

VON LORÁND EÖTVÖS ZU GOCE: SCHWEREGRADIOMETRIE

ERIK GRAFAREND

Mein heutiges Thema ist die Gradiometrie, ein Gebiet, das *Eötvös Loránd* mit seiner *Eötvösschen Drehwaage* und seinen Experimenten zum *Äquivalenzprinzip* von schwerer und träger Masse, von aktiver und passiver Masse, ungeheuer stark beeinflusst hat. Wir *Geodäten* sagen heute „*terrestrische Gradiometrie*“ da heute die neuartigen Experimente zur Gradiometrie von Satelliten durchgeführt werden, die der hochgenauen Erforschung von *globalen Schwereänderungen* dienen. In den Geowissenschaften sprechen wir heute von *Satellitengradiometrie*, Gegenstand meines heutigen Vortrages, insbesondere zum *GOCE-Satelliten*, der am 17. März 2009 erfolgreich in Plesetsk/Russland namens der „*European Space Agency*“ (ESA) gestartet wurde.

Verweilen noch kurz bei der *Terrestrischen Gradiometrie*. In seinem Beitrag „*Three Fundamental Paper of Eötvös Loránd*“ publiziert vom „*Eötvös Loránd Geophysical Institute of Hungary*“, schildert Szabó Zoltán als Herausgeber die außerordentliche Bedeutung des weltweit berühmten Naturwissenschaftler, insbesondere des „*Curvature Variometers*“ von 1890, speziell des horizontalen Variometers, die erste Drehwaage und die beiden Drehwaagen von 1898 („*einzelne Drehwaage*“) und von 1902 („*doppelte Drehwaage*“). Erwähnenswert sind die gradiometrischen Messungen auf dem zugefrorenen *Balaton-See*, ein Testgebiet für geodätische singuläre Punkte, sog. Parabolische Punkte, des Schwerepotentials. Verbesserte Versionen der epochemachenden Drehwaage von 1908 und des dreifachen *Krümmungsvariometers* von 1909 wurden im Jahre 1911 zur Analyse eines Erdbebens in Gebiet von *Kecskemét* verwendet. Sie begeisterten *Albert Einstein*, der 1915 den Grundstein seiner *geometrischen Analyse* der Gravitationstheorie, auch *Einstein'sche Relativitätstheorie* genannt, auf der Basis einer Krümmungstheorie legte. Neuerdings haben drei wichtige Arbeiten von *Eötvös Loránd* aus den Jahren 1896, 1920 und 1922 (L. Eötvös, D.v. Pekar und E. Fekete) *E. Fischbach, G.T. Gilles, D.E. Krause, J.G. Schwan und G. Talmadge* (1996, 793 Referenzen) und *E. Fischbach und C.L. Talmadge* (1999, review) zur *Hypothese einer fünften Kraft* geführt, ein zentrales Thema unserer Zeit, welches beispielsweise von Geodäten *E. Groten* (1988) untersucht wurde.

Hier müssen wir die gegenwärtigen Arbeiten von unseren *Kollegen Papp Gábor und Kalmár János* (1996), *Tóth Gyula* (2002, a,b), *Tóth Gyula, Rózsa Szabolcs, Ádám József und Ilias Tziavos* (2002), *Tóth Gyula, Földváry Loránd und Ilias Tziavos* (2007) und *Rebecca Bell* (1998), *Martin van Gelderen und Reiner Rummel* (2001) besonders würdigen, die auf der Basis der „*Eötvös sphärischen horizontalen gradiometrischen Randwertaufgabe*“ das Kernproblem der gradiometrischen Kernaufgabe, bestehend aus vier Elementen der Messungen in einem *Horizontsystem* als Referenz, elegant lösten. Dazu war die hochgenaue Vermessung der gesamten Gebietes von Ungarn – mehr als 10000 Punkte einer verbesserten Version des *Eötvös Doppelpendels* – erforderlich und mit anschließender aufwändiger Datenverarbeitung zu bewältigen. *Heute gilt das Land Ungarn weltweit* als ein bestvermessenes Gebiet mit gradiometrischen Daten. Die aufwändigen Messungen wurden von *Geodätischen Institut der Technischen Universität Budapest* und vom *Geodätisch und Geophysikalisches Forschungsinstitut in Sopron* durchgeführt und erreichten eine Genauigkeit von besser als 1 *mE* (*milli-Eötvös*: Standard-Einheit der Gradiometrie). Hier empfehle ich zum vertieften Studium den ausgezeichneten Übersichtsbeitrag über den Naturwissenschaftler *Eötvös Loránd* von *Szabó Zoltán* in den ungarischen „*Humboldt-Nachrichten*“, Nummer 14, Dezember 1998, zum 150-jährigen Geburtsjubiläum.

