

# Eine Reverenz dem Referenzsystem

H. Sünkel  
TU Graz

## Bezugssysteme:

- Mutter und Vater
- Familie und Gesellschaft
- Glaube (10 Gebote) und Kirche
- Staat
- Militär
- Schule, Universität, Akademie
- Studentische Verbindung, Vereine
- Sprache, Kultur
- Währung
- Zahlensystem
- Zeitsystem, Kalender
- Maßsysteme
- Karten
- Höhensystem

## Bezugssysteme: Eigenschaften, Erwartungen

- Qualität
- Stabilität
- Nachhaltigkeit
- Glaubwürdigkeit, Verlässlichkeit
- Verleiht Orientierung
- Möglichst universell gültig
- Konvertierbarkeit

## Bezugssysteme: Problemfälle

- Erziehungsdefizite, Zerschneiden familiärer Banden
- Qualitätsverlust (Politik, Schule, Kirche, ...)
- Währungen / Banken: Instabilität, Einlagensicherung
- Normungs- und Konvertierungsdefizite
- Navigationssystem: Fehlerhaftes Kartenmaterial

**Letztlich: wir alle sehnen uns nach Bezugssystemen**

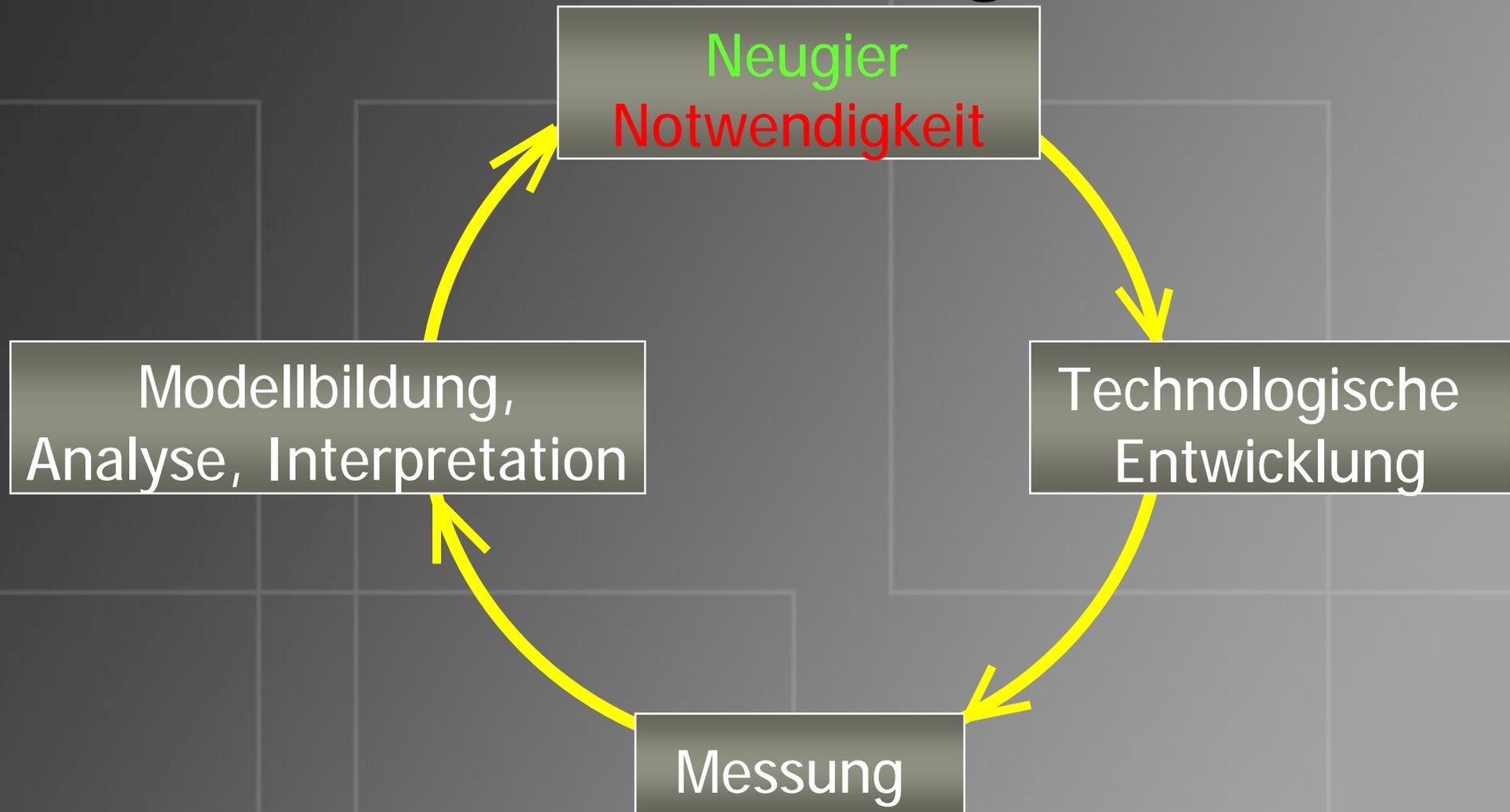
# Terra incognita

Form, Größe, ... ?

... und was die Welt im Innersten zusammenhält ...

© 2005 Thomas Zeug  
SoeinSchmarn.de

# Forschung, Entwicklung, Anwendung



## Geschichte:

- Babylonier, Ägypter, Griechen:  
Figur der Erde, Kugelform (Pythagoras, 6. Jhdt. v. Chr.)

- Eratosthenes:

geb. in Kyrene (heute: Lybien),  
~ 275 – 194 v. Chr.

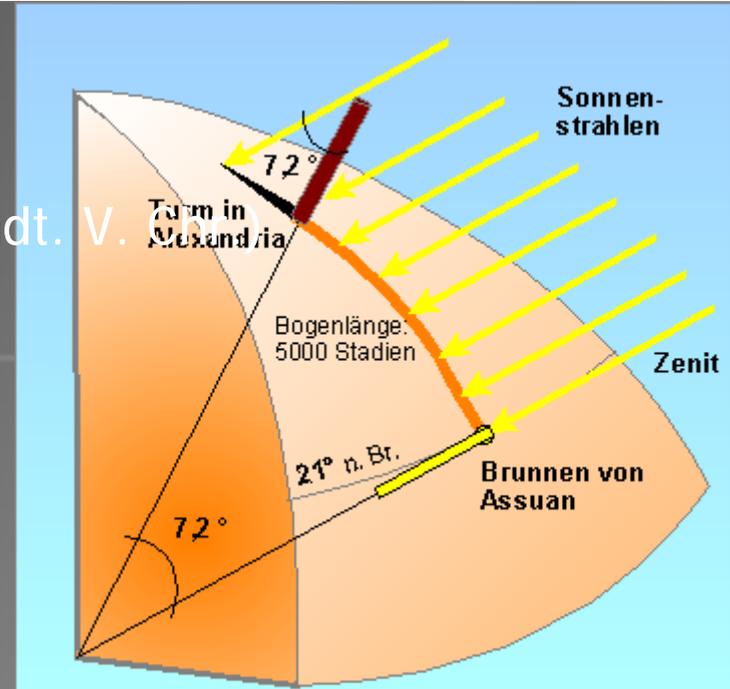
Studium in Athen; König Ptolemaios III von  
Ägypten holt ihn um ~245 nach Alexandria;  
Lehrer des Königssohnes  
Mathematiker, Astronom, ...

50 Jahre Direktor der Bibliothek von Alexandria  
Briefkontakte mit Archimedes et al.

„Über die Vermessung der Erde“:

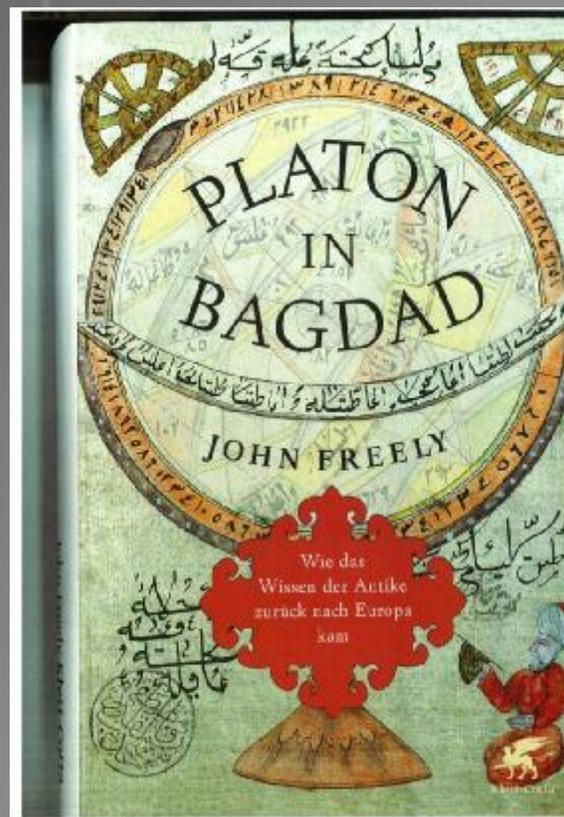
Schiefe der Ekliptik, Größe und Erdentfernung von Sonne und Mond,  
Kalenderreform (Schalttag alle 4 Jahre!);

Erdumfang +/- 10% (252.000 Stadien)



## Geschichte:

- Al-Ma´mun (Araber, 786 - 833):  
Kalifat der Abbasiden erreicht den kulturellen Höhepunkt:  
Begründung des „Haus der Weisheit“ in Bagdad im Jahr 830  
Erdumfang +/- 1%



# Erdradiusbestimmungen „light“:

Bogenlänge & Winkel:

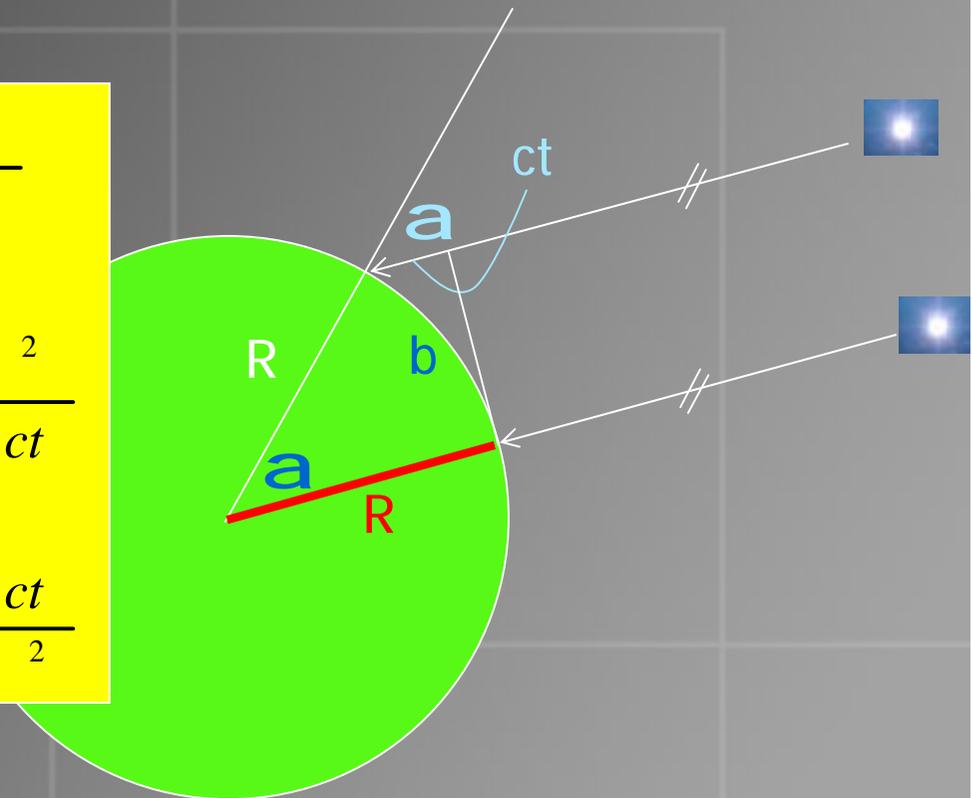
$$R = \frac{b}{a}$$

Bogenlänge & Zeit:

$$R \cong \frac{b^2}{2 ct}$$

Winkel & Zeit:

$$R \cong \frac{2 ct}{a^2}$$



Jean Francois Fernel (Franzose, 1497 – 1558): 100 km langer Meridianbogen von Paris nach Amiens: Erdradius 6370 km  
Genauigkeit: +/- 0,1% (Zufallstreffer?)

