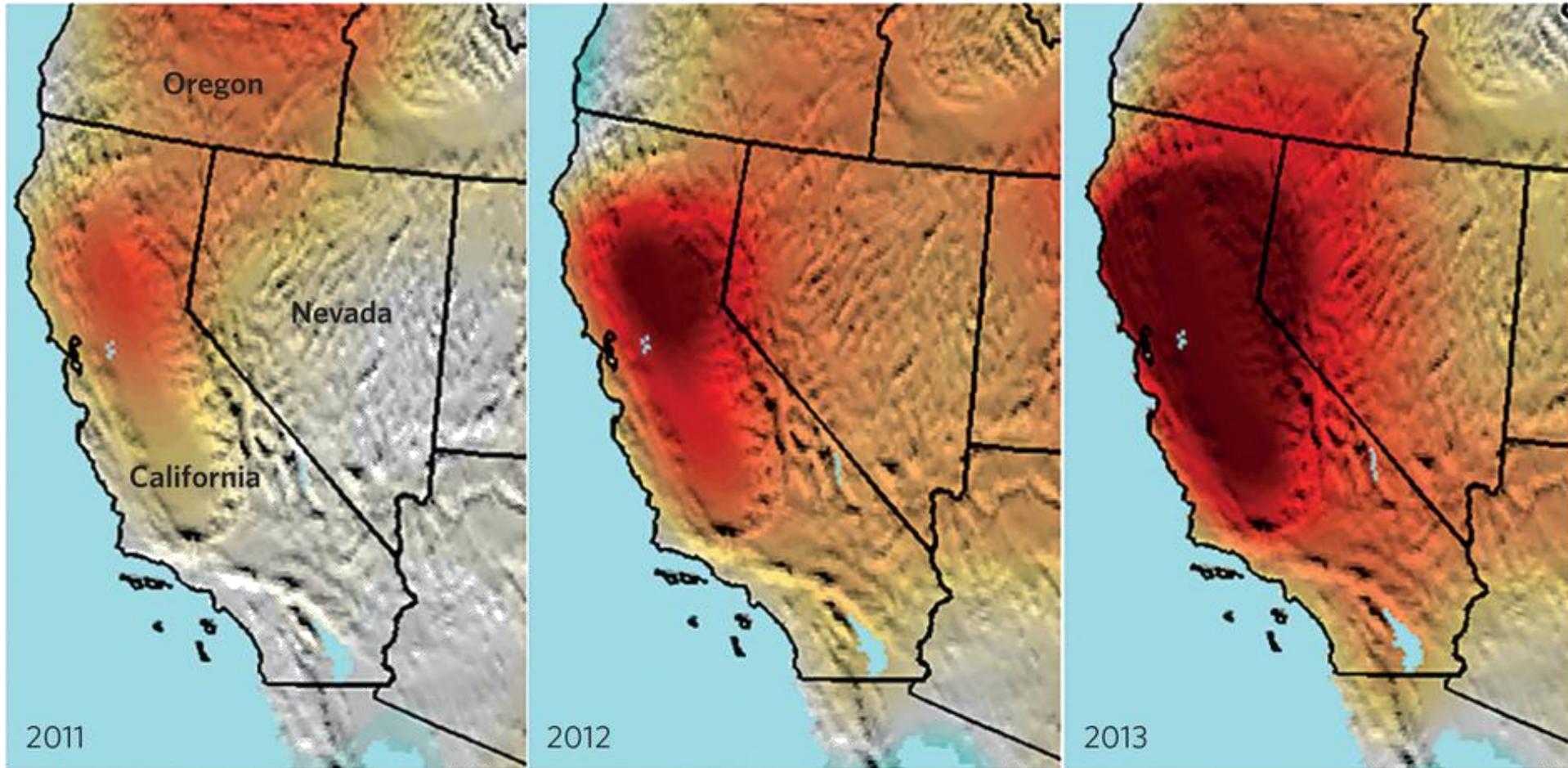
- ✓ Wichtig für Landwirtschaft (Bewässerung, Nachhaltigkeit)
- ✓ In mehreren Regionen werden ähnliche Probleme beobachtet
- ✓ Monitoring von Wasserfluss und Wasserressourcen

Trockenheit in Kalifornien



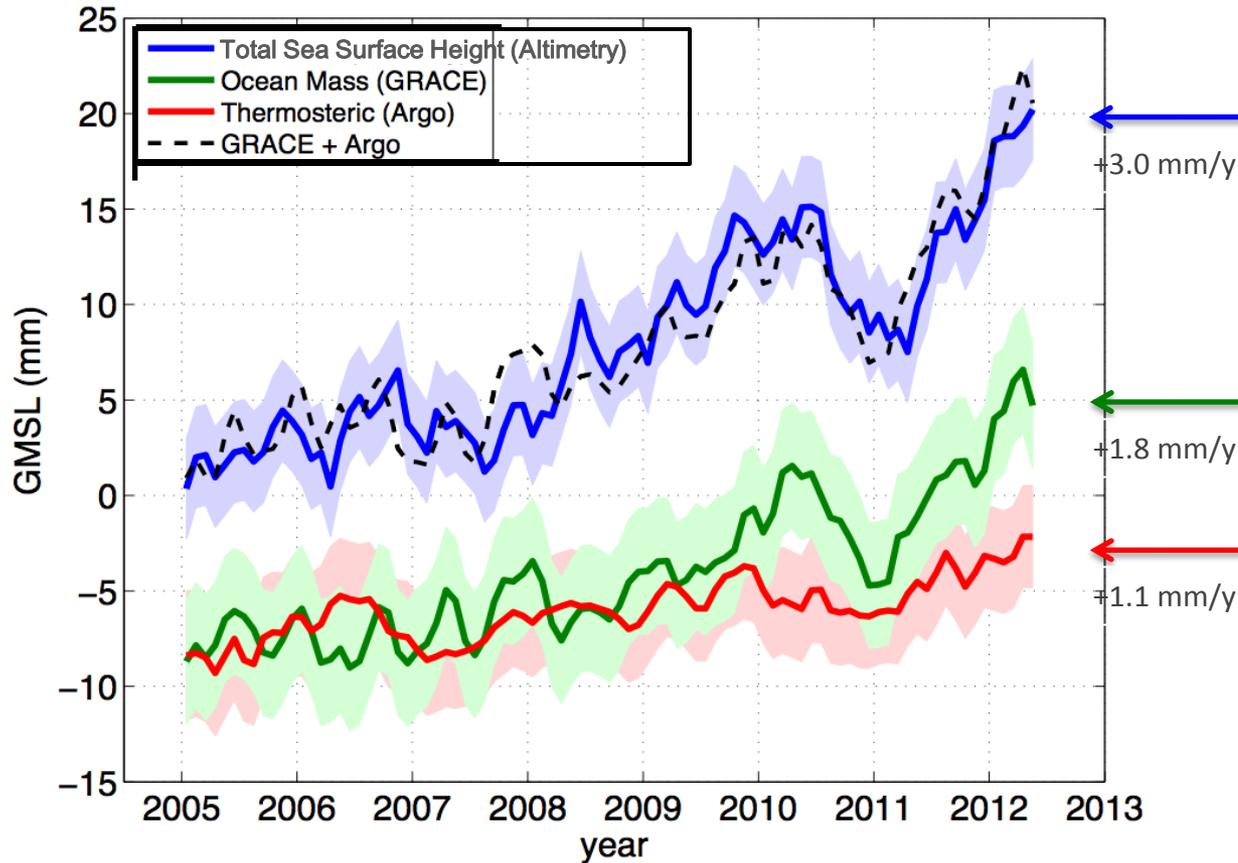
© David McNew/Getty Images

Trockenheit in Kalifornien

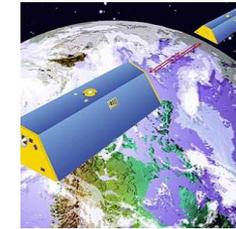


© Felix W. Landerer,
NASA Jet Propulsion Laboratory

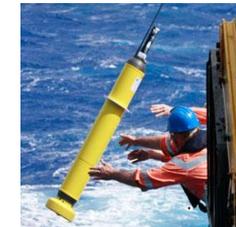
Bestimmung des Meeresspiegelanstiegs



Satellitenaltimetrie,
z.B.
✓ Envisat
✓ Topex/Poseidon



GRACE



Ozeanographie,
z.B.
Argo Programm

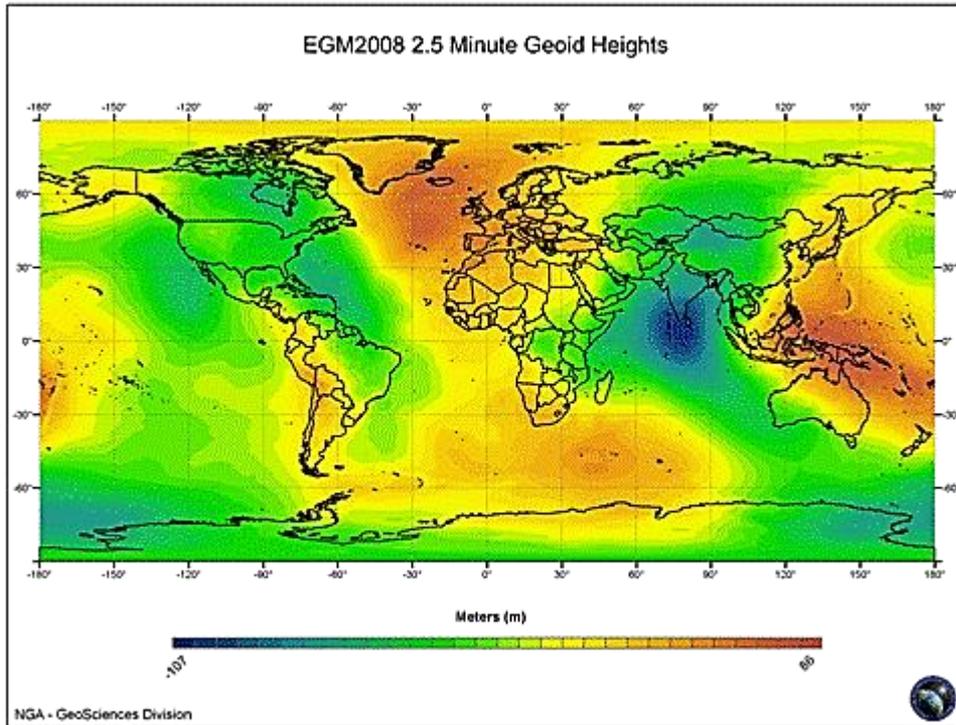
Church et al. 2013
(IPCC Assessment Report 5)

✓ **Bestimmung und Verständnis des Meeresspiegelanstiegs**

Inhaltsverzeichnis

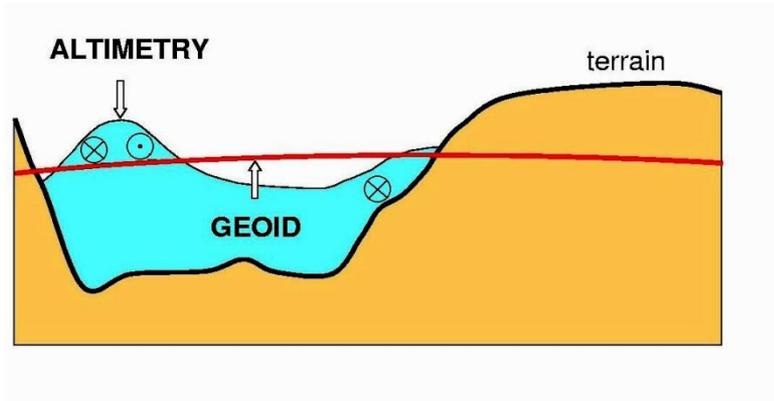
- ✓ Motivation
- ✓ **Bekannte Methoden der Geodäsie**
- ✓ Neue Ansätze: GRACE Follow-On und relativistische Satellitengeodäsie
- ✓ Zusammenfassung und Ausblick

Höhenmessung - Altimetrie



- ✓ Absolute Höhen: physikalisch, Bezug auf Meeresspiegel
- ✓ **Satellitaltimetrie:** rein geometrische Bestimmung der Meereshöhe, Bezug auf ein mathematisches Erdellipsoid (WGS84-/EGM2008-System)