Es muss zum Ausdruck gebracht werden, dass „*nur*“ *regionale* Messungen mit einem *Eötvös-Gradiometer* möglich sind. Der Hochtechnologie-Satellit *GOCE* („*Gravity and steady-state Ocean*

Circulation Explorer“), geführt von „*Principle Investigator Reiner Rummel*“ (TU München), observiert global erdumspannend das Schwerfeld des im inertialen Raum operierenden Satelliten, konkreter die *Schwerfeldänderungen* von Ort zu Ort in einem vorgegebenen Zeitfenster. Ich rate dem interessierten Leser zum Studium des ESA-Berichten „From Eötvös to milligal“, Finales Dokument ESA/ESTEC, Kontrakt No. 13392/98/NL/GD. Einige Bilder zeigen den Start des GOCE Satelliten (*Bild 1*: Startrampe, *Bild 2*: Ereignis beim Start), Bahn- und Schwerfeldbestimmung (*Bild 3*: neu entwickelter europäischer GPS-Empfänger („globales NASA – Positionierungs-Instrument“)), *Bild 4*: Laser-Retro-Reflektoren zum „*Satellite Laser Ranging*“, *Bild 5*: einzelner Beschleunigungsmesser, einachsiges Gradiometer, dreiachsigen Gradiometer bestehend aus 6 Beschleunigungsmessern, *Bild 6*: quasi-orthogonal montierte Kreisel höchster Präzision, *Bild 7*: GOCE-Gradiometrie auf der Basis von 6 Testmassen, „levitated“ in einem Abgriff von Typ kapazitives elektrisches Feld und *Bild 8*: Entwicklung und Betreiben eines GOCE-Schwerfeldmission Konsortiums (EGG-C), eine EGG-C Gruppe von europäischen Universitäten und Fachinstitutionen, *Bild 9*: Zielvorstellungen, insbesondere (i) *Geoid-Höhen* mit einer Präzision von 1 cm, (ii) *Auflösung des Gravitationsfeldes* mit einer relativen Präzision von 1 ppm („part-par-million“) entsprechend 1 mgal und (iii) *Räumliche Auflösung von 100 km*, entsprechend einer Entwicklung nach Kugelfunktionen von Grad/Ordnung n (max) = 200.

Besonders *herausragende Merkmale* der GOCE-Mission sind (i) erstes *Schweregradiometer im All*, (ii) extrem niedrige Bahnhöhe von 265 km, (iii) aktive Kompensation der *Atmosphärenreibung* in Flugrichtung und der *Eigengravitation* des Satelliten, (iv) *Orientierungskontrolle*, (v) Einsatz neuartiger Materialien und (vi) *perfekt geräuscharme Umgebung*. Zur konkreten Analyse der Messungen gehört die Zerlegung des Schweretensors in *zwei symmetrische Terme* (i) Gravitation und Zentrifugal-Anteil (*Winkelgeschwindigkeit*) und *zwei antisymmetrische Terme* (ii) Winkelbeschleunigungen, die auf dem Flugweg zu integrieren sind, und (iii) der *kleinen Euler-Beschleunigung* auf Grund der Rotationseffekte.