## Ab 17. Jhdt.: Kugel à Ellipsoid Abplattung an den Polen oder am Äquator?

J. Cassini, „*Grandeur et Figure de la Terre*“ (1720):  
Abplattung am Äquator ! (Von Physikern heftig kritisiert)

## à Expeditionen der franz. Akademie der Wissenschaften

- Lappland: 1736 – 1737
  - 4 Mitglieder der Akademie: de Maupertuis (Leiter), Clairaut, Le Monnier, Camus; Celsius
- Peru: 1735 – 1744
  - 3 Mitglieder der Akademie: Godin, Bouguer, La Condamine

Streit zwischen Physikern und Geodäten endet eindeutig zu Gunsten der Physiker:

Erde ist an den Polen abgeplattet !

à Voltaire: „*Vous avez aplati, les pôles et les Cassini*“

Ergebnisse der beiden Expeditionen und des französischen Meridianbogens (1740):

Land	Beobachter	Geogr. Breite	Meridianbogen (km)	Krümmungsradius (km)
Ecuador/Peru	Bouguer	01°31' S	110,577	6.335,5
Frankreich	Jean Picard	49°13' N	111,212	6.371,9
Lappland	Maupertuis	66°20' N	111,949	6.414,0

## Weitere zwei Jahrhunderte Meridianbogenmessung:

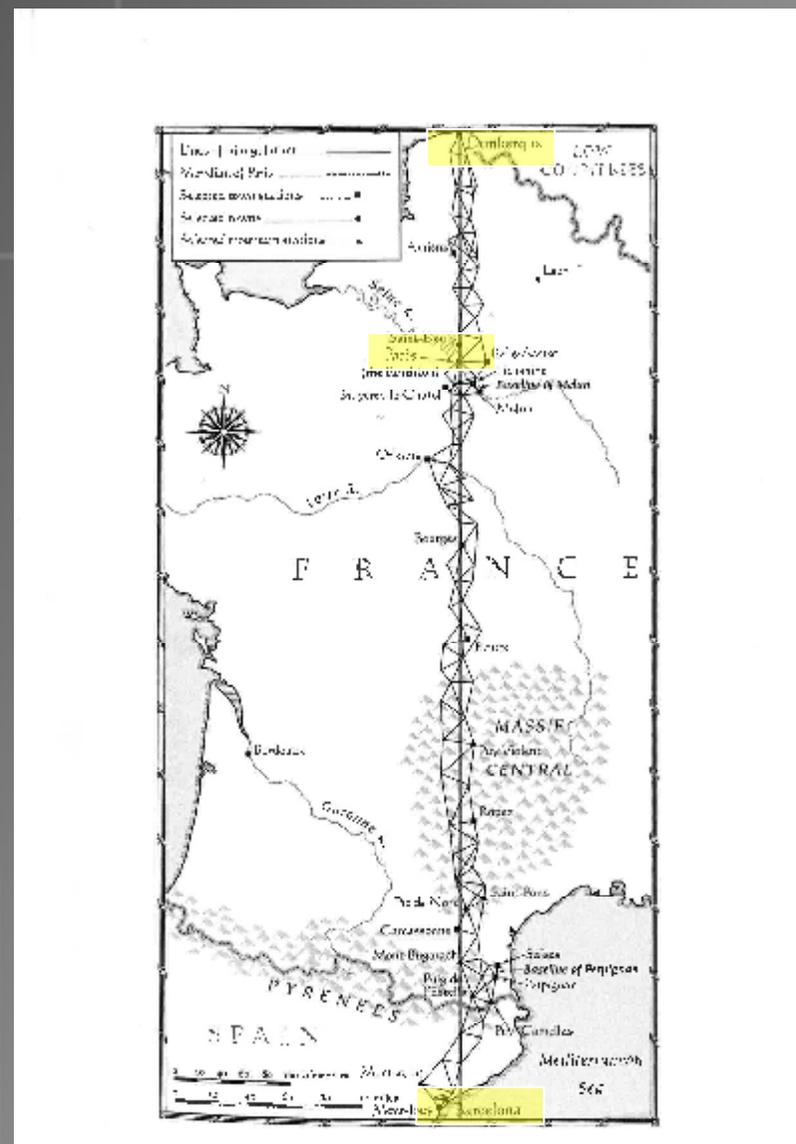
Zeitraum	Ort	Länge	Leitung	Kommentar
1751 – 1753	Rimini - Rom	2°	Boscovic, Lemaire	1. Ausgleichung
1761 – 1765	Brünn – Wien - Varasdin	3°	Liesganig	
1792 – 1798	Dünkirchen – Paris - Barcelona	9°	Delambre, Méchain	
1821 – 1823	Göttingen - Altona	2°	Gauß	Hannover
1783 – 1858	Shetland – Isle of Wight	9°		engl. Triangulation
1800 – 1842	Himalaya – Kap Komorin	23°	Everest	Indien
1821 – 1852	Hammerfest - Donaumündung	25°	Struve, Tenner	
~ 1900	Meridiane	20°		östl. USA
1899 - 1906	Kolumbien – Ecuador - Peru	6°		Peru-Meridian
1906	Shetland - Algier	27°		Pariser Meridian
1922	Großhain – Kremsmünster - Pola	7°	Hopfer	Berliner Meridian
1922	Eismeer - Mexiko	50°		später verlängert
~ 1925	Tanganjika - Kapland	25°	Schuhmann	Äquatorachse +/- 100 m !
~ 1940	Kairo – Tanganjika - Kapstadt	65°	Gill	Afrika-Meridian
~ 1940	Kurilen - Südjapan	20°		Japan

# Meridianbogen Dünkirchen – Paris - Barcelona:

Bogenlänge: 9°

Beobachtungen: 1792 – 1798

Leitung: Delambre, Méchain



## Verbindung von Geometrie und Physik:

These – Antithese – Synthese:

Synthese von Clairaut:

$$f + f^* = \frac{5}{2} \frac{w^2 a}{g_a}$$

P.S. Laplace: *„Die Bedeutung dieses Ergebnisses und seine Eleganz verdient einen Platz unter den schönsten mathematischen Werken.“*

## Das metrische System:

1791 Gründung einer Kommission für Maß und Gewicht in Paris

## C.F. Gauss (1777 – 1855):

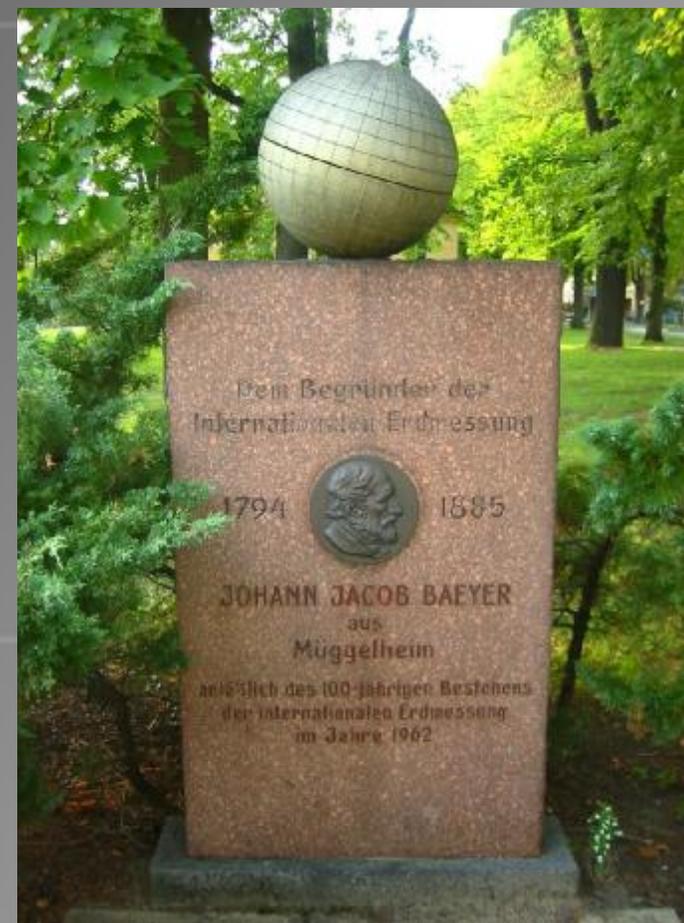
- Konsistente Verarbeitung überschüssiger Beobachtungen: Methode der kleinsten Quadrate
- Geometrie gekrümmter Flächen: Flächentheorie, Berechnungen auf gekrümmten Flächen
- Abbildung von gekrümmten Flächen (mit nicht verschwindender Gauss'scher Krümmung): Abbildungstheorie, konforme Abbildung



# Die mitteleuropäische Gradmessung:

**1862:** Gründung der  
Mitteleuropäischen Gradmessungs-  
Kommission

Initiative: Deutschland und Österreich  
Leiter: Johann Jacob Baeyer



Wien, 2012-09-12

150 Jahre Mitteleuropäische Gradmessung

H. Sünkel

1862: Gründung der Internat. Assoziation für Geodäsie (IAG)

1867: Erweiterung der mitteleuropäischen zur europäischen Gradmessung

Seit 1910 Übergang zu Netzlösungen (keine getrennte Beobachtung und Auswertung von N-S und O-W – Profilen)  
Erstmals in Europa und USA

1919: Gründung der Internationalen Union für Geodäsie und Geophysik (IUGG)

Seit den Siebzigerjahren Kombination der 2D – Netze mit satellitengeodätischen 3D – Messungen

## 8 Internationale Assoziationen der IUGG:

Cryospheric Sciences ([IACS](#))

Geodesy ([IAG](#))

Geomagnetism and Aeronomy ([IAGA](#))

Hydrological Sciences ([IAHS](#))

Meteorology and Atmospheric Sciences ([IAMAS](#))

Physical Sciences of the Ocean ([IAPSO](#))

Seismology and Physics of the Earth's Interior ([IASPEI](#))

Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior ([IAVCEI](#))

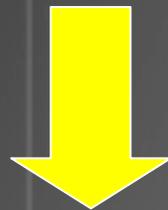
## Referenzellipsoide:

Jahr	Institution	a	1/f
1830	Airy	6.377.563,400	299,3249646
1830	Everest (Indien)	6.377.276,345	300,8017
1841	Bessel	6.377.397,155	299,1528128
1866	Clarke	6.378.206,400	294,9786982
1880	Clarke / IGN	6.378.249,150	293,465
1924	Hayford / International	6.378.388,000	297,0
1940	Krasowski	6.378.245,000	298,3
1967	International	6.378.165,000	298,25
1969	SAD (Südamerika)	6.378.160,000	298,25
1972	World Geodetic System (WGS)	6.378.135,000	298,26
1980	Geodetic Reference System (GRS)	6.378.137,000	298,257222
1984	World Geodetic System (WGS)	6,378.137,000	298,257223563