Höhenmessung - Altimetrie

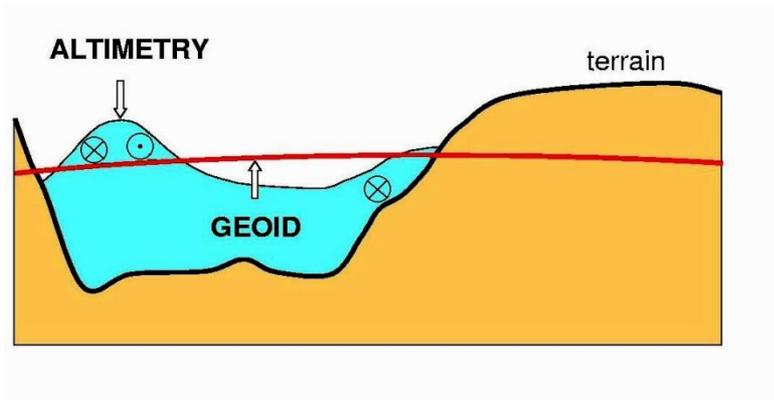


- ✓ Absolute Höhen: physikalisch, Bezug auf Meeresspiegel
- ✓ **Satellitaltimetrie:** rein geometrische Bestimmung der Meereshöhe, Bezug auf ein mathematisches Erdellipsoid (WGS84-/EGM2008-System)
- ✓ Messprinzip der Satellitaltimetrie: Nutzlast → Radar-Altimeter

Kurzwellige
Radiopulse

Satellit

Höhenmessung - Altimetrie



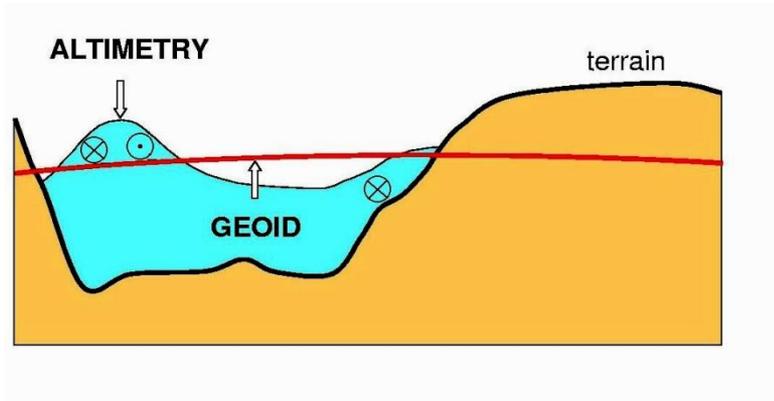
- ✓ Absolute Höhen: physikalisch, Bezug auf Meeresspiegel
- ✓ **Satellitaltimetrie:** rein geometrische Bestimmung der Meereshöhe, Bezug auf ein mathematisches Erdellipsoid (WGS84-/EGM2008-System)
- ✓ Messprinzip der Satellitaltimetrie: Nutzlast → Radar-Altimeter

Kurzwellige
Radiopulse
Satellit

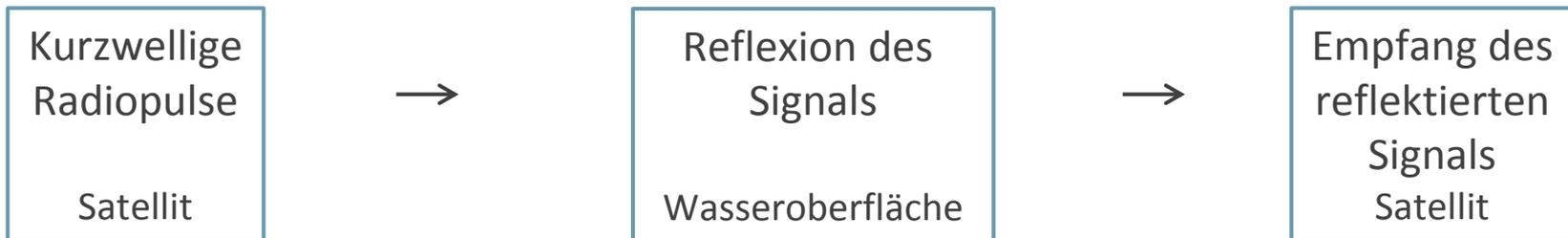


Reflexion des
Signals
Wasseroberfläche

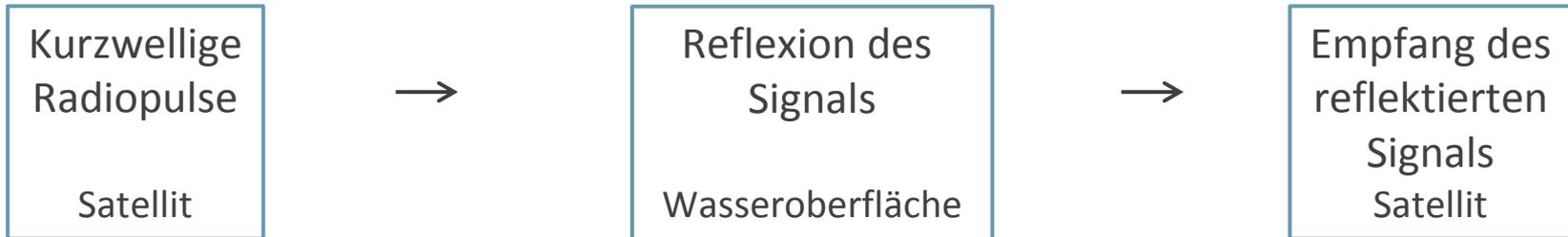
Höhenmessung - Altimetrie



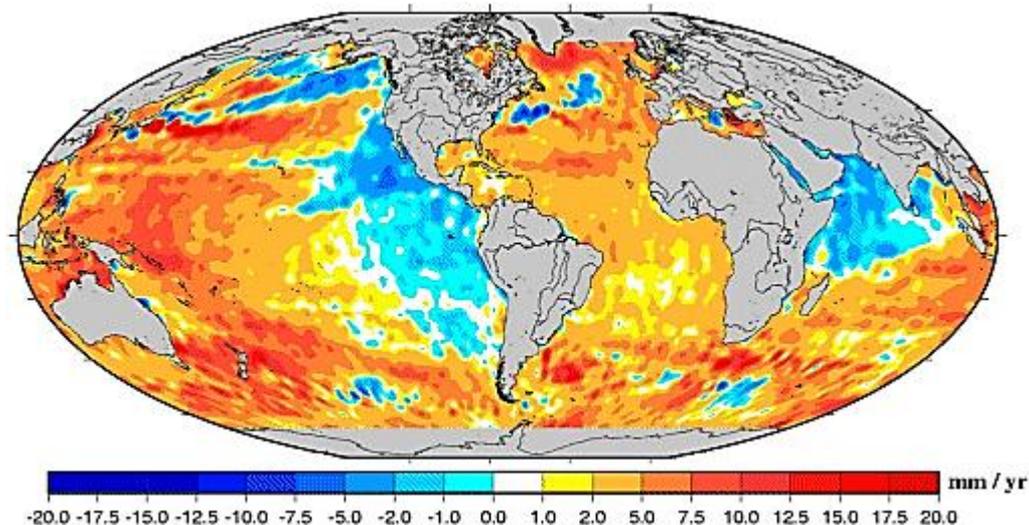
- ✓ Absolute Höhen: physikalisch, Bezug auf Meeresspiegel
- ✓ **Satellitaltimetrie:** rein geometrische Bestimmung der Meereshöhe, Bezug auf ein mathematisches Erdellipsoid (WGS84-/EGM2008-System)
- ✓ Messprinzip der Satellitaltimetrie: Nutzlast → Radar-Altimeter



Höhenmessung - Altimetrie



- ✓ Aus der Laufzeit des Signals wird die Meereshöhe bestimmt
- ✓ **wichtig:** die Flugbahn des Satelliten muss genau bekannt sein
→ **geozentrische Höhe in Bezug auf Referenzellipsoid**



Mean Sea Level trends computed from altimetry, from January 1993 to 2005,
© LEGOS/CNRS

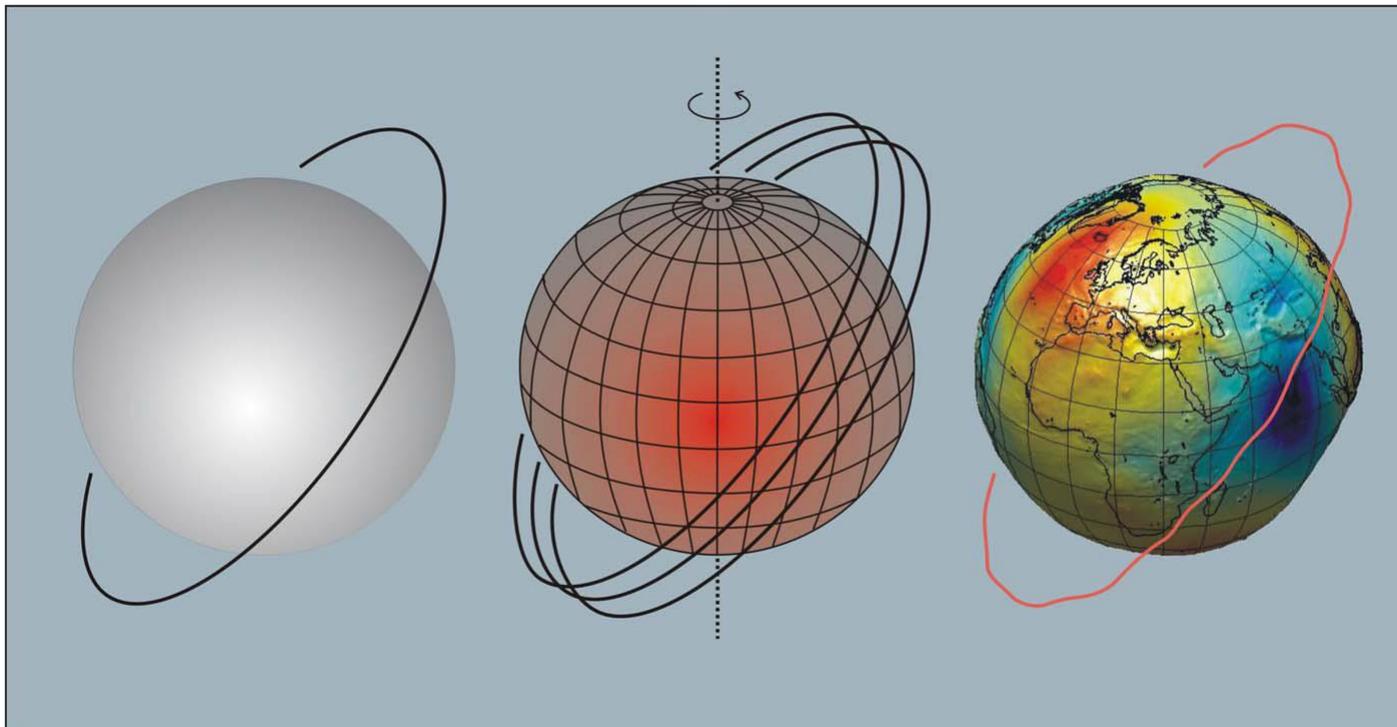
Gravimetrie

- ✓ Methoden, um Verlauf des Geoids bzw. der Niveaulflächen durch Messung der Schwerkraft zu ermitteln
- ✓ **Satellitengravimetrie**
 - ✓ **Gradiometrie:** gleichzeitige Messung eines Schweregradienten mit zwei „Sonden“ in einem festen Relativabstand
 - ✓ **Satellite-to-Satellite Tracking (SST):** Mikrowellen-Distanzmessung zwischen zwei Satelliten

Satellitengravimetrie

Satelliten als frei fallende Körper

- ✓ 1. Fall: Kugelsymmetrisches Gravitationspotential → Keplerorbit (space-fixed)
- ✓ 2. Fall: Rotation der Erde, Abflachung des Potentials → Präzession des Orbits
- ✓ 3. Fall: „reale“ Erde → Modulation des Orbits durch Schwerefeldanomalien



© R. Rummel,
TUM-IAS

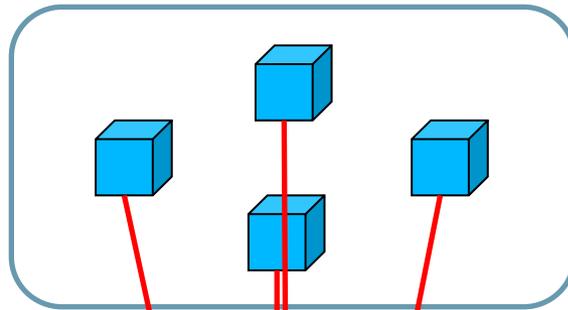


ZARM

Satellitengravimetrie

Mehrere frei fallende Körper:

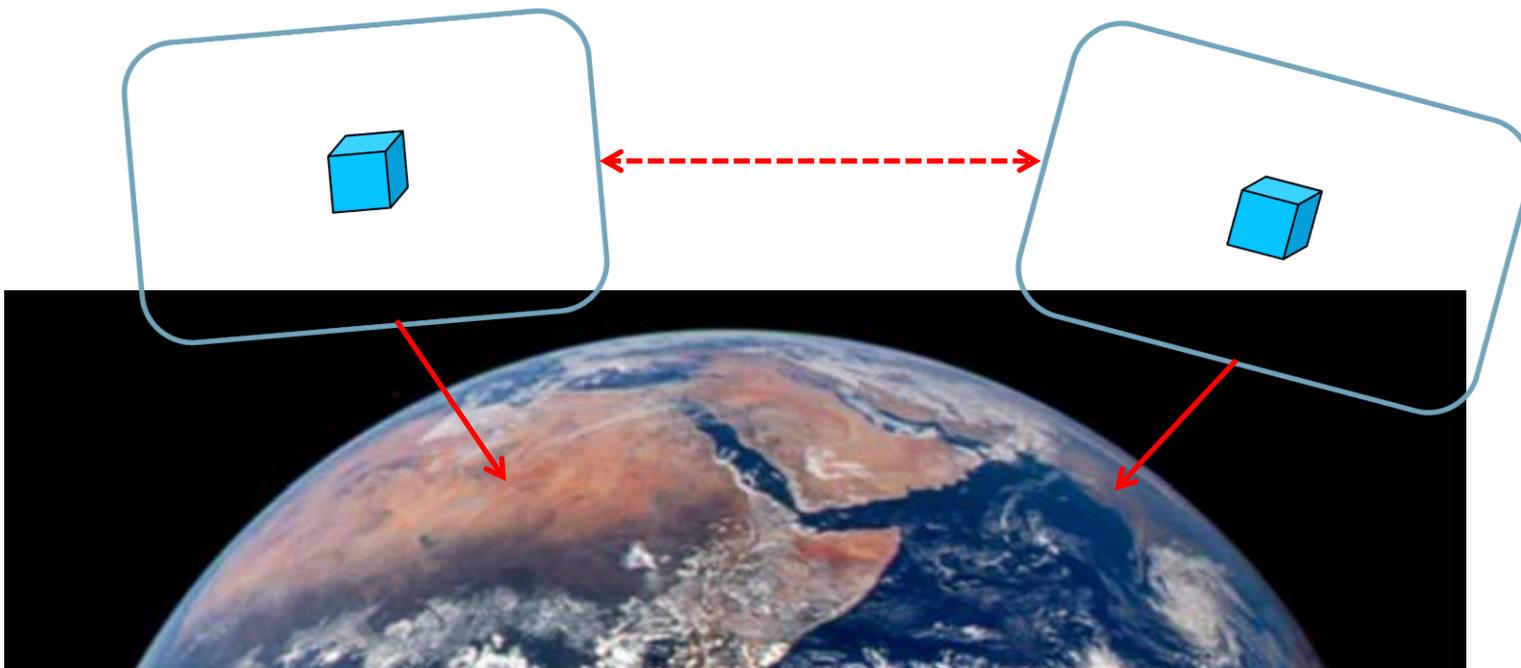
- ✓ 1 Satellit mit mehreren „Testmassen“ als Nutzlast



Satellitengravimetrie

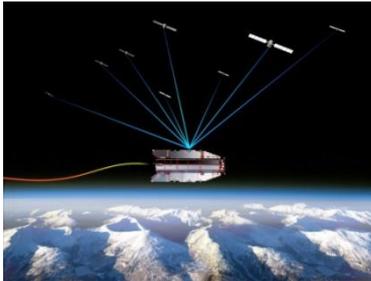
Mehrere frei fallende Körper:

- ✓ 1 Satellit mit mehreren „Testmassen“ als Nutzlast
- ✓ 2 Satelliten im Orbit

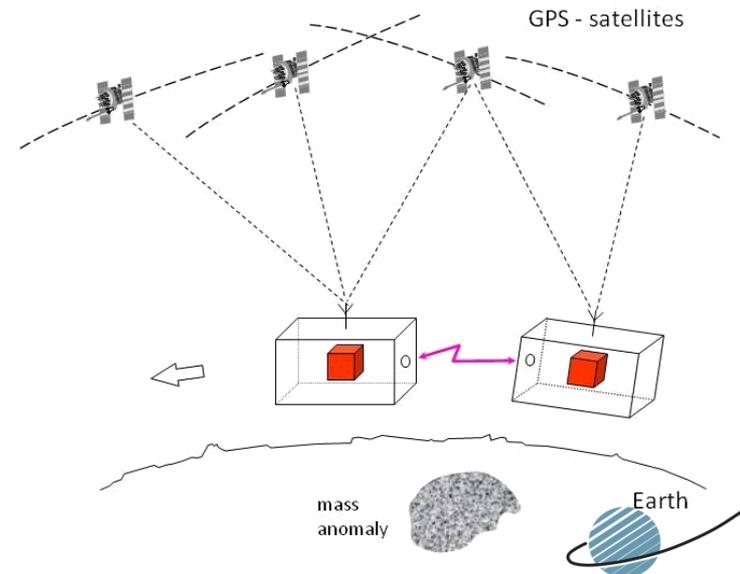
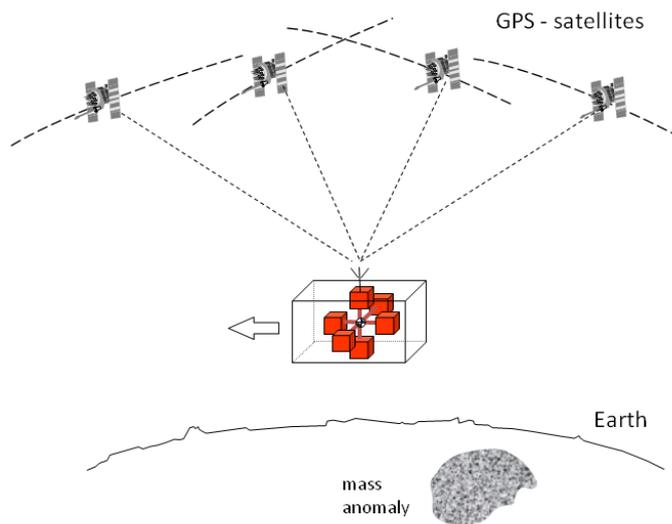
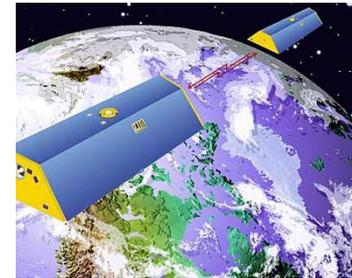


Satellitengravimetrie

Gradiometrie z.B. mit
elektrostatischen
Beschleunigungssensoren

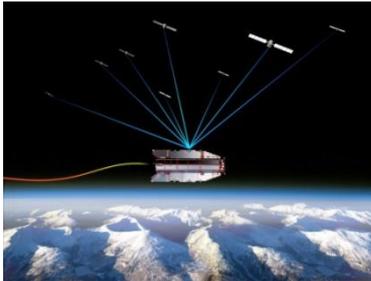


Intersatellite-Ranging mit Mikrowellen
(SST)

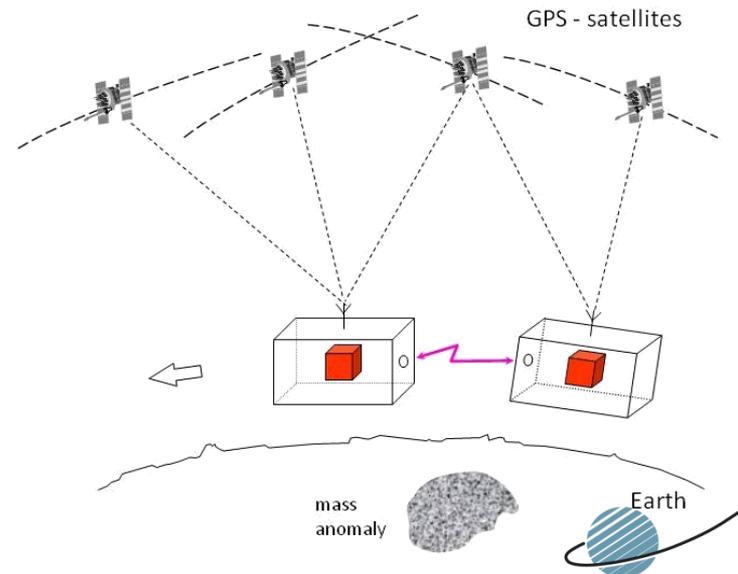
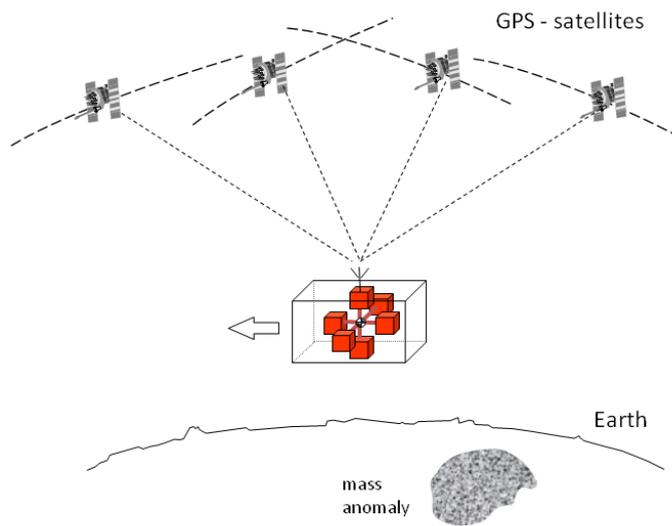
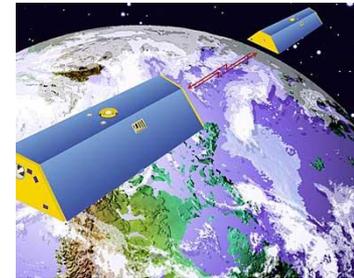


Satellitengravimetrie

GOCE (2009 – 2013)



GRACE (seit 2002)



GOCE: Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer

- ✓ 1995: Beginn der Entwicklungsphase im ESA-Forschungsprogramm „Living Planet“ (u.a. Astrium, Thales Alenia Space, ONERA)
- ✓ Launch: 17. März 2009, Missionsende: 11. November 2013
(Verglühen des Satelliten in der Erdatmosphäre nach Ende der Treibstoffvorräte)
- ✓ Kreisbahn, sonnensynchroner und polarer Orbit
Inklination: $i = 96.7^\circ$
Flughöhe: 255 km
- ✓ Niedrige Flughöhe ermöglichte präzise Vermessung des Erdgeoids

GOCE: Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer

- ✓ Abbremsen des Satelliten in der Restatmosphäre der Erde in dieser Höhe

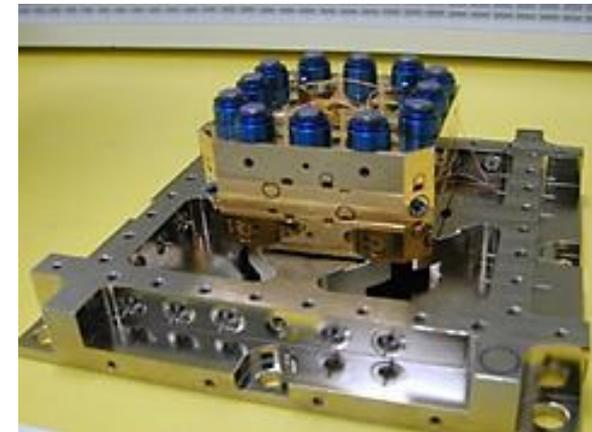
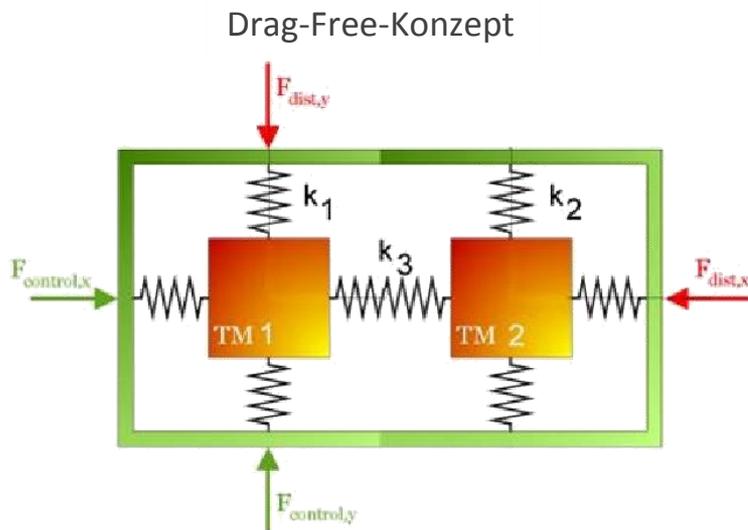