Zu meinen einschlägigen Arbeiten gehören zwei Themen: (i) *terrestrische Gradiometrie* (Arbeiten im geodätischen Mekka Department of Geodetic Sciences, Ohio State University, Columbus/Ohio/USA, vorrangig das Anholonomitätsproblem) und (ii) *Satellitengradiometrie* (Arbeiten zur Transformation eines erdfesten Referenzsystems, eines raumfesten Inertialsystems und eines satellitengetragenen *Gradiometer-Referenzsystems*, Beispiel GOCE).

Nutzer des GOCE-Satellitenprojekts werden alle Erdwissenschaftler sein, die sich mit dem *terrestrischen Schwerfeld* und der *Ozean-Zirkulation* beschäftigen, *ein neuer Meilenstein*.

Dank: Mein Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. *Reiner Rummel* für seine Unterstützung bei der Vorbereitung meines Berichtes.

Diesen Bericht widme ich Herrn Professor Dr. *Halmos Ferenc*, Geodätisch und Geophysikalisches Forschungsinstitut in Sopron, der viel zu früh als *internationaler Kreiselexperte* verstarb.



Bild 1: Startrampe



Bild 2: Ereignis des Starts

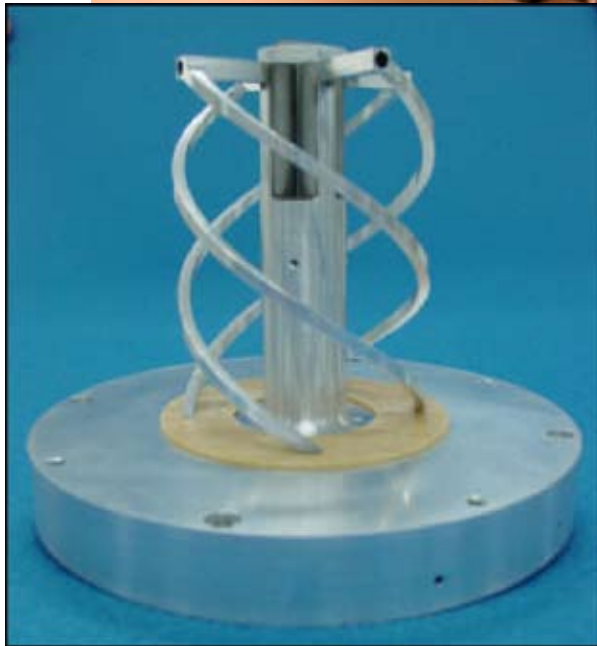
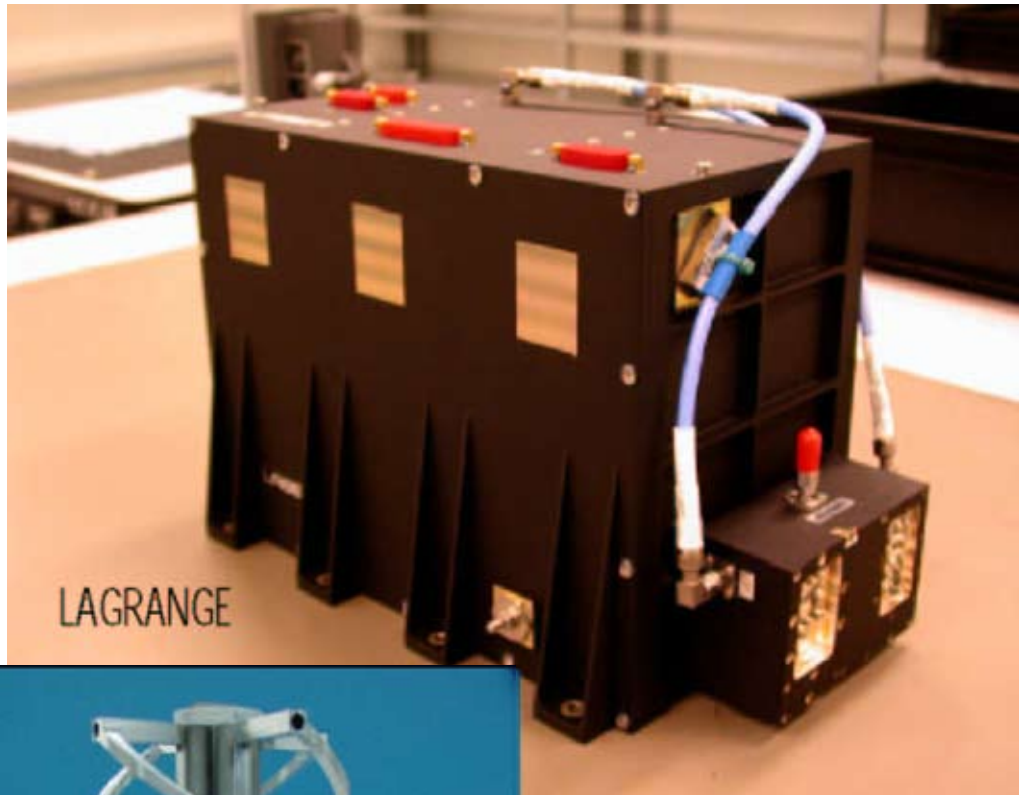