**Globale Dimension**

**Komplexe Problematiken**

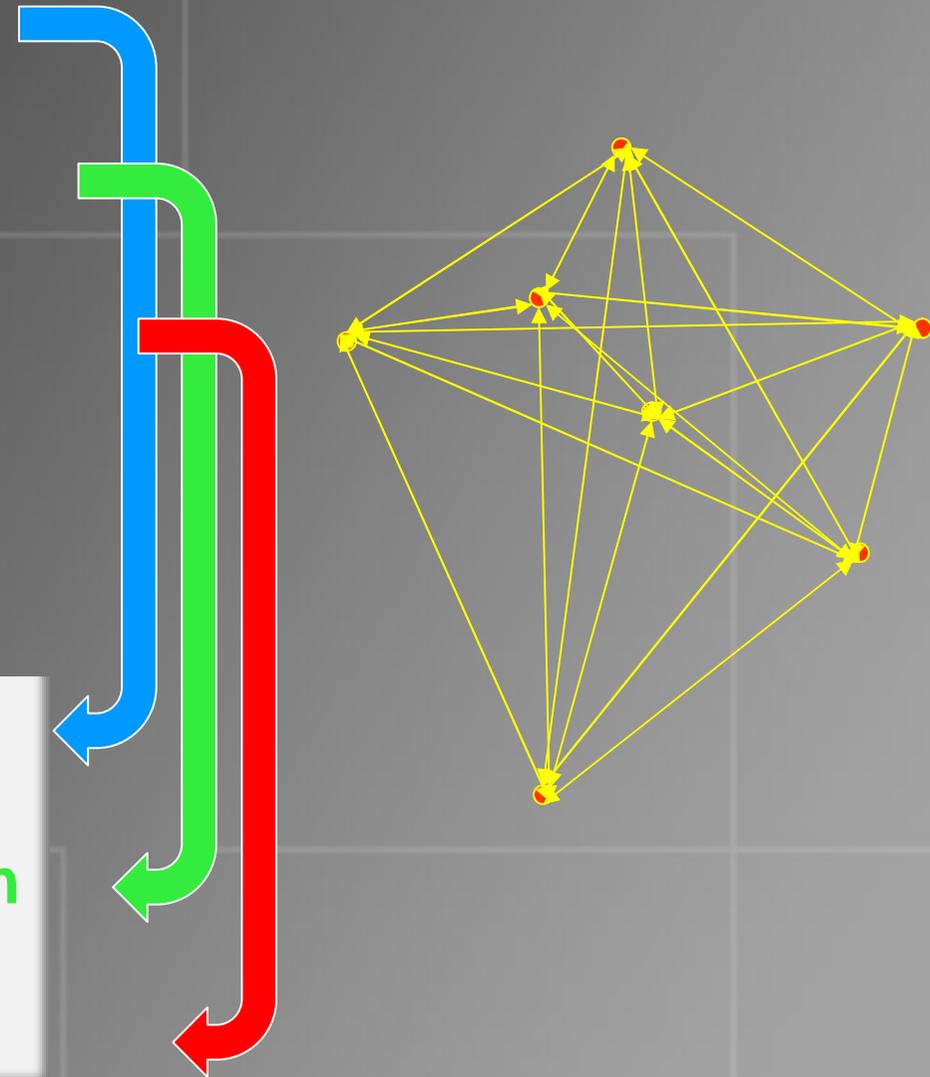
**Forschung ist Expedition**



**Internationalität**

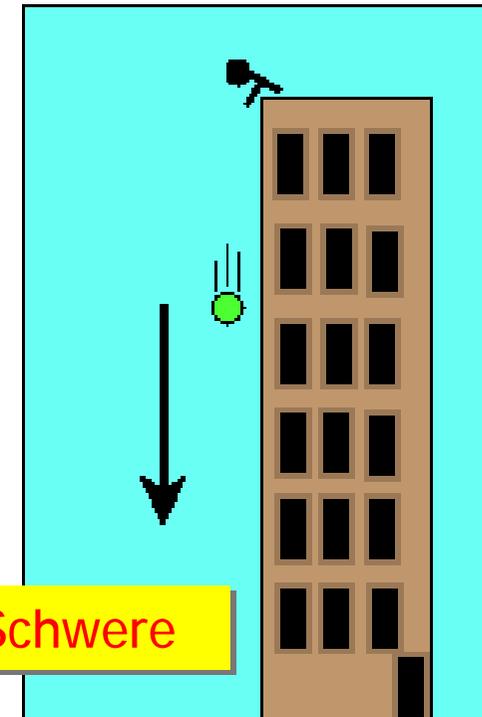
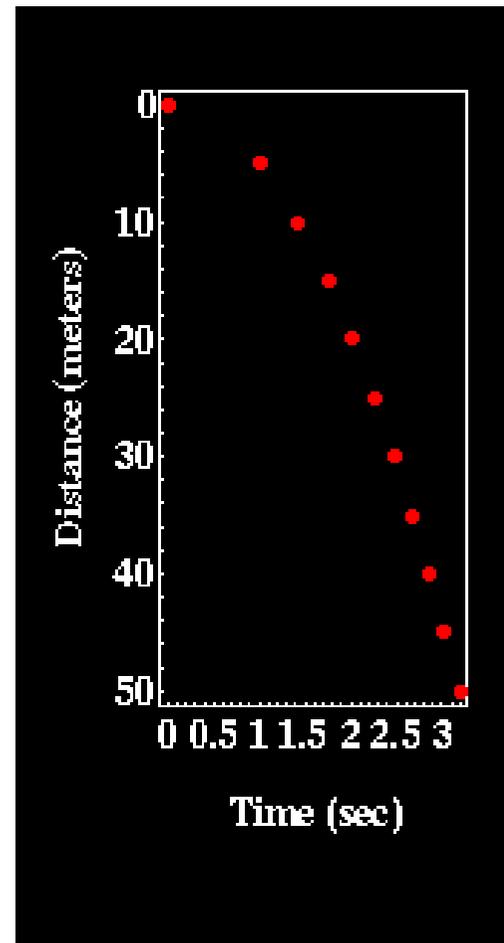
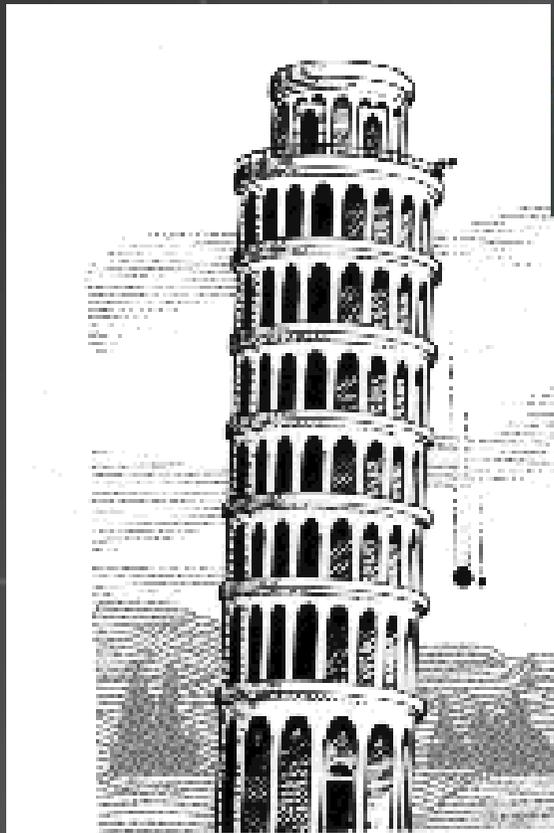
**Interdisziplinäre Kooperation**

**Intellektuelle Freiräume**



# Raum – Zeit - Gravitation

$$\mathbb{R}^3 - \nabla V = 0$$



Schwere

$$z = \frac{g}{2} t^2$$

## Weiterentwicklung von Bezugssystemen:

- Steigerung der Qualität
  - Lokal → regional → global
  - Exzentrisch → geozentrisch
  - Geometrie → Geometrie & Physik
  - Berücksichtigung der Zeitvariabilität (ITRF)
  - Bedeutung von Raumtechnologien (SLR, VLBI, GPS)
- 
- Globales Geoid mit hoher Genauigkeit und Auflösung in Raum und Zeit als globales Höhen-Referenzsystem (= globale Horizontale im Meeresniveau)

## World Geodetic System 1984:

### 2 geometrische Parameter:

$$a = 6\,378\,137 \text{ m}$$

große Halbachse des Bezugsellipsoids

$$f = 1/298.257\,223\,563$$

Abplattung des Bezugsellipsoids

### 2 physikalische Parameter:

$$GM = 3\,986\,004.418\,10^8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$$

geozentrische Gravitationskonstante

$$\omega = 7\,292\,115\,10^{-11} \text{ rad s}^{-1}$$

Winkelgeschwindigkeit der Erde

## System und Realisierung:

WGS84:

Conventional Terrestrial Reference System (CTRS)

ITRFxx:

International Terrestrial Reference Frame (Realisierung)

# Pageos Weltnetz (1969): +/- 5m





## Technologische Exzellenz

- Extrem hohe Genauigkeit (2mm)
- Extrem hohe Datenrate (2 kHz)
- Sehr hohe Langzeit-Stabilität
- Möglichkeit der Detektion der Satellitenrotation
- Vermessung der Bahnen von Weltraummüll
- Satelliten-Quantenkryptographie ?

Satellite Laser Ranging System, Graz-Lustbühel

Foto: J. Weingrill, IWF / ÖAW

# Satellite Laser Ranging (SLR)

*SLR* zur Realisierung eines globalen geozentrischen Koordinatensystems mit höchster Genauigkeit ( $< 1$  cm)

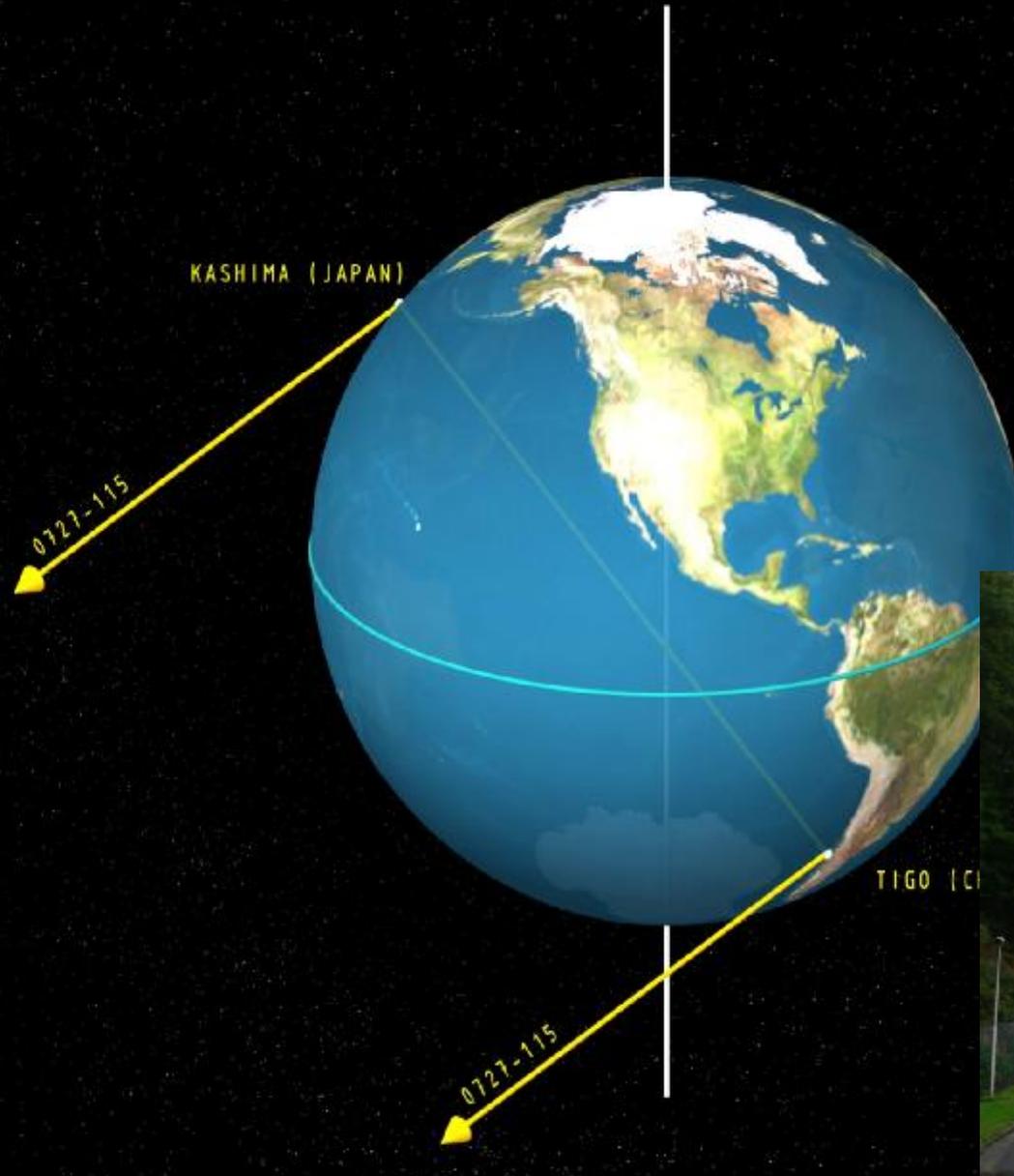
*SLR* zur Überwachung der Erdrotation und Plattentektonik