- Dauerhafter Schub nötig, um Flugbahn zu halten
- Minimieren des Luftwiderstandes durch aerodynamische Form des Satelliten

©ESA /AOES Medialab

GOCE: Gavity field and steady-state Ocean Circulation Explorer

- ✓ **Drag-Free-Konzept:** Kompensation von Störkräften durch entsprechende Lageregelung (Ionen-Triebwerke: Schub zwischen 1 und 20 mN)
→ Nahezu perfekt frei fallende Testmassen im Schwerfeld der Erde
- ✓ Messmethode: 3-Achs-Schweregradiometer mit 6 elektrostatischen Beschleunigungssensoren



©ONERA

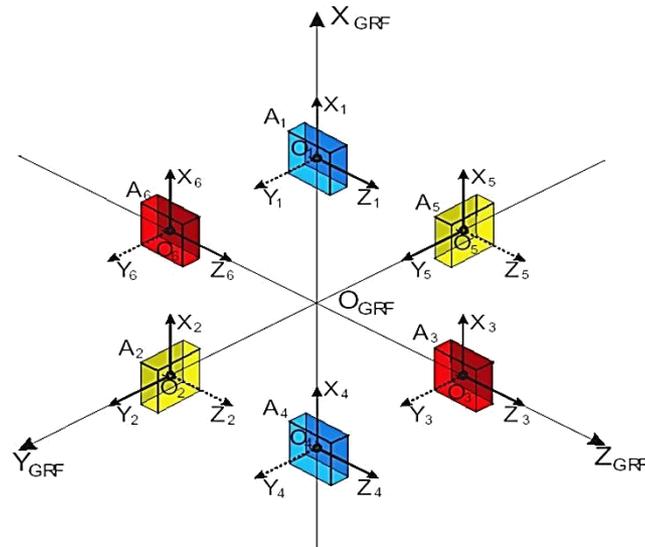
©ONERA

GOCE: Gavity field and steady-state Ocean Circulation Explorer

- ✓ **Drag-Free-Konzept:** Kompensation von Störkräften durch entsprechende Lageregelung (Ionen-Triebwerke: Schub zwischen 1 und 20 mN)
→ Nahezu perfekt frei fallende Testmassen im Schwerfeld der Erde
- ✓ Messmethode: 3-Achs-Schweregradiometer mit 6 elektrostatischen Beschleunigungssensoren

Jedes Akzelerometer hat

- ✓ zwei sensitive Achsen;
Genauigkeit: 10^{-12} m/s^2
- ✓ eine nicht-sensitive Achse;
Genauigkeit: 10^{-10} m/s^2



©TU München - IAPG

GOCE: Gavity field and steady-state Ocean Circulation Explorer

✓ Gemessene Beschleunigung:

$$\vec{a}_{\text{mess},1} = \vec{g}(\vec{r}_1) - \dot{\vec{\omega}} \times \vec{r}_1 - \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}_1)$$

- ✓ Gravitationsgradient entlang eines Gradiometerarms
- ✓ Winkelbeschleunigung durch Rotation des Satelliten
- ✓ Zentrifugalbeschleunigung durch Rotation des Satelliten

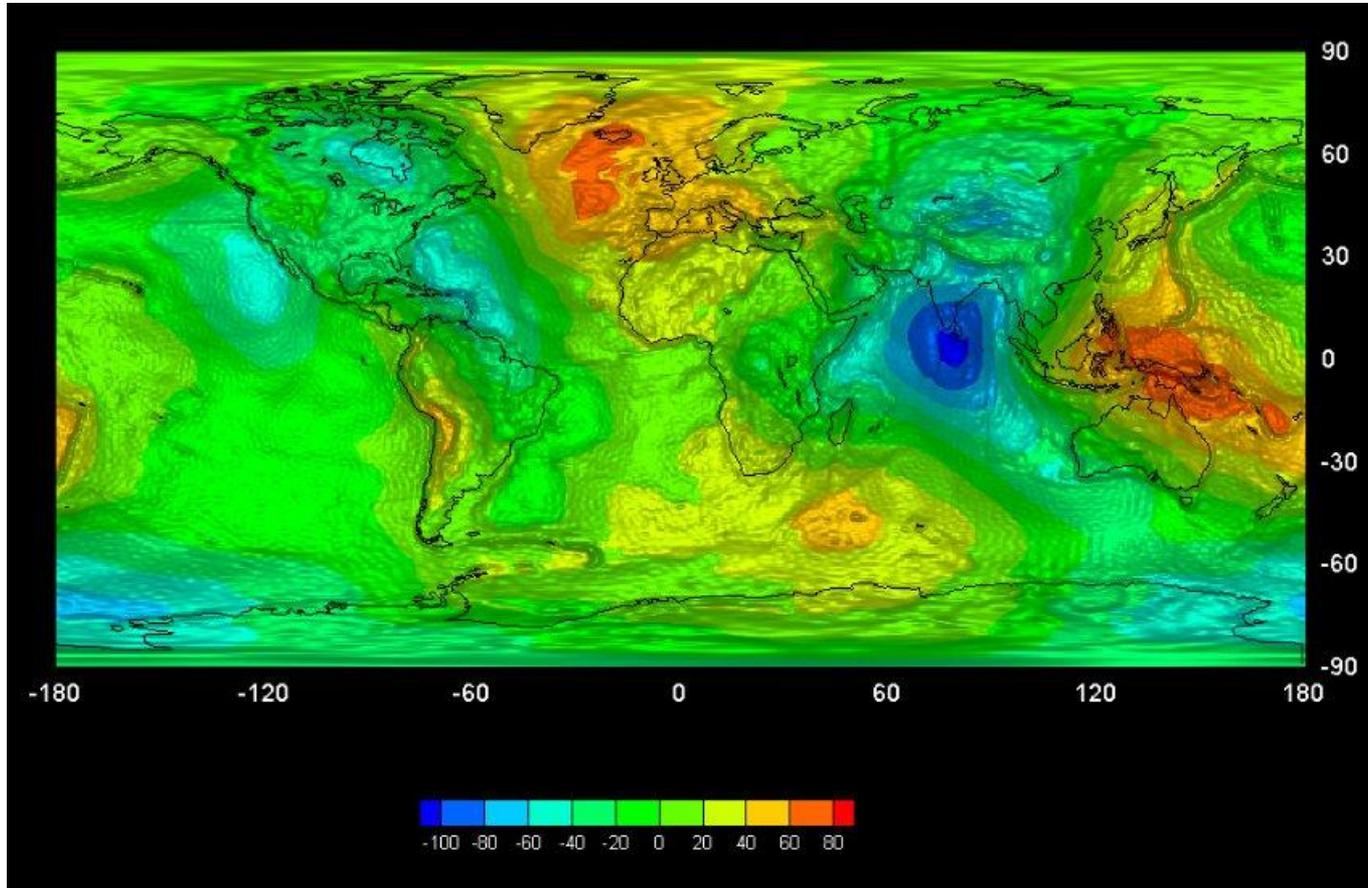
GOCE: Gavity field and steady-state Ocean Circulation Explorer

$$\begin{aligned}
 \vec{a}_{\text{diff}1,2} &= (\vec{g}(\vec{r}_1) - \vec{g}(\vec{r}_2)) - \dot{\vec{\omega}} \times \vec{r}_{1,2} - \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}_{1,2}) \\
 &= \mathbf{G} \cdot \vec{r}_{1,2} - \dot{\vec{\omega}} \times \vec{r}_{1,2} - \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}_{1,2}) \\
 &= \begin{pmatrix} \frac{\partial g_x}{\partial x} & \frac{\partial g_x}{\partial y} & \frac{\partial g_x}{\partial z} \\ \frac{\partial g_y}{\partial x} & \frac{\partial g_y}{\partial y} & \frac{\partial g_y}{\partial z} \\ \frac{\partial g_z}{\partial x} & \frac{\partial g_z}{\partial y} & \frac{\partial g_z}{\partial z} \end{pmatrix} \cdot \vec{r}_{1,2} \\
 &- \begin{pmatrix} 0 & -\dot{\omega}_z & \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z & 0 & -\dot{\omega}_x \\ -\dot{\omega}_y & \dot{\omega}_x & 0 \end{pmatrix} \cdot \vec{r}_{1,2} \\
 &- \begin{pmatrix} -\omega_y^2 - \omega_z^2 & \omega_x \omega_y & \omega_x \omega_z \\ \omega_y \omega_x & -\omega_x^2 - \omega_z^2 & \omega_y \omega_z \\ \omega_z \omega_x & \omega_z \omega_y & -\omega_x^2 - \omega_y^2 \end{pmatrix} \cdot \vec{r}_{1,2}
 \end{aligned}$$

GOCE: Gavity field and steady-state Ocean Circulation Explorer

$$\begin{aligned}
 \vec{a}_{\text{diff}1,2} &= (\vec{g}(\vec{r}_1) - \vec{g}(\vec{r}_2)) - \dot{\vec{\omega}} \times \vec{r}_{1,2} - \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}_{1,2}) \\
 &= \mathbf{G} \cdot \vec{r}_{1,2} - \dot{\vec{\omega}} \times \vec{r}_{1,2} - \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}_{1,2}) \\
 &= \begin{pmatrix} \frac{\partial g_x}{\partial x} & \frac{\partial g_x}{\partial y} & \frac{\partial g_x}{\partial z} \\ \frac{\partial g_y}{\partial x} & \frac{\partial g_y}{\partial y} & \frac{\partial g_y}{\partial z} \\ \frac{\partial g_z}{\partial x} & \frac{\partial g_z}{\partial y} & \frac{\partial g_z}{\partial z} \end{pmatrix} \cdot \vec{r}_{1,2} \\
 &- \begin{pmatrix} 0 & -\dot{\omega}_z & \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z & 0 & -\dot{\omega}_x \\ -\dot{\omega}_y & \dot{\omega}_x & 0 \end{pmatrix} \cdot \vec{r}_{1,2} \\
 &- \begin{pmatrix} -\omega_y^2 - \omega_z^2 & \omega_x \omega_y & \omega_x \omega_z \\ \omega_y \omega_x & -\omega_x^2 - \omega_z^2 & \omega_y \omega_z \\ \omega_z \omega_x & \omega_z \omega_y & -\omega_x^2 - \omega_y^2 \end{pmatrix} \cdot \vec{r}_{1,2}
 \end{aligned}$$

GOCE: Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer



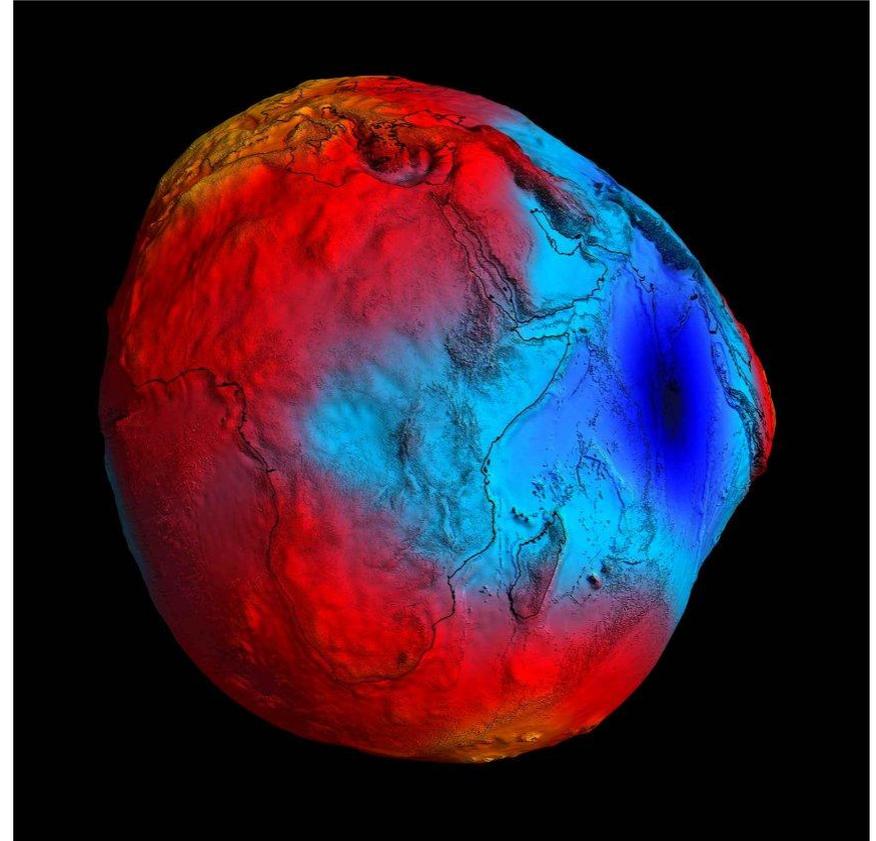
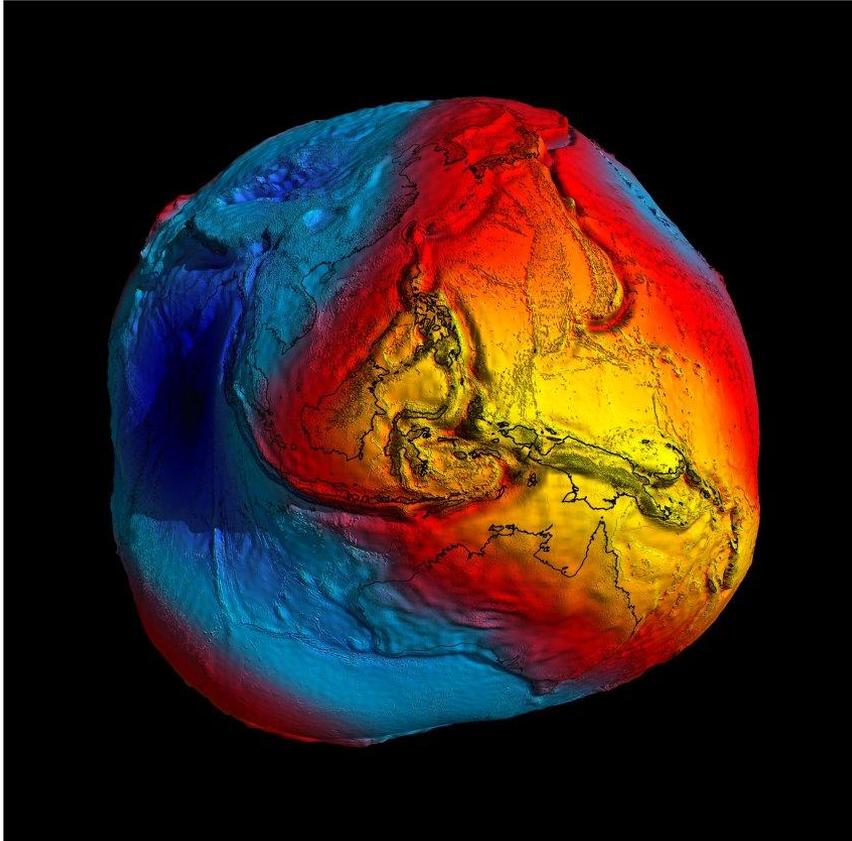
©CNES

Ergebnis ermittelt aus GOCE-Daten nach 60 Beobachtungstagen,
Messgröße in [mGal] ($1 \text{ Gal} = 0.01 \text{ m/s}^2$)

GOCE: Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer

- ✓ GOCE lieferte bis 2013 das beste Abbild des Erdschwerefeldes
- ✓ **Auflösung des Höhenprofils mit einer Genauigkeit von 2cm**
(räumliche Auflösung: 100 km)
- ✓ Daten dokumentieren den Anstieg des Meeresspiegels und Strömungsveränderungen
- ✓ „Kartoffel“: unterschiedliche Stärke des Schwerefeldes bewirkt auf den Ozeanen Wölbungen und Eindellungen

GOCE: Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer

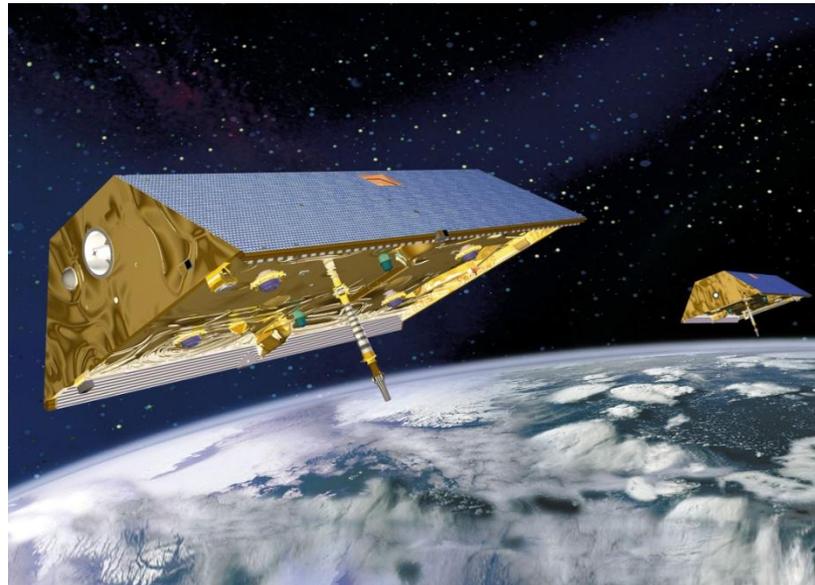


©ESA/HPF/DLR

Schwerefeld-Anomalien, dargestellt in zehntausendfacher Übersteigerung

GRACE: Gravity Recovery And Climate Experiment

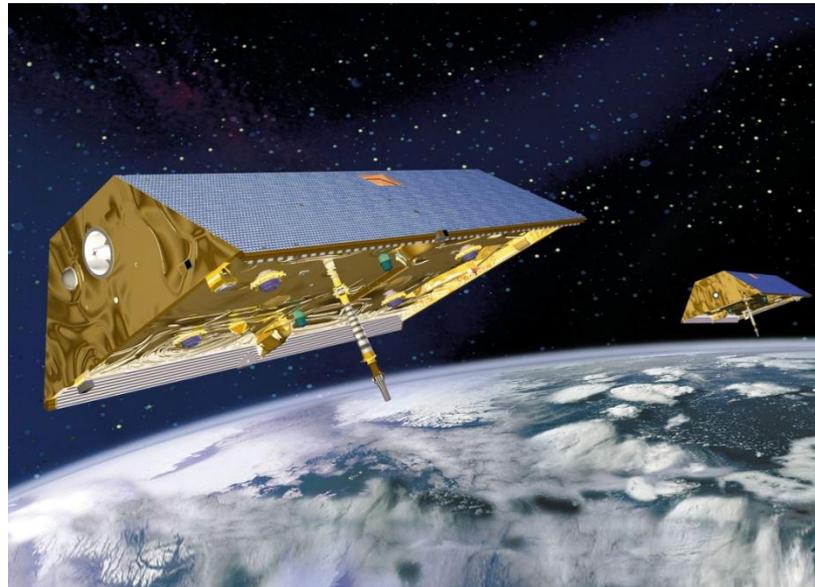
- ✓ Gemeinsame Mission von der National Aeronautics and Space Administration (NASA) und des Deutsches Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR)
- ✓ Launch: 17.03.2002, andauernder Betrieb
- ✓ 2 baugleiche Satelliten (Astrium): GRACE A und GRACE B („Tom und Jerry“)



©NASA/JPL

GRACE: Gravity Recovery And Climate Experiment

- ✓ Flughöhe: 500 km, initialer Abstand zwischen den beiden Satelliten: 220 km, polarer Orbit (Inklination: $i = 89^\circ$)
- ✓ **Messgröße:** Änderung des Abstands zwischen den beiden Satelliten
- ✓ **SST mit K/Ka-Band Ranging (KBR):** Abstandsmessung der Satelliten (K-Band-Signal: 24 GHz, Ka-Band-Signal: 32 GHz) → Genauigkeit: $10^{-6} \text{ m} = 1 \mu\text{m}$



©NASA/JPL

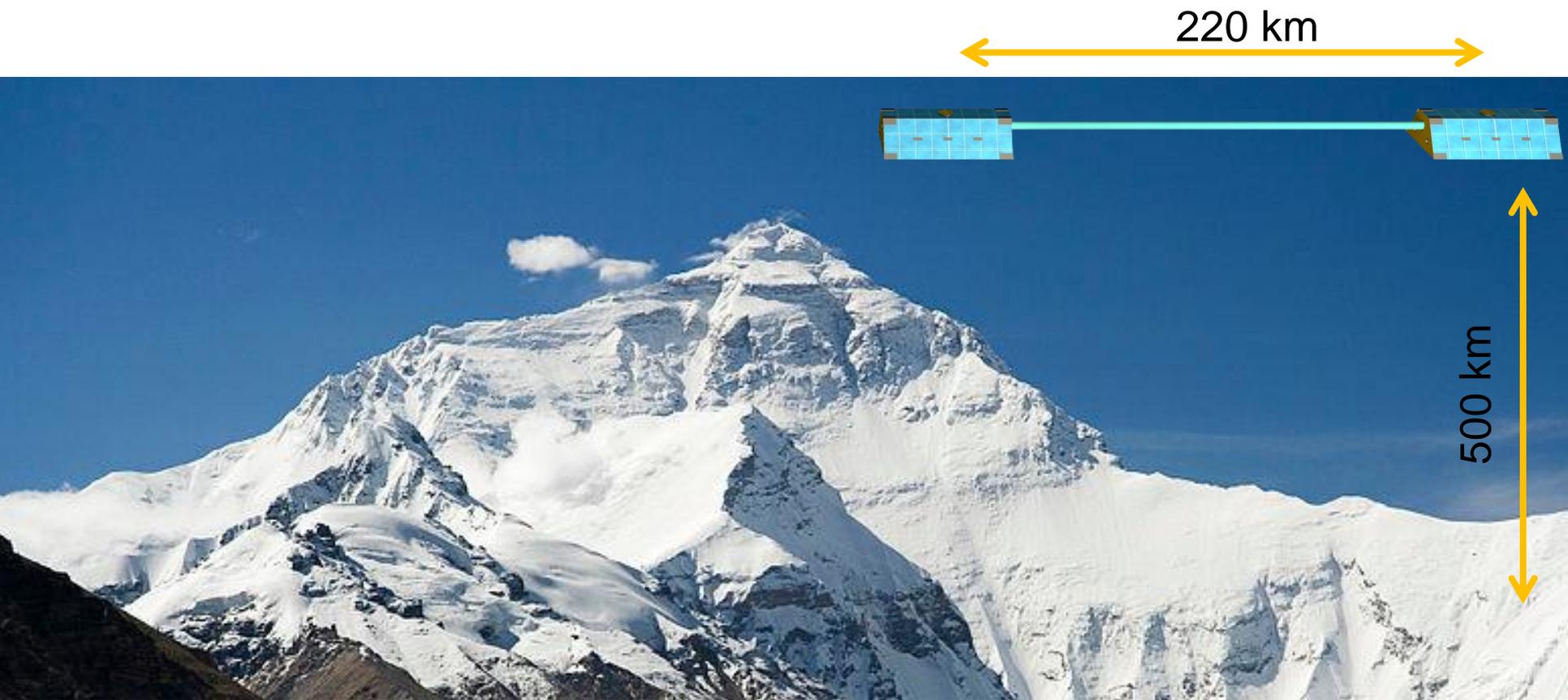
GRACE: Gravity Recovery And Climate Experiment