*SLR* zur Bahnbestimmung von Satelliten

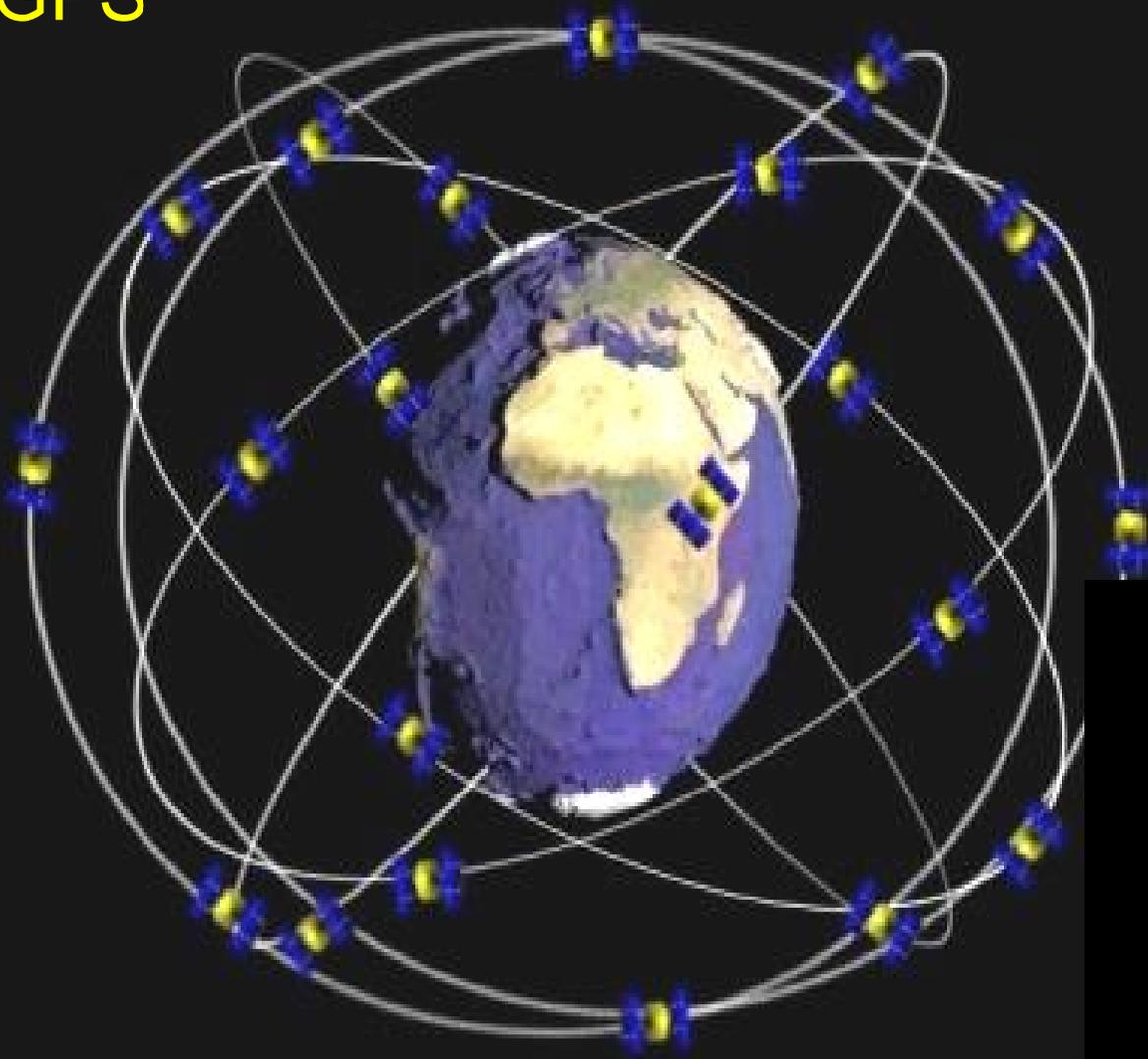
*SLR* zur Bestimmung des Gravitationsfeldes der Erde

*SLR* zur Verifikation der ART (Lense-Thirring Effect: Nachziehen der Raumzeit aufgrund der Rotation des Erdkörpers)

# VLBI (Very Long Baseline Interferometry)

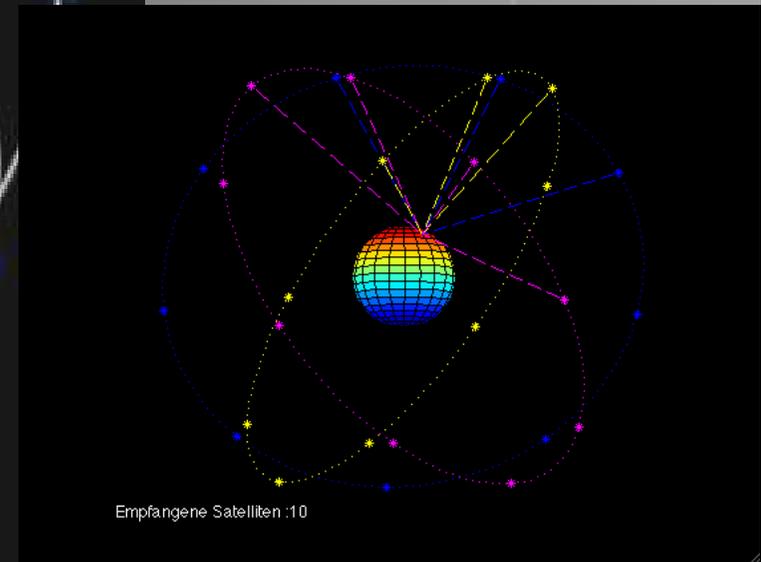


# GPS

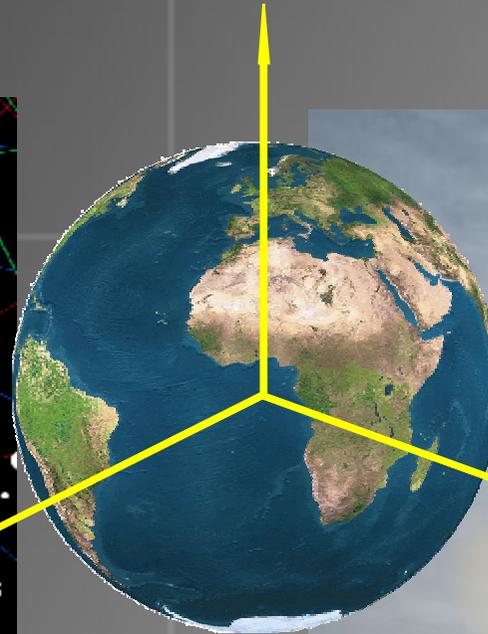
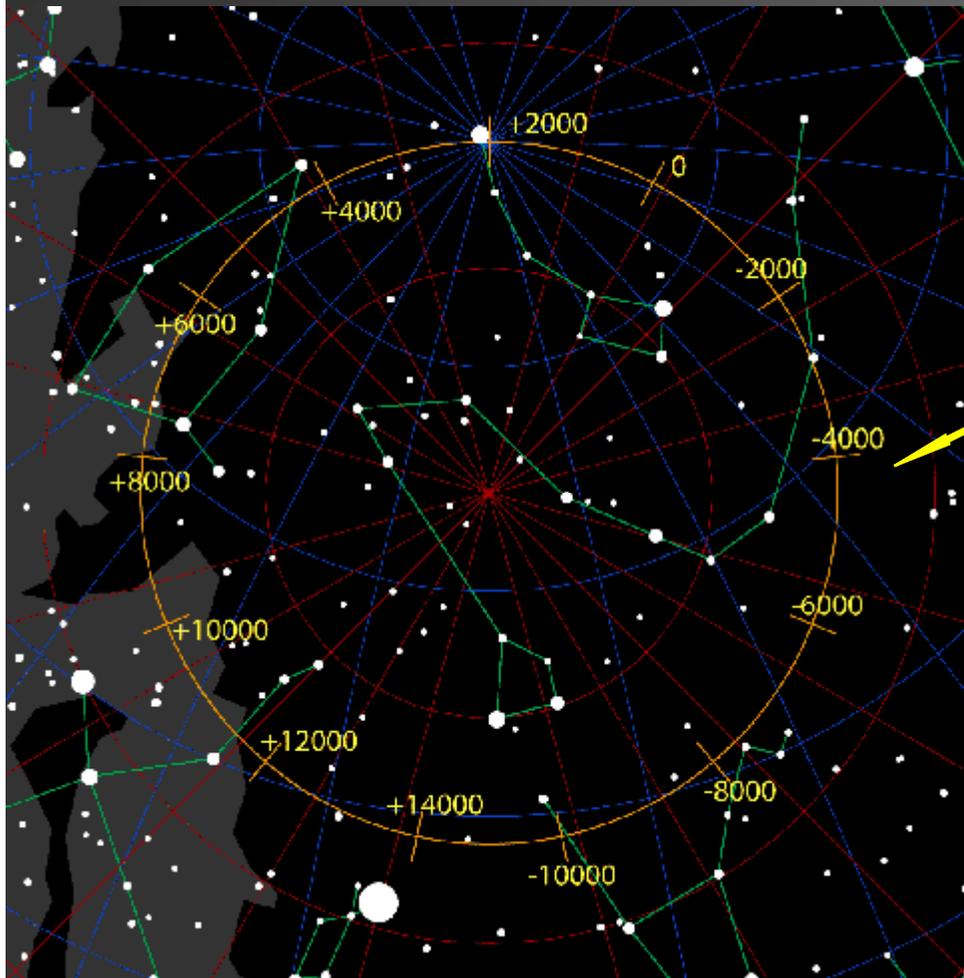


Globale  
Positionierungs-  
Systeme:

GPS  
GLONASS  
GALILEO

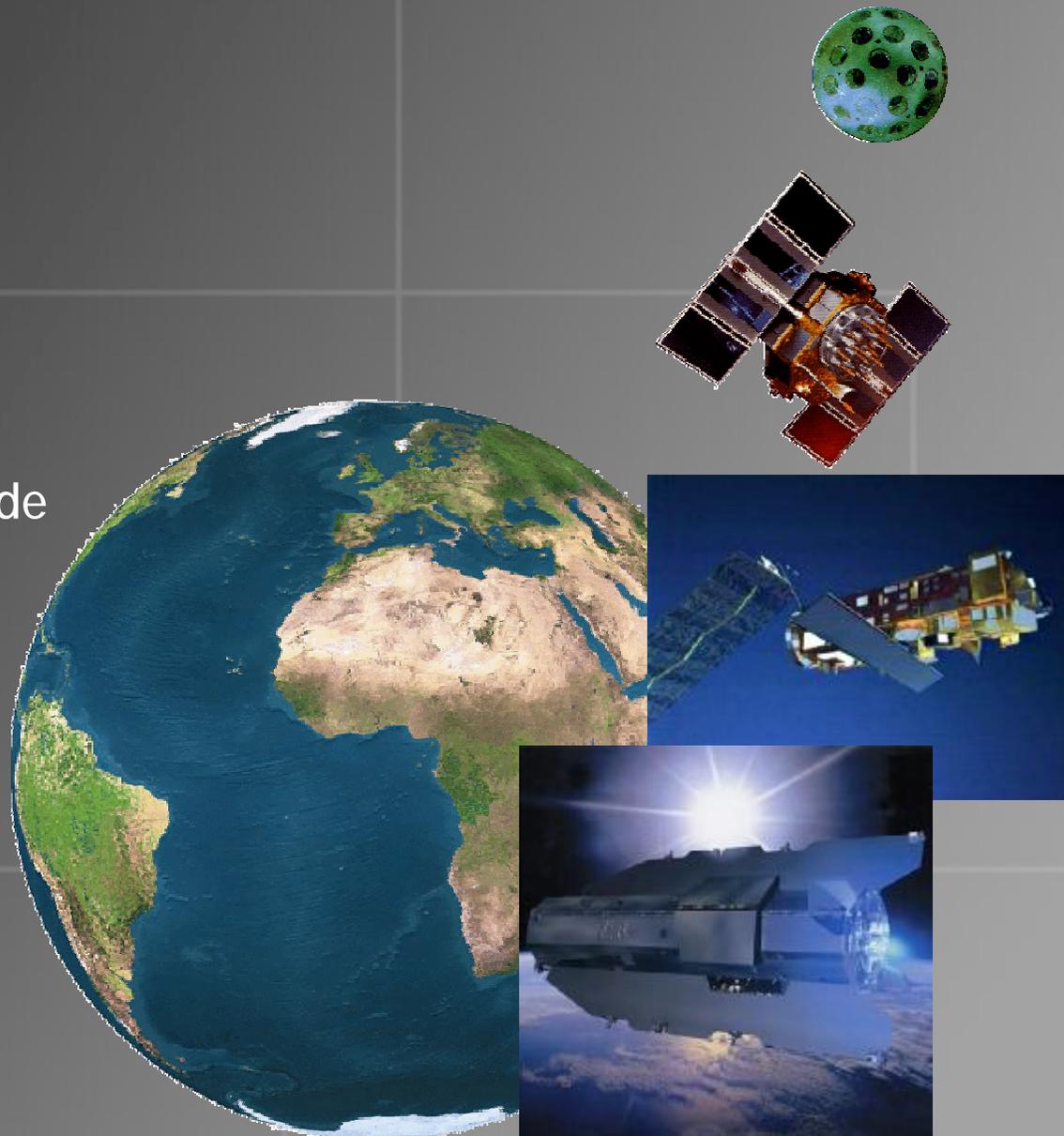


# Globales Referenzsystem

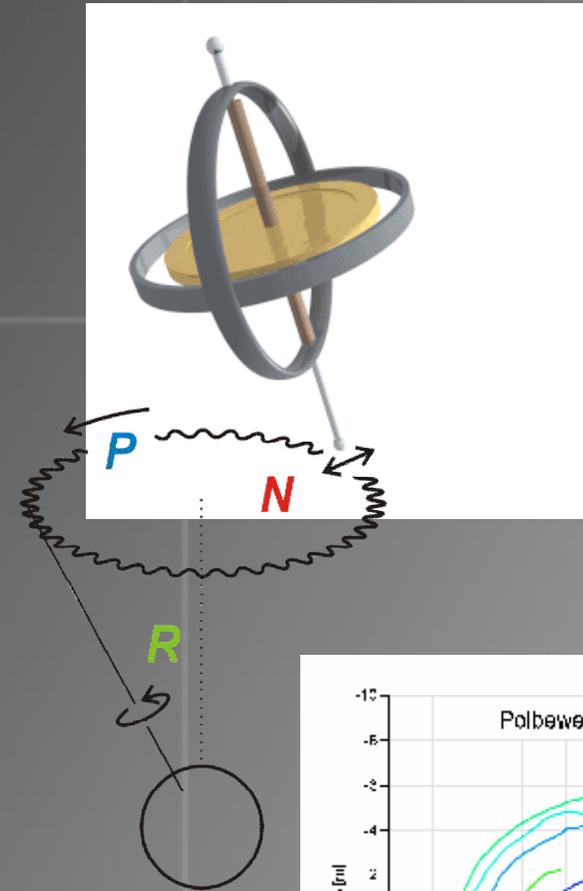


# Satellitengeodäsie

- SLR
- GNSS
- Gravitationsfeld der Erde



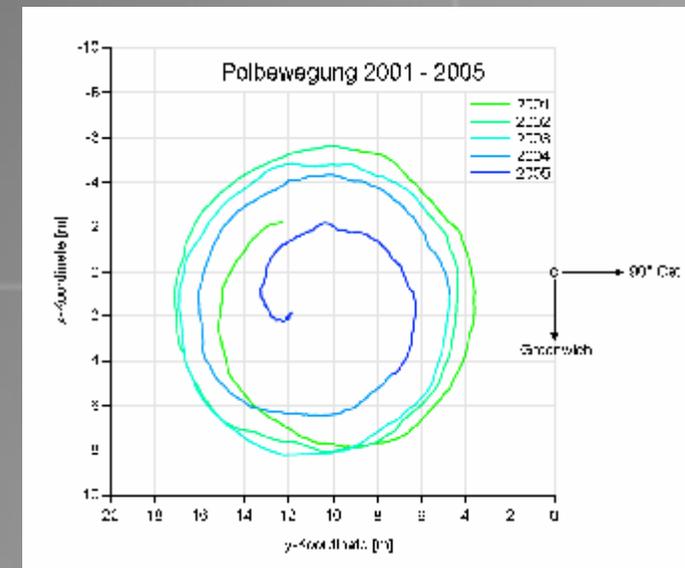
# The swinging planet



Präzession:  
25.800 Jahre

Nutation:  
18,6 Jahre

Polbewegung:  
435 Tage



## Conventional Terrestrial System (CTS) vs. Conventional Inertial System (CIS):

S ... Erdrotation

N ... Nutation

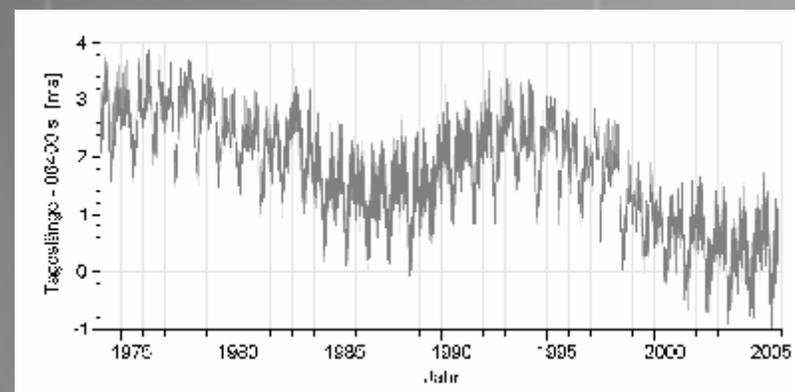
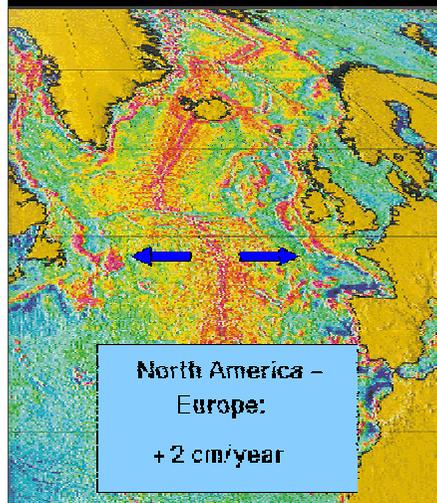
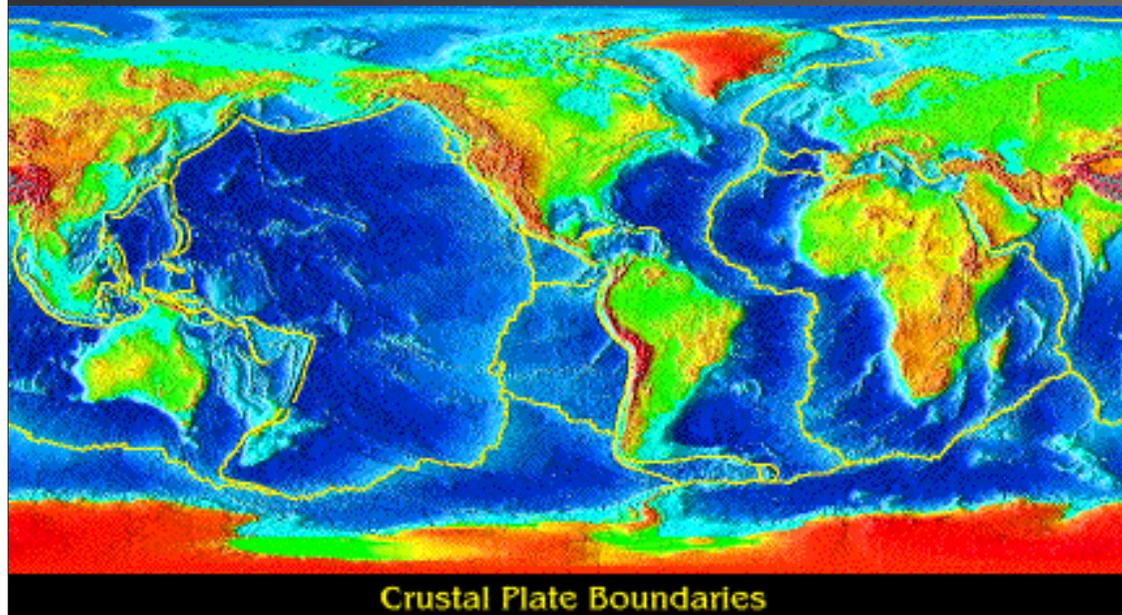
P ... Polbewegung

$$X_{CTS} = S \cdot N \cdot P \cdot X_{CIS}$$

πάντα ῥεῖ

Plattentektonik

Rotations-  
schwankungen



# Satelliten als Schwerefeldsensoren

## 3 Missionsszenarien:

1. **S**atellite-to-**S**atellite **T**racking in **h**igh-**l**ow mode  
**SST - hI**
2. **S**atellite-to-**S**atellite **T**racking in **l**ow-**l**ow mode  
**SST - II**
3. **S**atellite **G**ravity **G**radiometry  
**SGG**