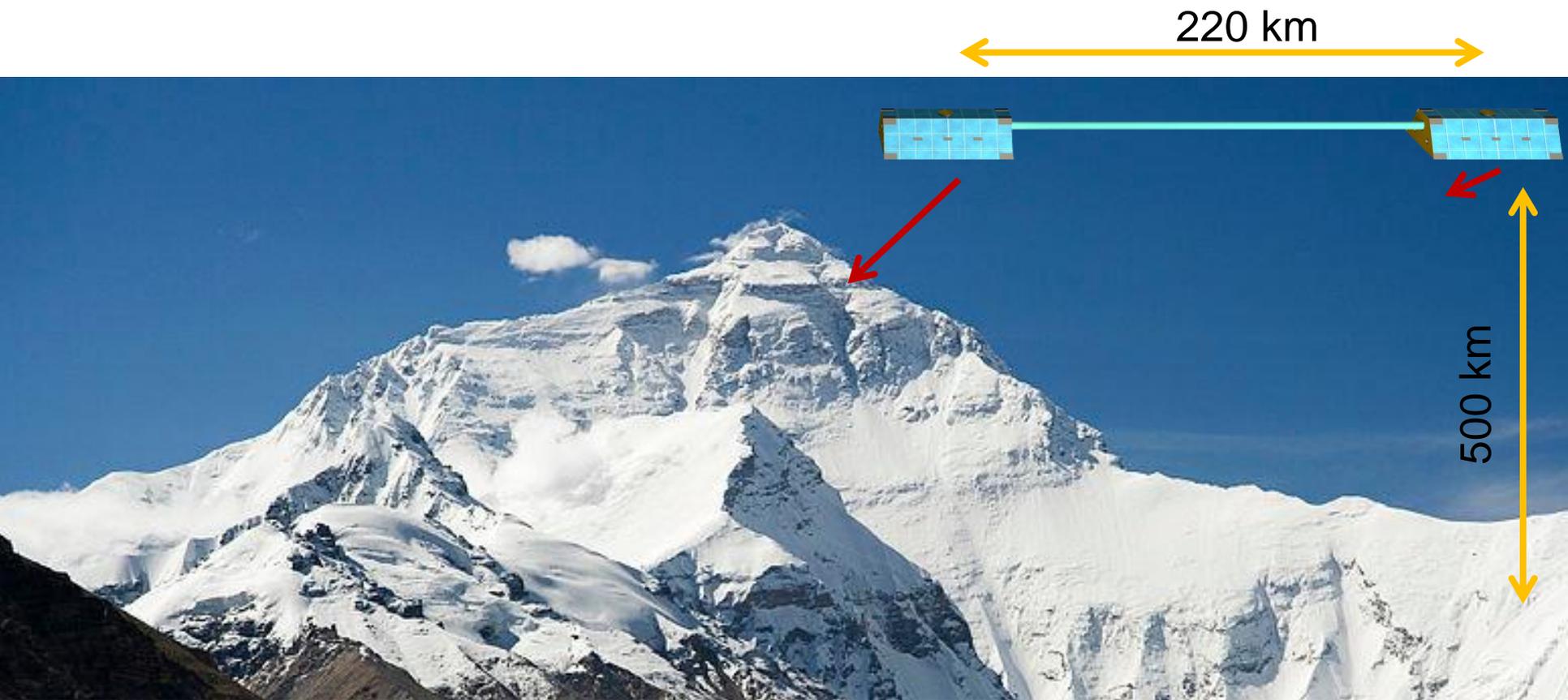
GRACE: Gravity Recovery And Climate Experiment



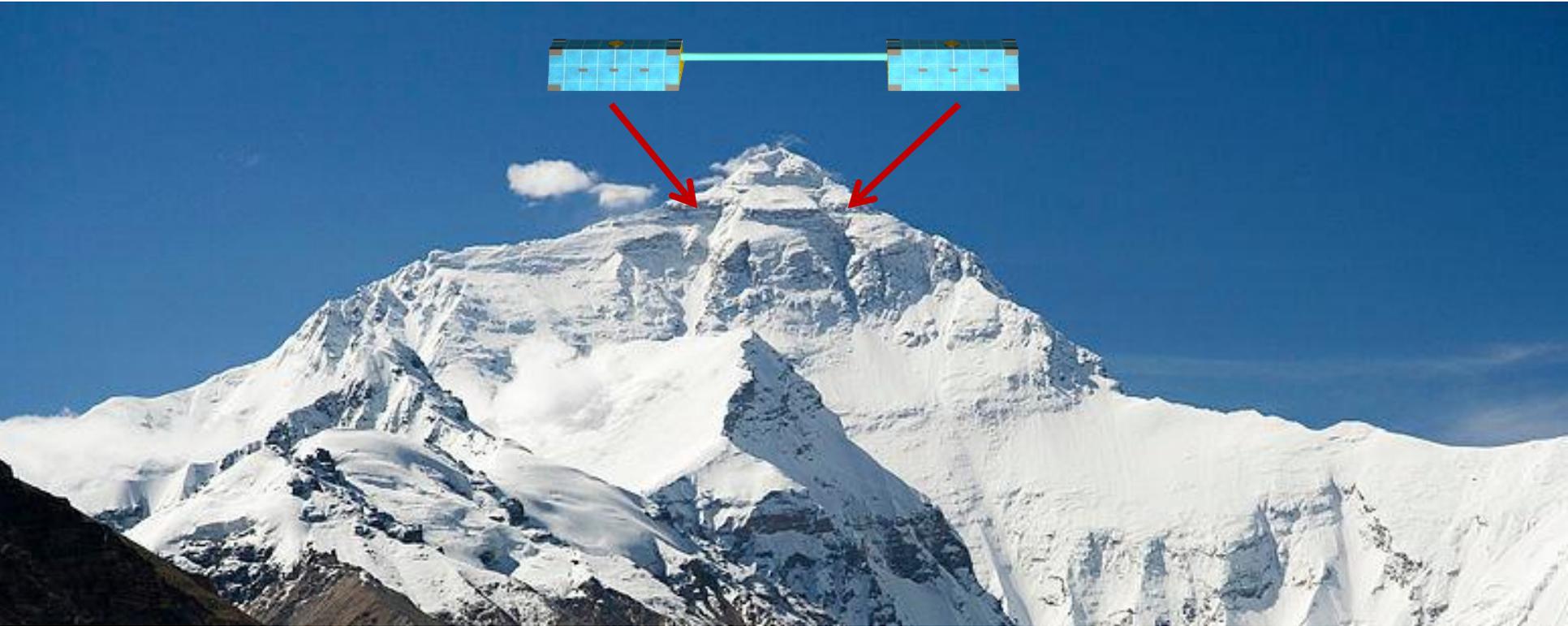
GRACE: Gravity Recovery And Climate Experiment



GRACE: Gravity Recovery And Climate Experiment



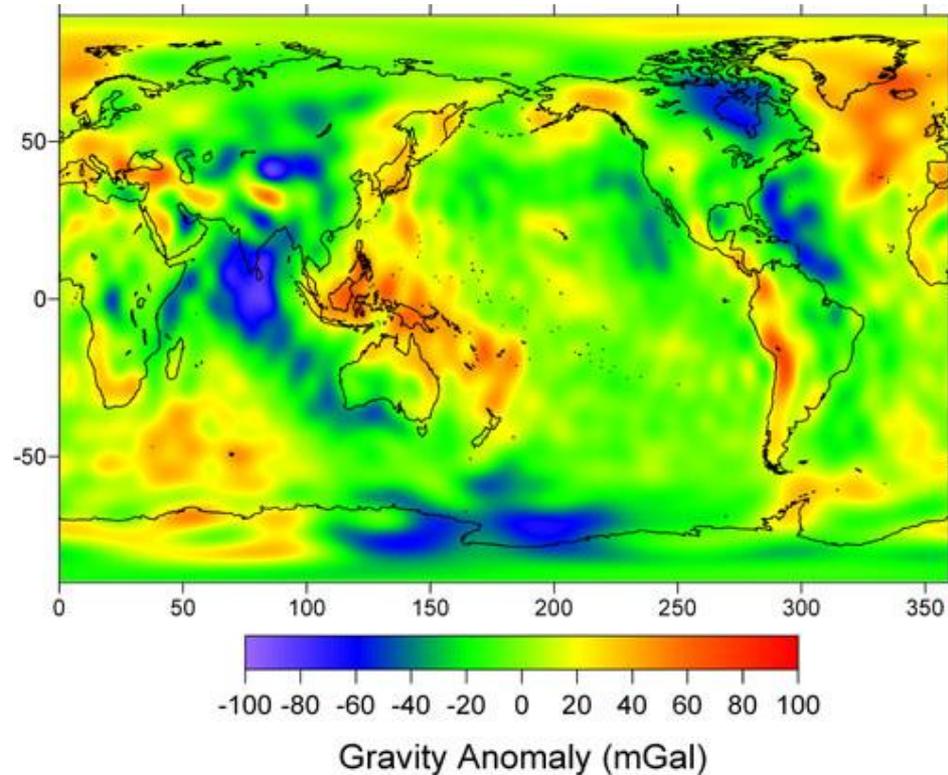
GRACE: Gravity Recovery And Climate Experiment



GRACE: Gravity Recovery And Climate Experiment

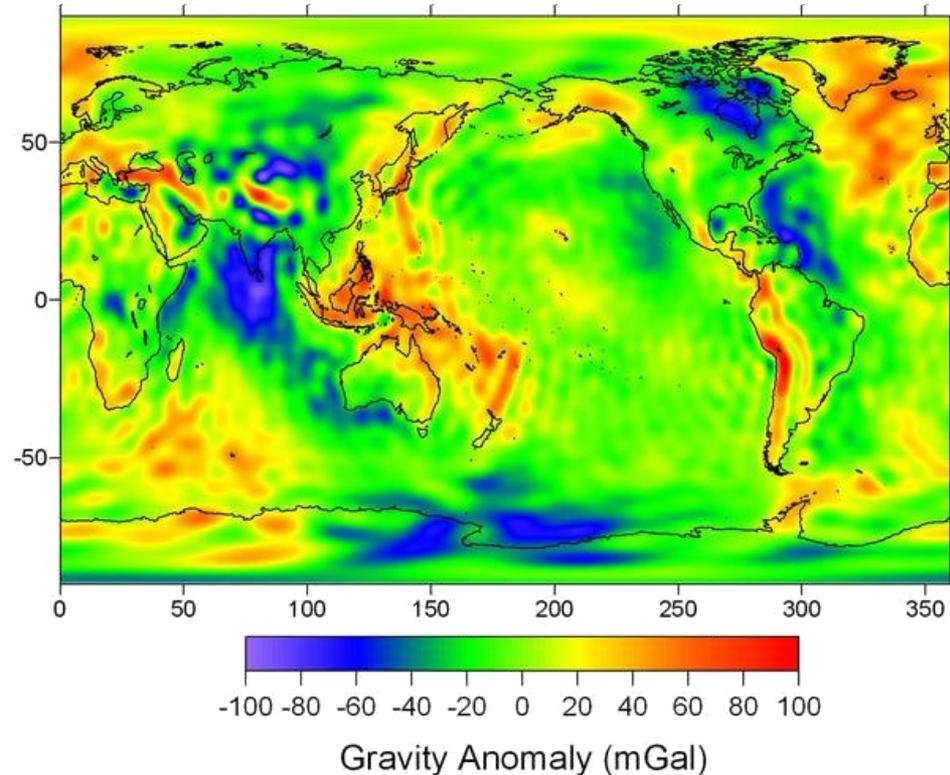


GRACE: Gravity Recovery And Climate Experiment



- ✓ **Schwerefeldanomalien** ermittelt mit Hilfe von Tracking-Daten von **30 Satelliten**, Aufzeichnungszeitraum: **20 Jahre**

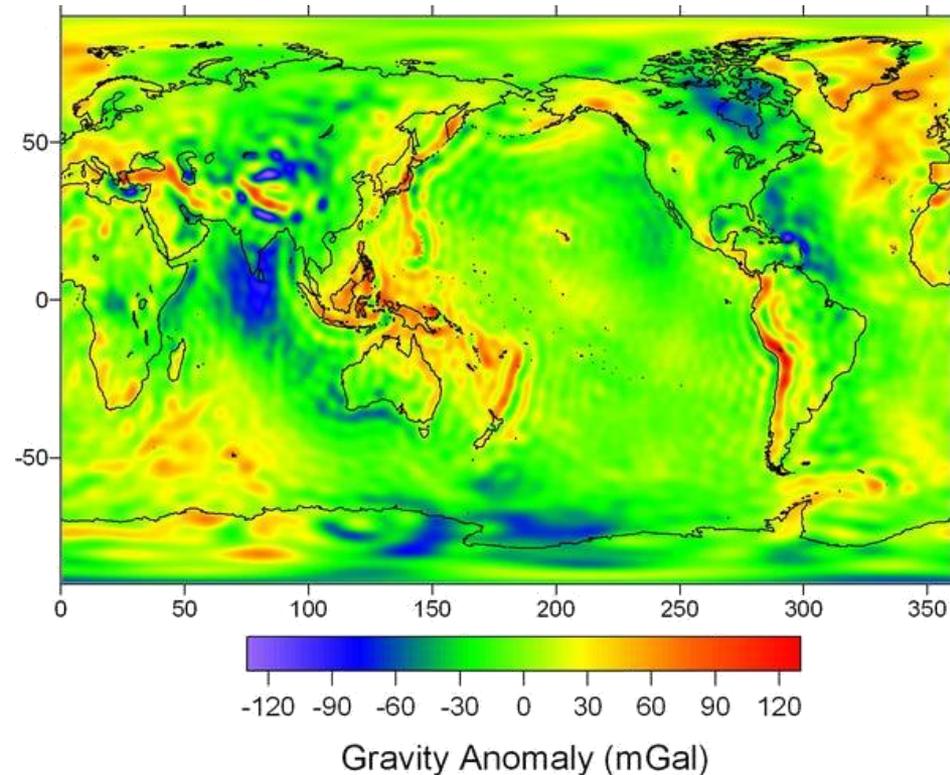
GRACE: Gravity Recovery And Climate Experiment



© GFZ Potsdam

- ✓ **Schwerefeldanomalien** ermittelt aus den Daten der **CHAMP-Mission**, Aufzeichnungszeitraum: **16 Monate**

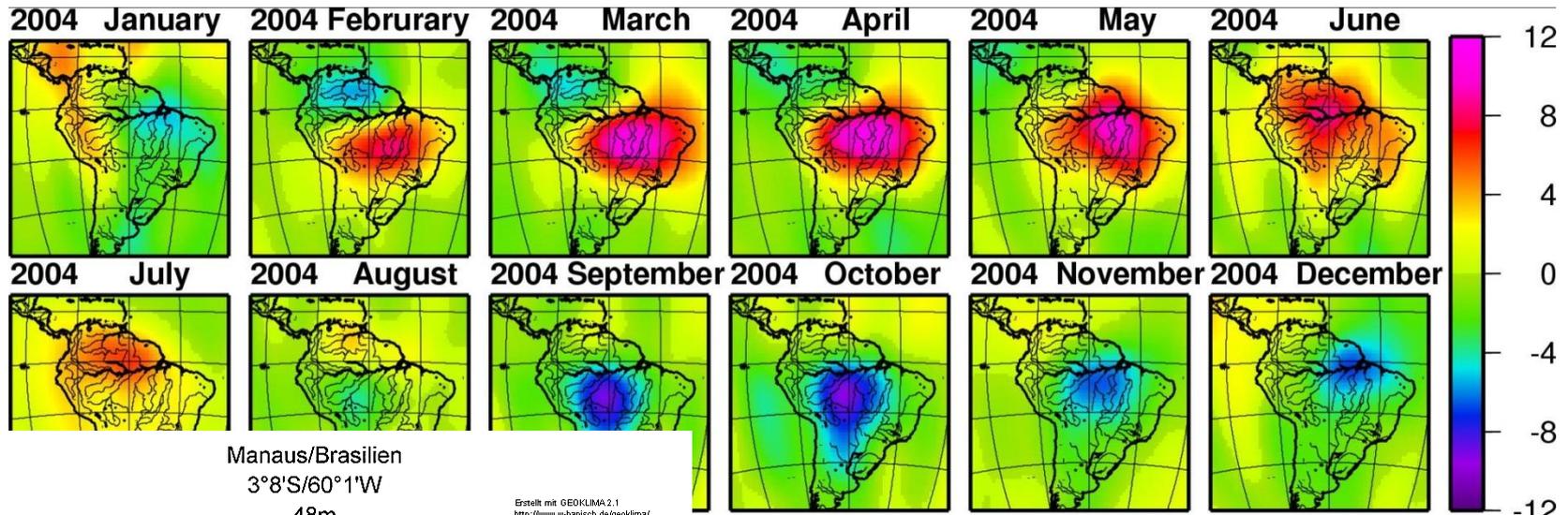
GRACE: Gravity Recovery And Climate Experiment



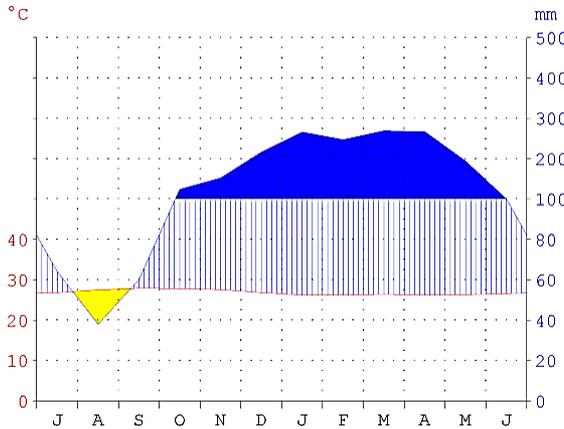
© GFZ Potsdam

- ✓ **Schwerefeldanomalien** ermittelt aus **GRACE**-Daten, Aufzeichnungszeitraum: **39 Tage**

GRACE: Gravity Recovery And Climate Experiment



Manaus/Brasilien
3°8'S/60°1'W
48m



Erstellt mit GEOKLIMA 2.1
<http://www.w-hanisch.de/geoklima/>

Monat	Temp. (°C)	Nied. (mm)
JUL	26,8	64
AUG	27,5	38
SEP	27,9	60
OKT	27,8	124
NOV	27,6	152
DEZ	26,8	216
JAN	26,2	266
FEB	26,2	247
MRZ	26,4	269
APR	26,2	267
MAI	26,3	194
JUN	26,6	100

Temp. -Jahresmittel
26,9 °C

Niederschlagssumme
1997 mm

©NASA/JPL

→ Beispiel Amazonasbecken:
Mit Hilfe der GRACE-Daten können
saisonale **Schwankungen des Grundwasserspiegels** abgebildet werden

GRACE: Gravity Recovery And Climate Experiment

- ✓ Verbesserung der Kenntnis des Erdschwerefelds um 2 Größenordnungen
 - ✓ Schwerefeldanomalien über **2000 km Wellenlänge auf 0.2 mm** genau (von 20mm)
 - ✓ Schwerefeldanomalien über **500 km Wellenlänge auf 4 mm** genau (von 30 mm)
- ✓ **Zeitliche Variationen** des Geoids können mit einer Genauigkeit von **2 – 3 mm** aufgelöst werden (räumliche Auflösung 400 km)

Inhaltsverzeichnis

- ✓ Motivation
- ✓ Bekannte Methoden der Geodäsie
- ✓ **Neue Ansätze: GRACE Follow-On** und relativistische Geodäsie
- ✓ Zusammenfassung und Ausblick

GRACE Follow-On

- ✓ Ziele der GRACE Follow-On Mission (Launch 2017):
 - ✓ Weitere **Aufzeichnung** der hochaufgelösten, monatlichen, globalen Modelle des **Erdgravitationsfelds** (5 Jahre)
 - ✓ Demonstration des **Nutzens und Beitrag von LRI** (Laser Ranging Interferometer) zur Verbesserung des low-low SST (Satellite-to-Satellite Tracking) Messprinzips
- ✓ Erstes „interspacecraft“ Laserinterferometer (NASA/JPL, DLR):
→ **Technologiedemonstrator**
- ✓ Verbesserung gegenüber GRACE: **Abstandsmessung im nm-Bereich** möglich

Inhaltsverzeichnis

- ✓ Motivation
- ✓ Bekannte Methoden der Geodäsie
- ✓ **Neue Ansätze: GRACE Follow-On und relativistische Geodäsie**
- ✓ Zusammenfassung und Ausblick

Relativistische Geodäsie

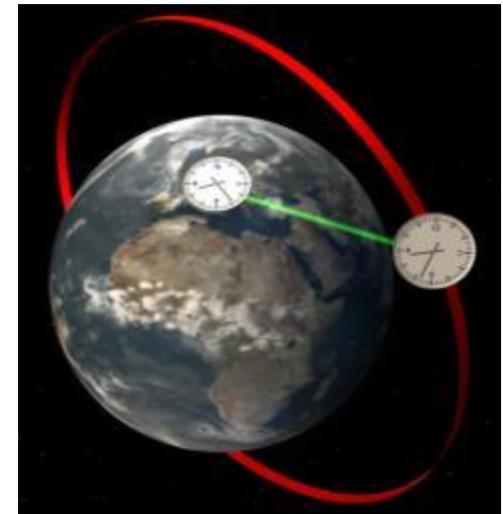
- ✓ Relativistische Effekte spielen **zunehmend wichtige Rolle**
 - ✓ SRT: Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, Zeitdilatation
 - ✓ ART: Einfluss des Gravitationsfeldes auf Raum und Zeit

- ✓ Geodäsie: ART Einfluss auf
 - ✓ Bewegungsgleichung von Satelliten
 - ✓ Signalausbreitung
 - ✓ Uhrengang im Schwerfeld

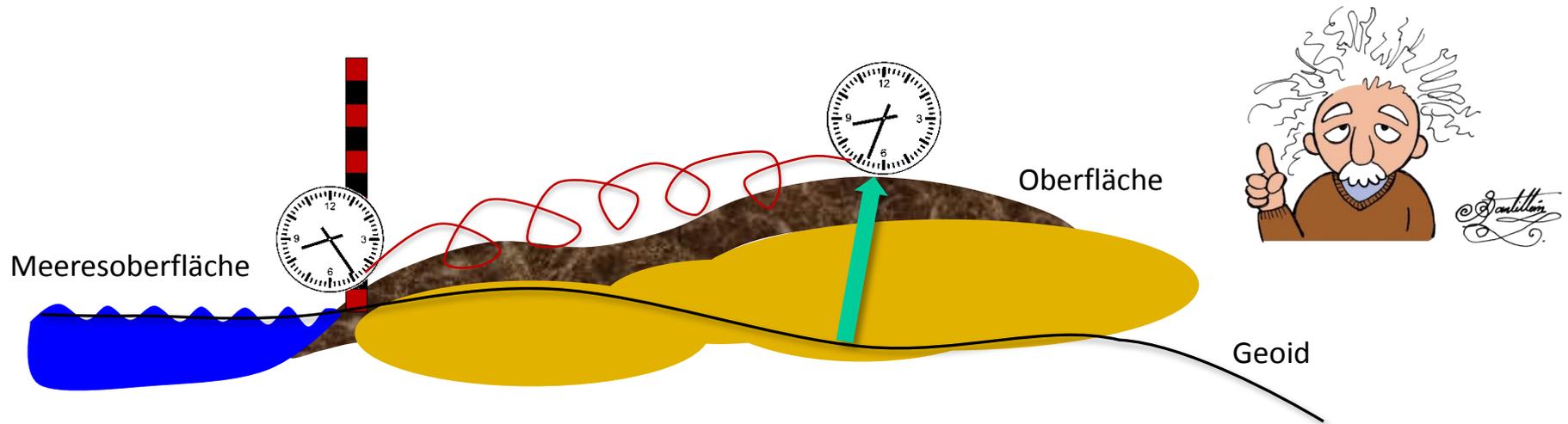
Relativistische Geodäsie

- ✓ Relativistische Effekte spielen **zunehmend wichtige Rolle**
 - ✓ SRT: Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, Zeitdilatation
 - ✓ ART: Einfluss des Gravitationsfeldes auf Raum und Zeit

- ✓ Geodäsie: ART Einfluss auf
 - ✓ Bewegungsgleichung von Satelliten
 - ✓ Signalausbreitung
 - ✓ **Uhrengang im Schwerfeld**



Relativistische Geodäsie



- ✓ Vergleich von geometrischen Geoidmodellen (EGM2008 bzw. WGS84) mit Satellitendaten liefert Abweichungen im dm-Bereich
- ✓ Ultrapräzise Atomuhren (Genauigkeit: 10^{-18} s) eröffnen neue Möglichkeiten der Höhenmessung
- ✓ Einfluss der Gravitation auf „die Zeit“ messbar

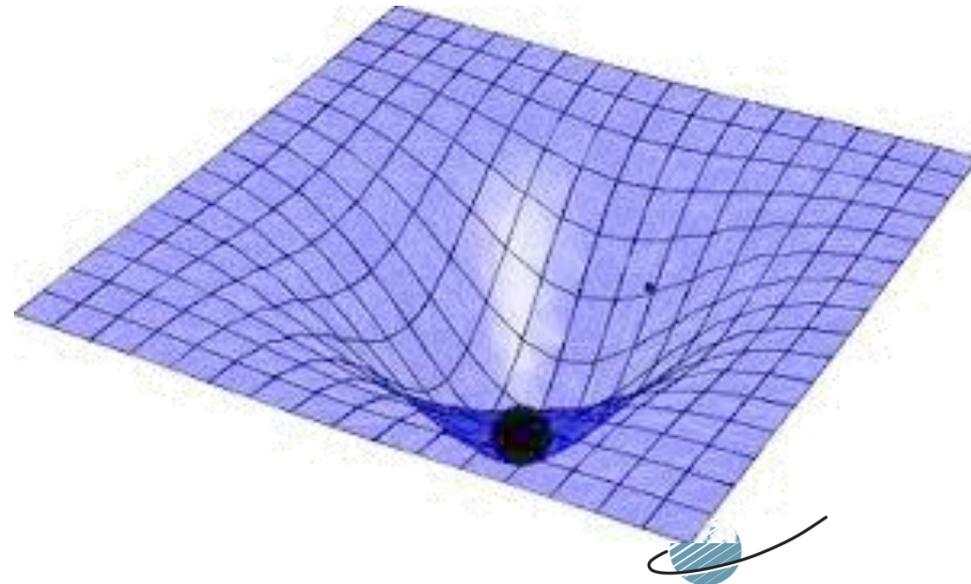
Relativistische Geodäsie

✓ Raum und Zeit:

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

Minkowski: $ds^2 = -c^2 dt^2 + dr^2 + r^2 (d\theta^2 + \sin^2(\theta) d\phi^2)$

Schwarzschild: $ds^2 = -c^2 \left(1 - \frac{2Gm}{c^2 r}\right) dt^2 + \left(1 - \frac{2Gm}{c^2 r}\right)^{-1} dr^2 + r^2 (d\theta^2 + \sin^2(\theta) d\phi^2)$



Relativistische Geodäsie

✓ Raum und Zeit:

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

Minkowski: $ds^2 = -c^2 dt^2 + dr^2 + r^2 (d\theta^2 + \sin^2(\theta) d\phi^2)$

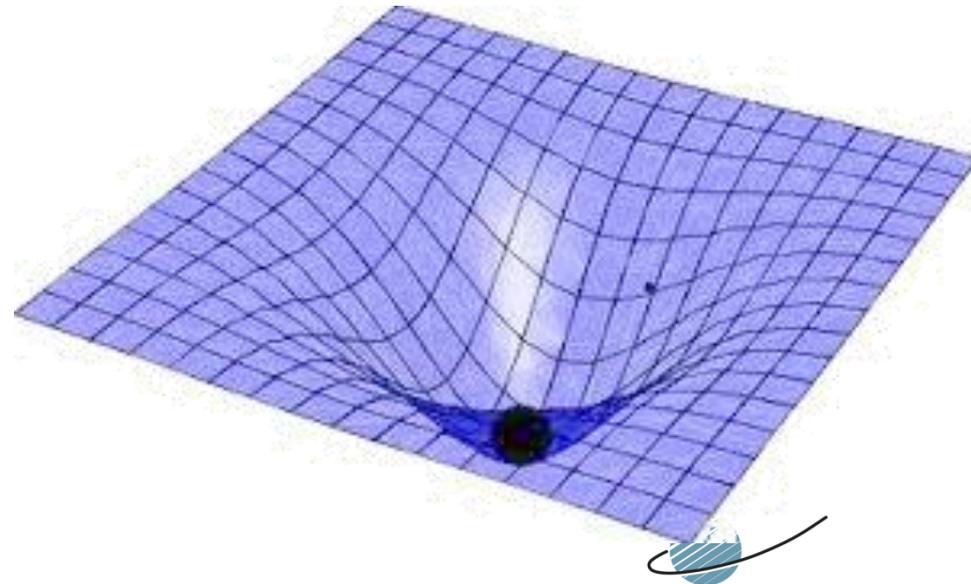
Schwarzschild: $ds^2 = -c^2 \left(1 - \frac{2Gm}{c^2 r}\right) dt^2 + \left(1 - \frac{2Gm}{c^2 r}\right)^{-1} dr^2 + r^2 (d\theta^2 + \sin^2(\theta) d\phi^2)$

✓ Zeitdilatation im Schwerfeld der Erde

$$\tau = \sqrt{1 - \frac{r_s}{r}} t_0 = \sqrt{1 + \frac{2\phi}{c^2}} t_0$$

$$r_s = \frac{2GM}{c^2} \text{ (Schwarzschildradius)}$$

$$\phi = -\frac{GM}{r}$$



Relativistische Geodäsie

- ✓ Atomarer Übergang zwischen zwei Niveaus: Emission von Licht mit $h\nu = \frac{h}{\tau}$

$$t(r) = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \frac{r_s}{r}}} > \tau$$

$$\nu(r) = \frac{1}{t(r)} = \sqrt{1 - \frac{r_s}{r}} \frac{1}{\tau} = \sqrt{1 - \frac{r_s}{r}} \nu < \nu$$

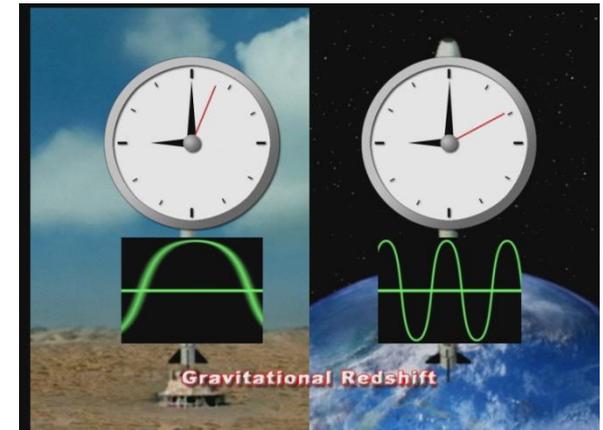
$$\lambda(r) = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{r_s}{r}}} \lambda > \lambda$$

- ✓ Folge: Uhren ticken unterschiedlich schnell an Orten mit (τ , ν und λ) und ohne ($t(r)$, $\nu(r)$ und $\lambda(r)$) Einfluss eines Schwerfeldes

Relativistische Geodäsie

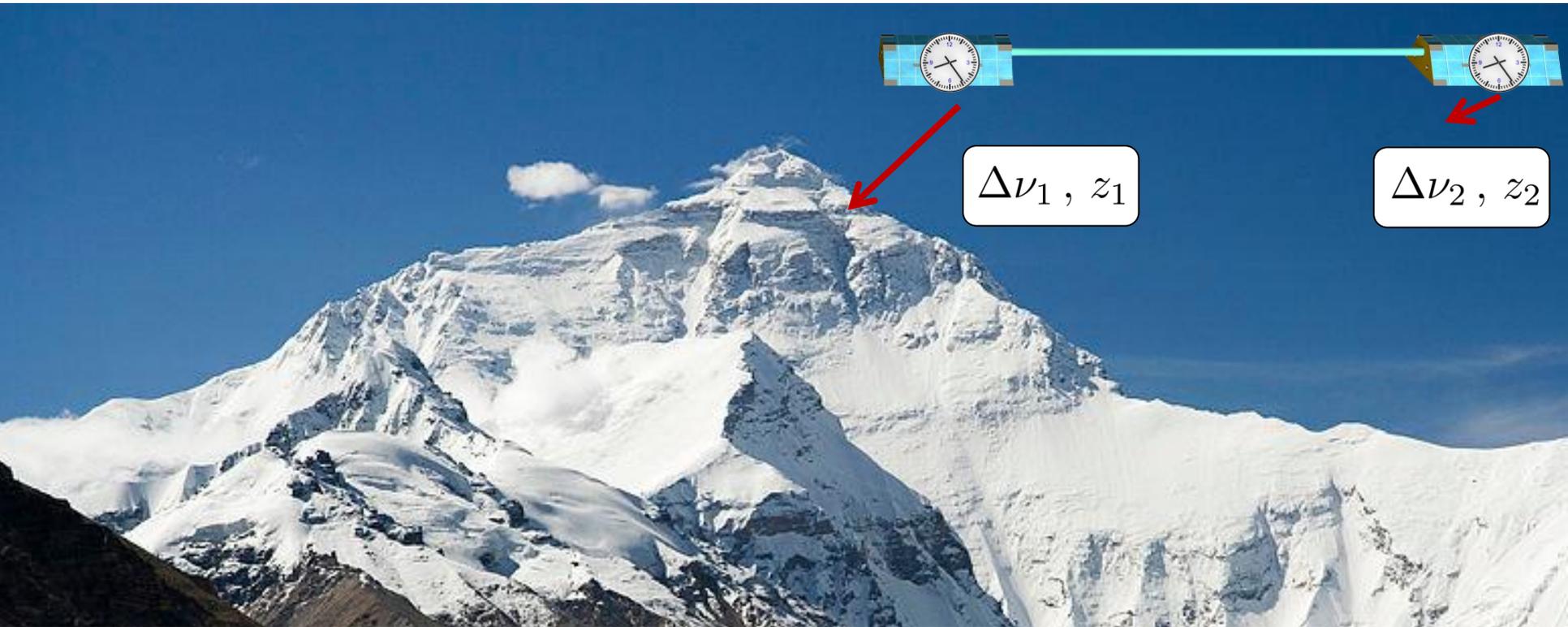
- ✓ Messung der Rotverschiebung:
2 Uhren in unterschiedlichen Höhen in einem Schwerefeld: r_1 und $r_2 = r_1 + h$ (mit $h \ll r_1$)

$$\begin{aligned}\nu(r_2) &= \nu(r_1 + h) \\ &\approx \sqrt{1 - \frac{r_s}{r_1}} \nu(r_1) - \frac{1}{2} \frac{\nu(r_1) \cdot r_s}{r_1^2 \sqrt{1 - \frac{r_s}{r_1}}} \cdot h \\ \Rightarrow \Delta\nu &= \frac{1}{2} \frac{\nu(r_1) \cdot r_s}{r_1^2 \sqrt{1 - \frac{r_s}{r_1}}} \cdot h\end{aligned}$$

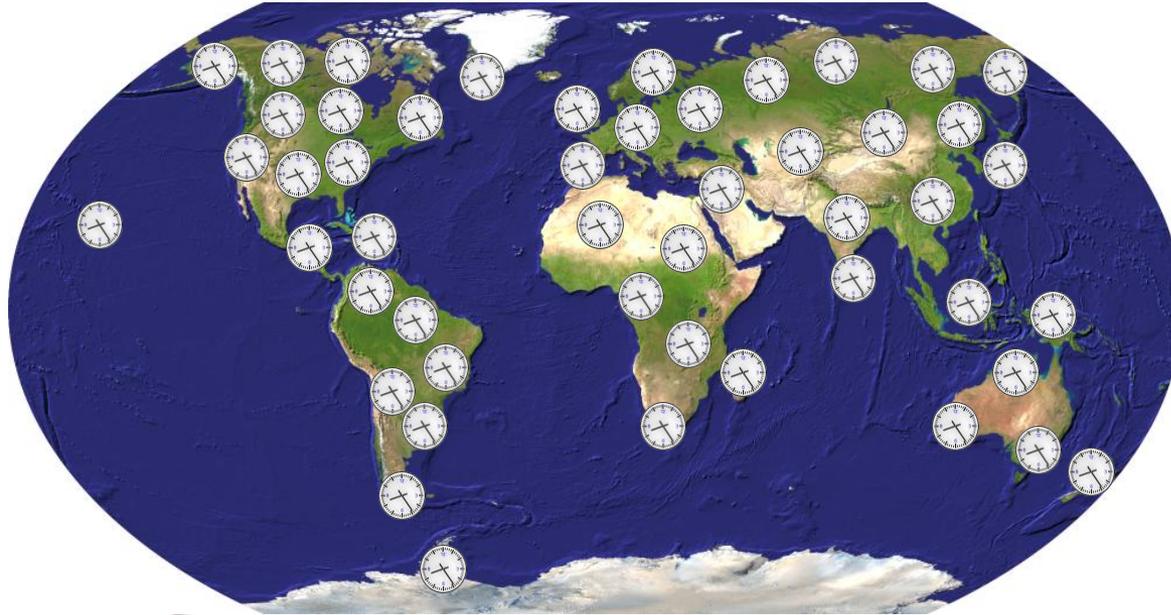


- ✓ Für einen Satelliten auf einer Umlaufbahn mit einer Flughöhe von 200km ($r_{\text{Erde}} = 6350$ km, $r_s = 9$ mm) ergibt sich für einen Wasserstoffmaser (1.4 GHz Tickrate) eine gravitative Rotverschiebung von ca. $z = 2.14 \cdot 10^{-11}$, $z = (\lambda(r_2) - \lambda(r_1)) / \lambda(r_1)$
Das entspricht einer relativen Frequenzänderung von ca. 0.03 Hz.

Relativistische Geodäsie



Relativistische Geodäsie



- ✓ Verbesserung: „Chronometrisches Leveling“ in **cm-Genauigkeit über große Distanzen**
- ✓ Schaffen von Grundlagen für ein global einheitliches Höhensystem
- ✓ **Uhrenbasiertes Höhensystem (“Relativistisches Geoid”) als neues Referenzsystem in der Geodäsie**

Inhaltsverzeichnis

- ✓ Motivation
- ✓ Bekannte Methoden der Geodäsie
- ✓ Neue Ansätze: GRACE Follow-On und relativistische Geodäsie
- ✓ **Zusammenfassung und Ausblick**

Zusammenfassung und Ausblick

- ✓ Ziel der Satellitengravimetrie ist es,
 - ✓ ein globales Bild von **dynamischen Prozessen auf der Erde** zu erstellen, nicht „nur“ das Schwerefeld der Erde zu vermessen
 - ✓ **klimatische Trends** zu ermitteln und fundierte Vorhersagen treffen zu können (Grundlage zur Entwicklung und Anwendung von Maßnahmen)

- ✓ Zukunft:
 - ✓ Verbesserung der Technologie (LRI, Uhren)
 - ✓ Entwicklung neuer Referenzsysteme und Modelle unter Berücksichtigung von der SRT und ART sowie neuer Messdaten

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Fragen?