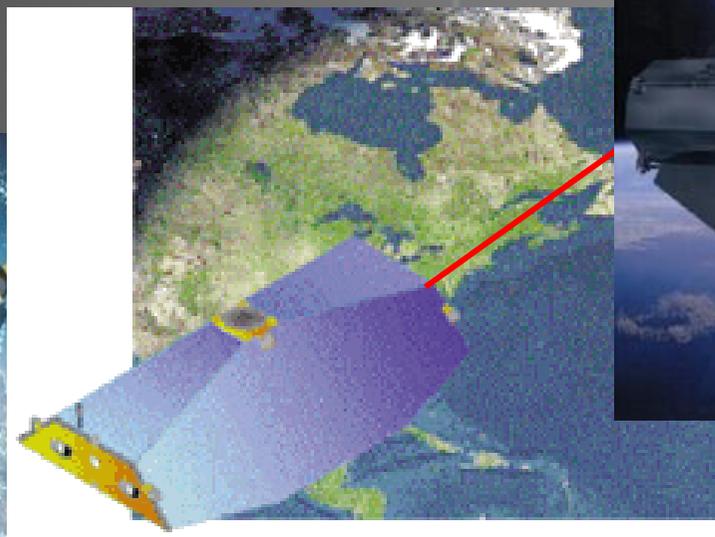
# Love affairs with body Earth

*"... hold your warm and tender body close to mine ..."*

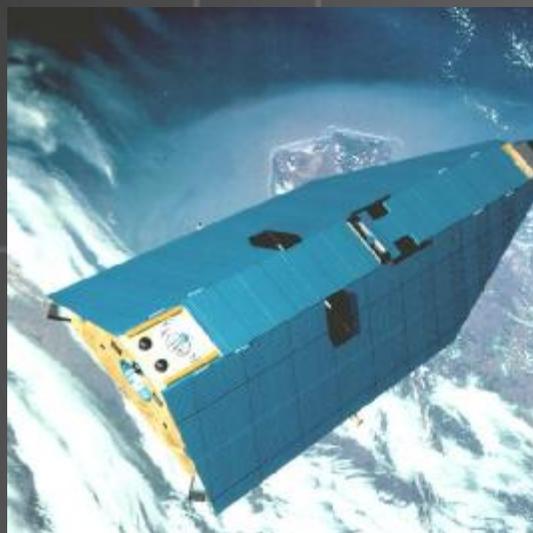
GOCE (2009)



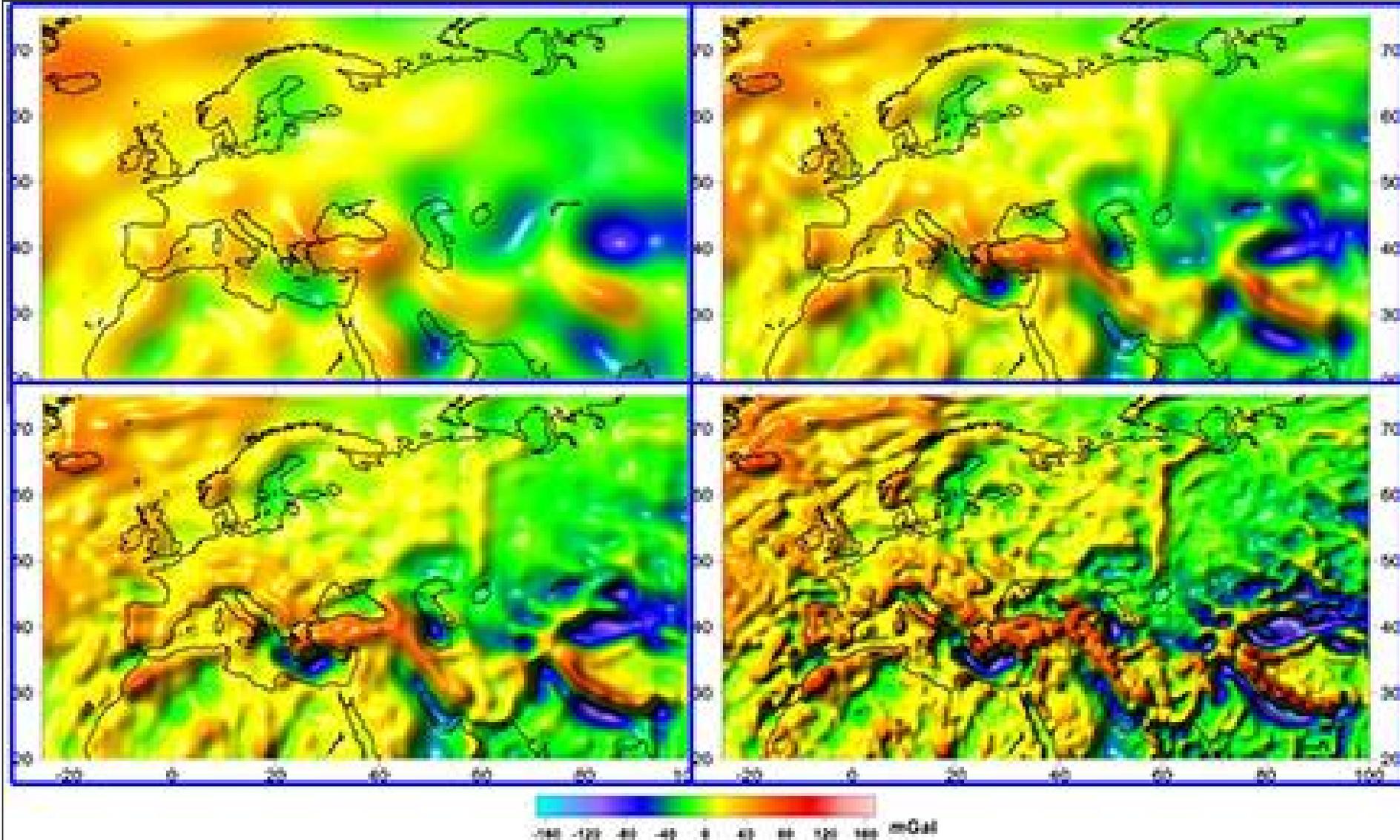
GRACE (2002)



CHAMP (2000)



# Erdschwerefeldmodelle / Steigerung der Auflösung



# GOCE Mission der ESA

**G**avity Field and Steady-state  
**O**cean  
**C**irculation  
**E**xplorer



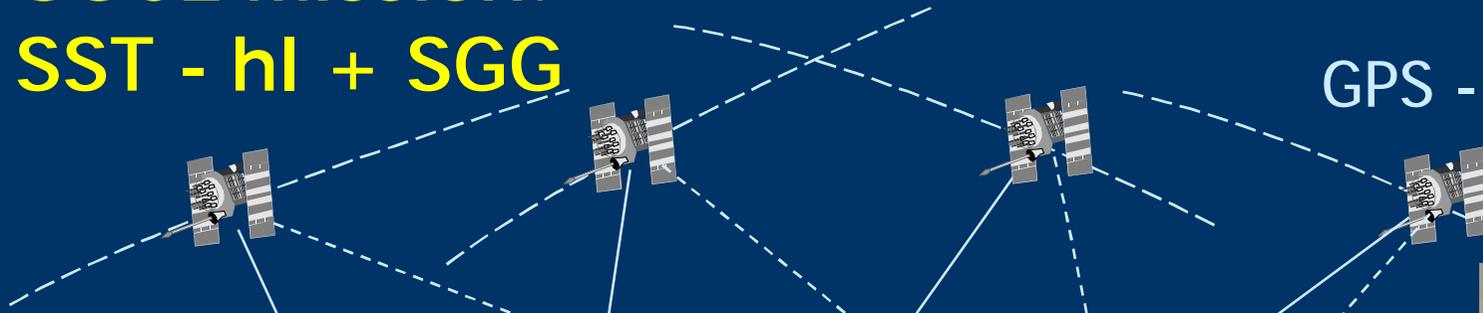
First Core Mission of ESA's  
*Earth Explorer Programme*

Launch: March 17, 2009

GOCE-Mission; @ ESA

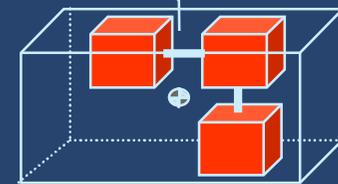
# GOCE Mission: SST - hI + SGG

GPS - Satelliten



$$\lim_{\Delta x_j \rightarrow 0} \frac{V_i^{(2)} - V_i^{(1)}}{x_j^{(2)} - x_j^{(1)}} \approx \frac{\partial^2 V}{\partial x_i \partial x_j} = V_{ij}$$

SST - hI



SGG

**GOCE**  
**2009**

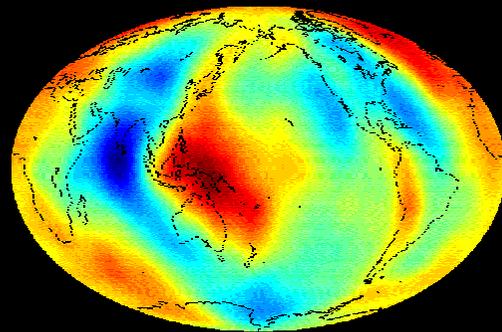
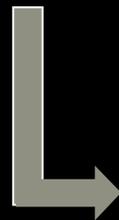
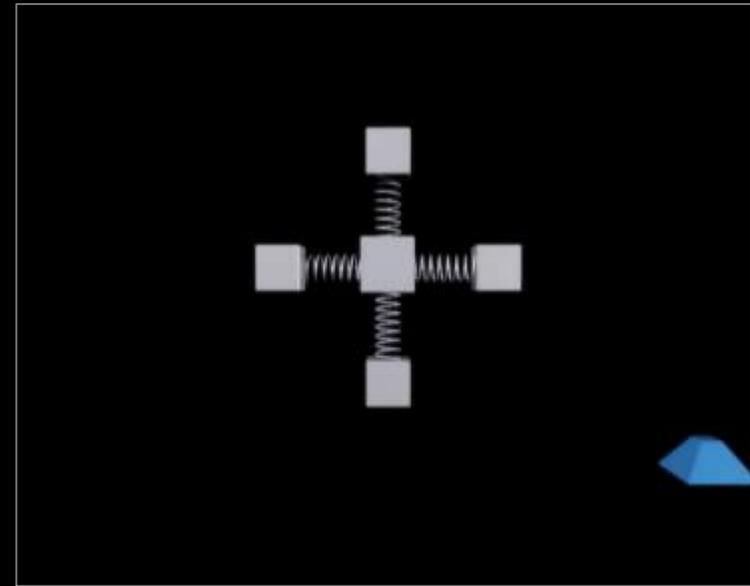


# GOCE: SST-hl + SGG

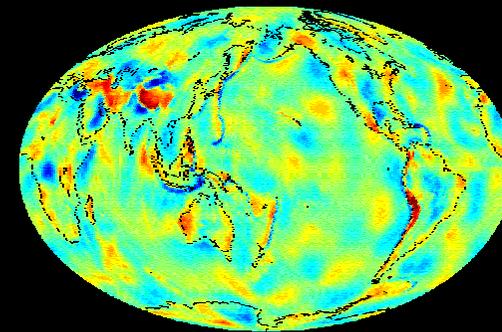
SST-hl



SGG



+



# GOCE Mission: Datenverarbeitung

Gravitationspotenzial  $V(P)$  als Funktion der Position  $P$ :

$$V(P) = \frac{GM}{R} \sum_{l=2}^L \sum_{m=0}^l \left( \frac{R}{r_P} \right)^{l+1} P_{lm}(\cos J_P) \cdot [C_{lm} \cos m I_P + S_{lm} \sin m I_P]$$

70.000  
Parameter

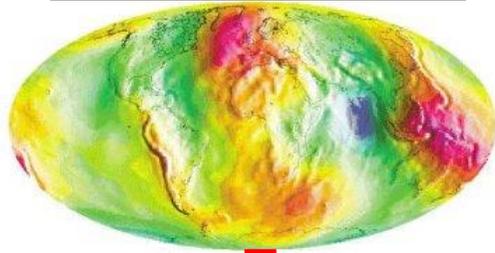
Gradiometer-Messungen:

$$V_{ij}(P) = \frac{\partial^2 V(P)}{\partial x_i \partial x_j}$$

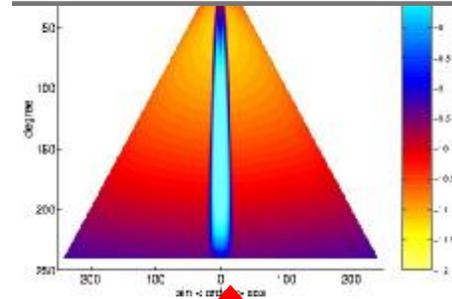
300.000.000  
Messungen

**LSA**

Schwerefeld

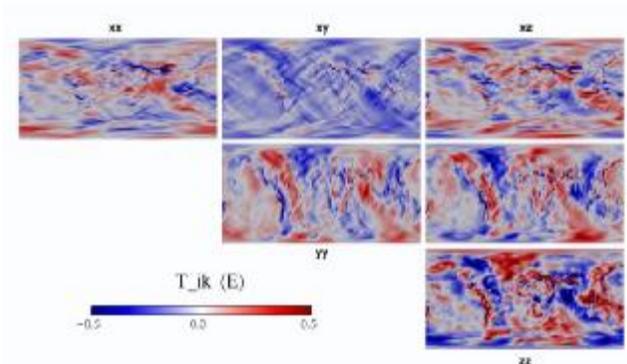
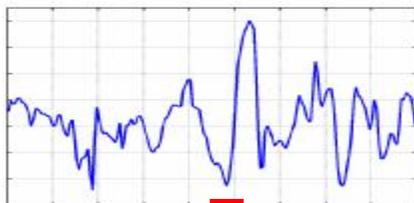


Harmonische Koeffizienten



GOCE / Closed loop

Gradiometer-Signal

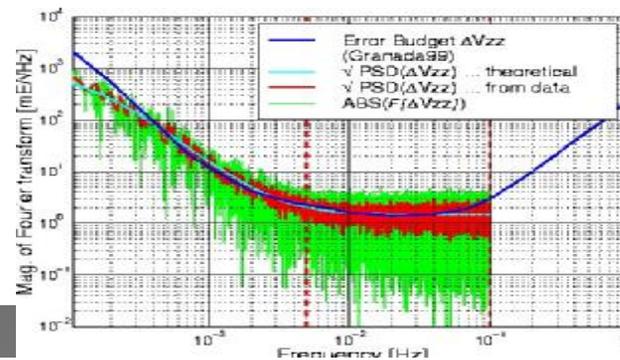


Harmonische Analyse

Messdaten

Frequenzselektive Filterung

Farbiges Rauschen





Wien, 2012-09-12

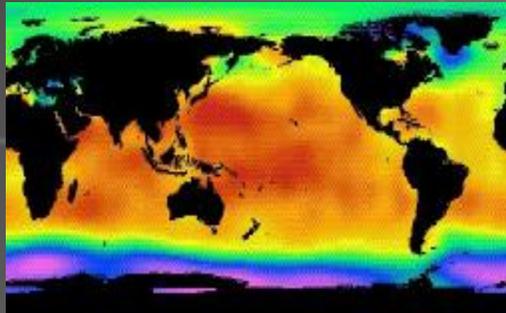
150 Jahre Mitteleuropäische Gradmessung

H. Sünkel

# GOCE Mission / Ziele

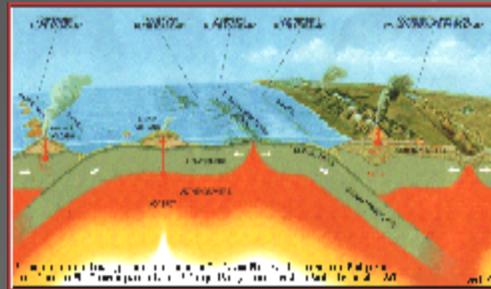
## Ozeanographie:

- Globale Ozeanzirkulation
- Eismassenentwicklung
- Veränderung des Meeresspiegels
- Meteorologie und Klimaforschung



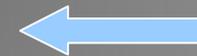
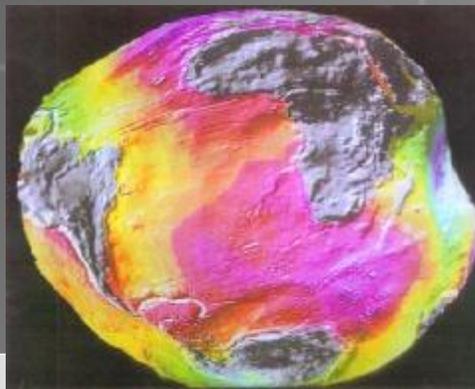
## Geophysik:

- Verbessertes Modell von Lithosphäre und Mantel
- Geodynamische Prozesse (Erdbeben, Vulkanismus)

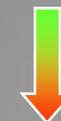


## Geodäsie:

- Hochgenaues globales Höhensystem
- Navigation (GPS, Galileo)
- Satellitenbahnvorhersage



300.000.000+ Daten

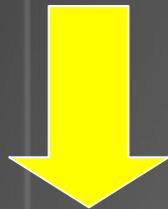


70.000 Parameter

**Globale Dimension**

**Komplexe Problematiken**

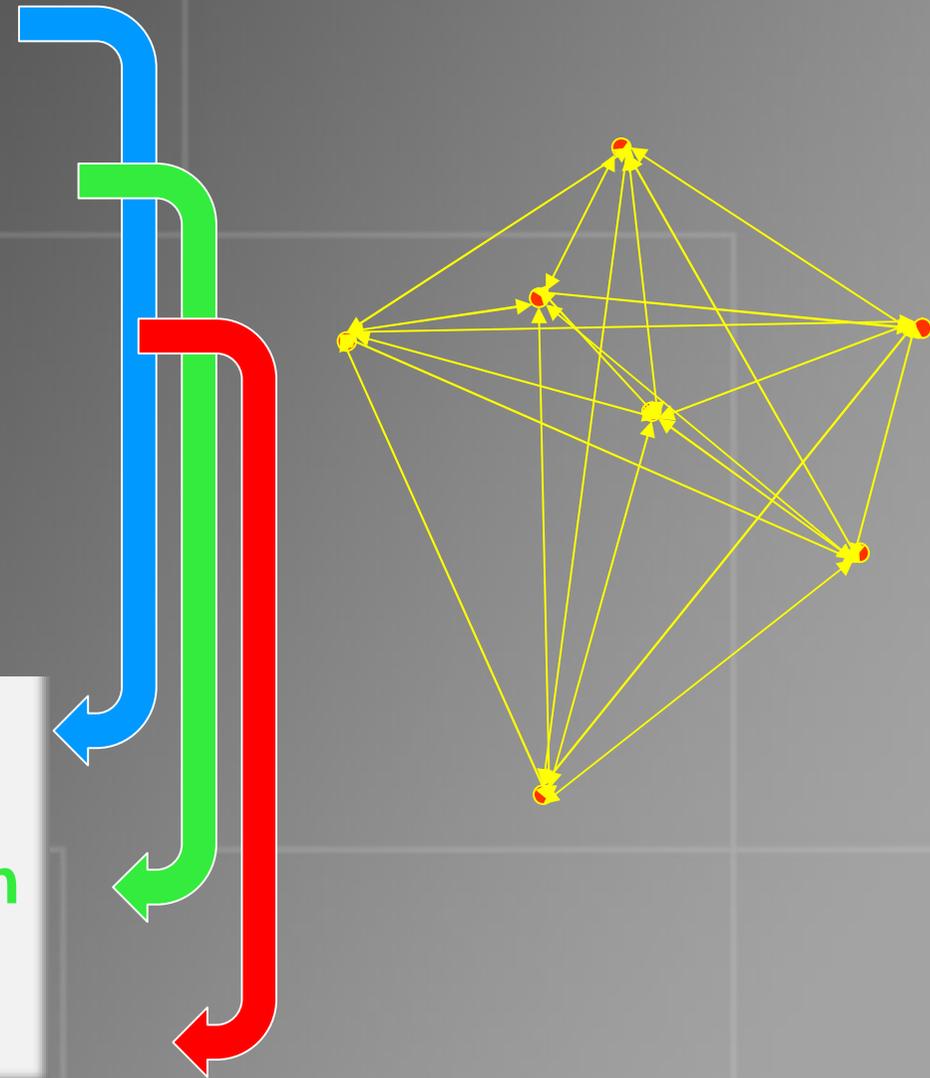
**F&E ist Expedition**



**Internationalität**

**Interdisziplinäre Kooperation**

**Intellektuelle Freiräume**



# Datenkombination (LSC)

$$S_P = C_P^T (C + D)^{-1} l$$

$$S_P^2 = C_o - C_P^T (C + D)^{-1} C_P$$

Einfachheit ist das Resultat der Reife (F. Schiller)  
In der Beschränkung zeigt sich erst der Meister (J.W. von Goethe)

# Life Long Learning



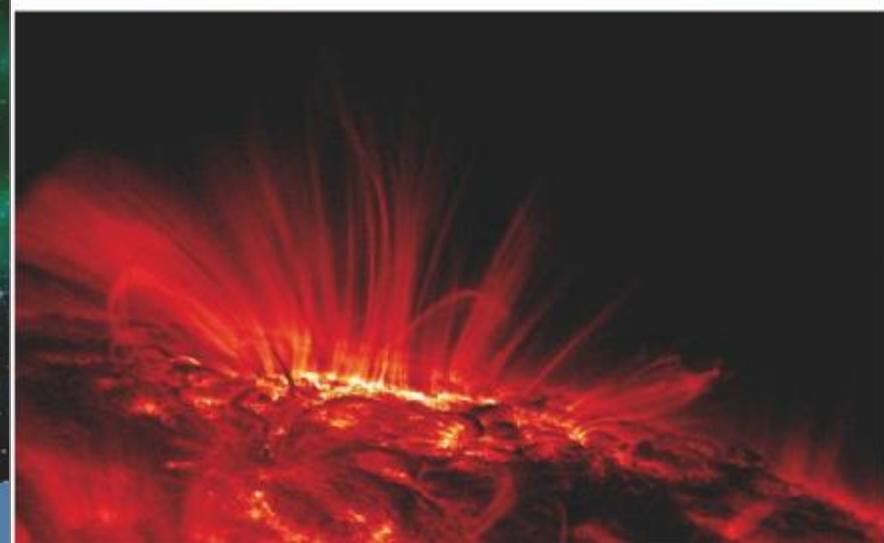
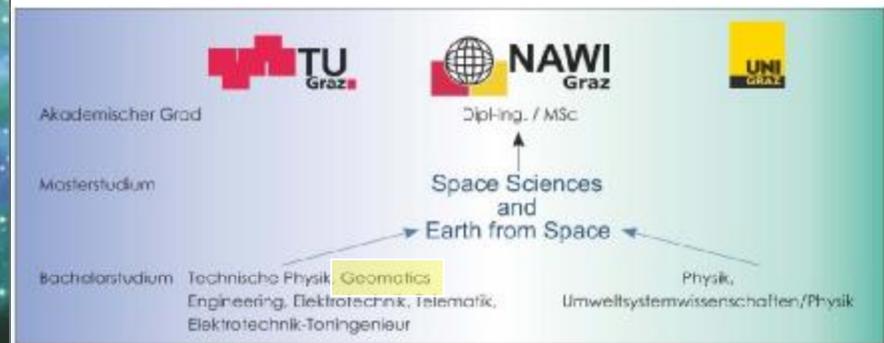
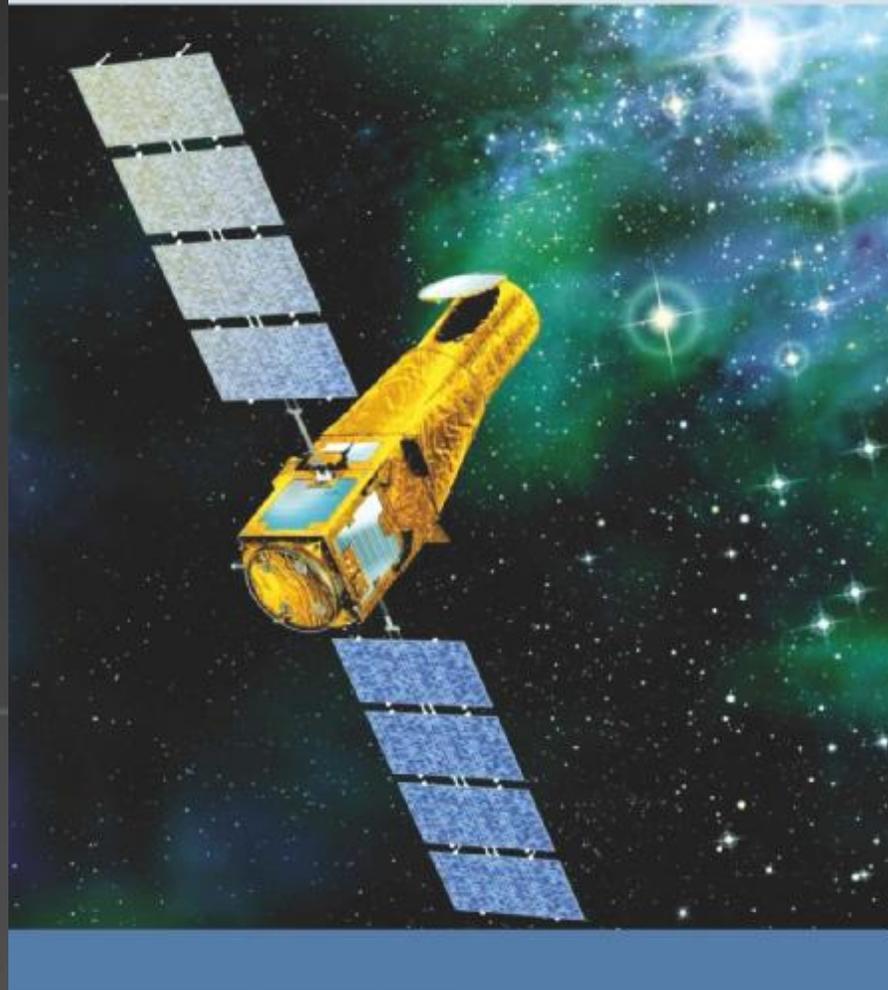
$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + K_k (l_k - A_{k-1} \hat{x}_{k-1})$$

$$\Sigma_k = (I - K_k A_k) \Sigma_{k-1}$$

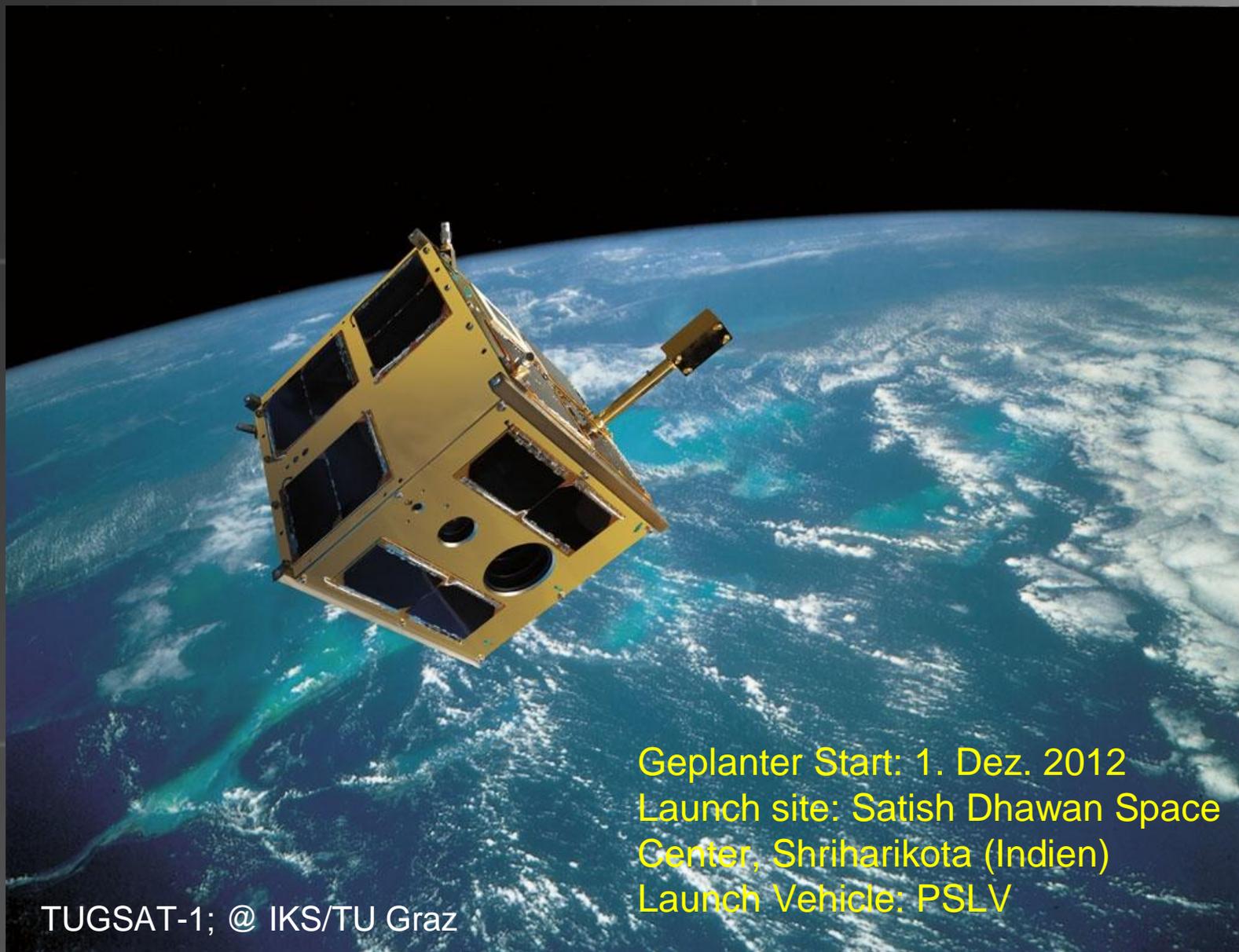
(Kalman Filterung)

# Space Sciences and Earth from Space

Studieninformationsfolder  
Masterstudium  
Space Sciences and Earth from Space



# Erster österreichischer Satellit: TUGSAT-1



Geplanter Start: 1. Dez. 2012  
Launch site: Satish Dhawan Space  
Center, Shriharikota (Indien)  
Launch Vehicle: PSLV

TUGSAT-1; @ IKS/TU Graz

# Unser USP: geodätisches Bezugssystem

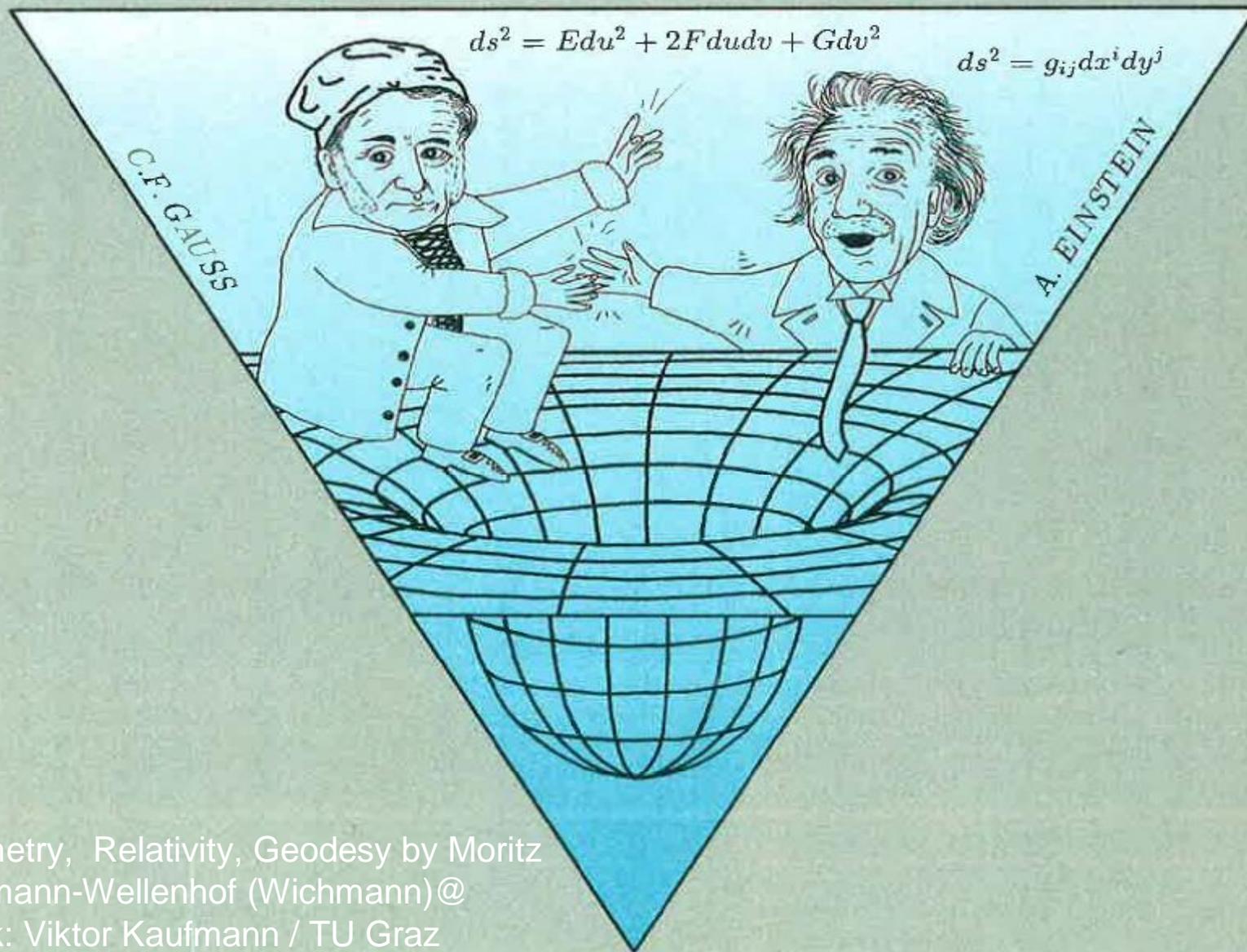
## Direkte und indirekte Abhängigkeiten vom Bezugssystem

- Gesamte Astronomie
- Gesamte Weltraumforschung
  - Alle Satellitenmissionen
  - Weltraummüll-Kataster
- Gesamte Palette der Erdbeobachtung
- Gesamte Palette der Vermessungsprodukte
- Gesamte Satellitennavigation
- Gesamte Geoinformation
- Gesamte Palette von LBS (location based services)
- Weltweite Telekommunikation
- Verkehrssysteme (Land, Wasser, Luft)
- ...

Meist belehrt uns erst der Verlust über den Wert der Dinge  
(Arthur Schopenhauer)

- Alleinstellungsmerkmal (USP) weiterentwickeln
- Starker Knoten in einem internationalen Netzwerk
- Kein Denken in Nischen und geschützten Bereichen
- Aggressivität im Sinne von Herangehen an Probleme
- Mißerfolge als Herausforderung verstehen
- Aufrechter Gang, Mut und Zuversicht
- Beständigkeit und Zuverlässigkeit
- Selbstbewußter Auftritt in der Öffentlichkeit
- Klare Worte
- ...

**MACHEN WIR UNS UNVERZICHTBAR !**



Geometry, Relativity, Geodesy by Moritz  
/ Hofmann-Wellenhof (Wichmann)@  
Grafik: Viktor Kaufmann / TU Graz

# Vielen Dank

für Ihre geschätzte Aufmerksamkeit

und herzlichen Glückwunsch der  
**Österreichischen Geodätischen Kommission**  
zu ihrer hervorragenden Entwicklung