Bild 3: neu entwickelter europäischer GPS Empfänger



Bild 4: Laser Reflektoren, „Satellite Laser Ranging“

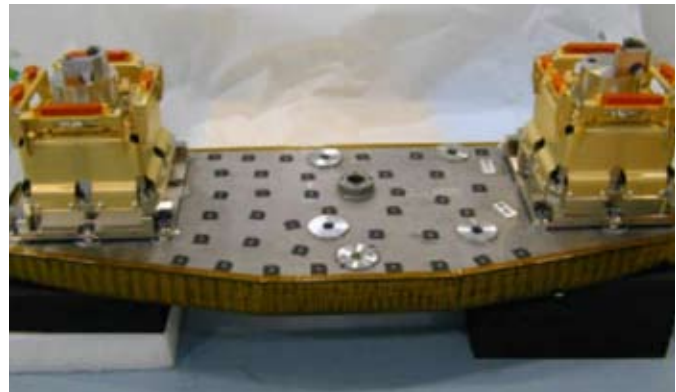


Bild 5: einzelner Beschleunigungsmesser, einachsiges Gradiometer, dreiachsiges Gradiometer

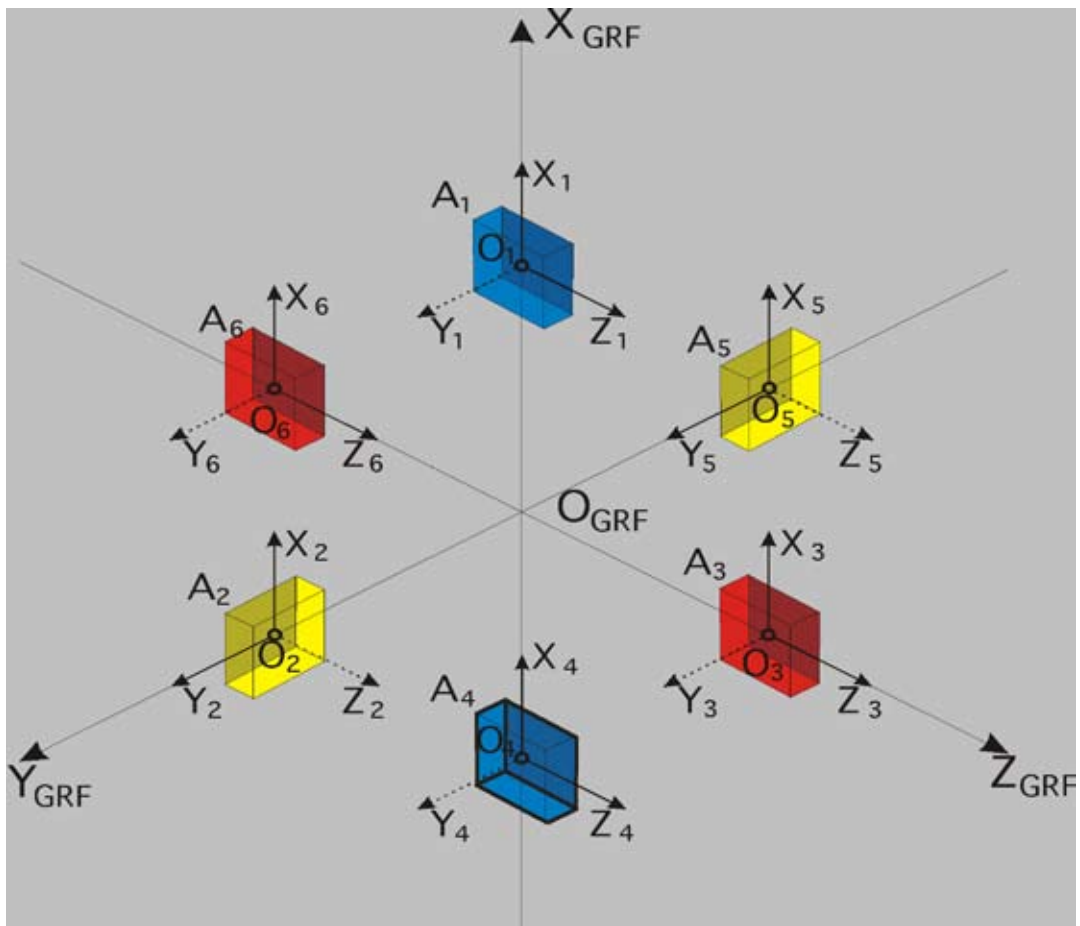


Bild 6: 6 quasi-orthogonale Achsen höchster Präzision

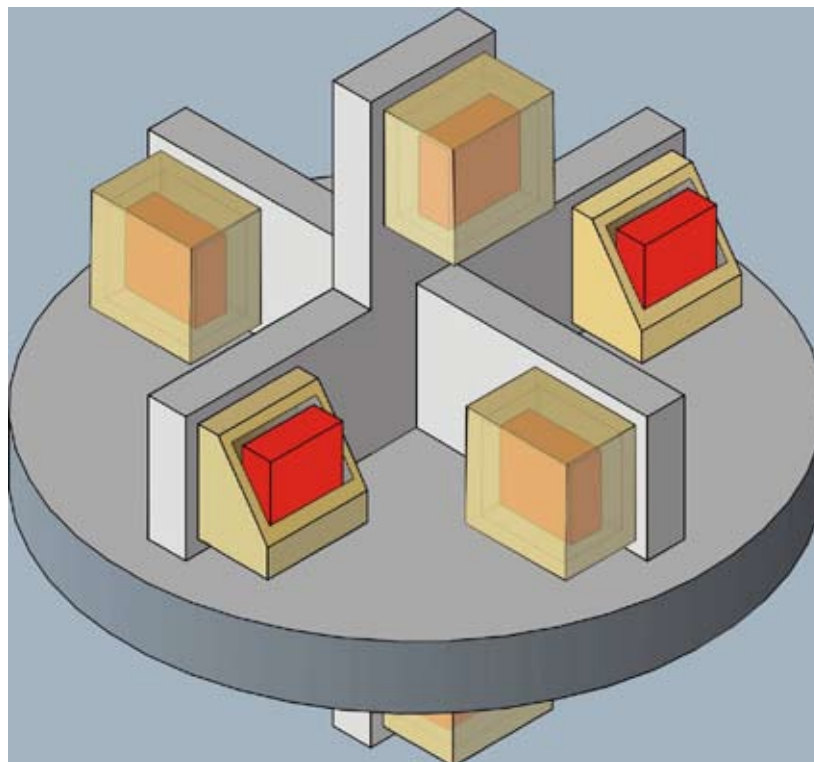
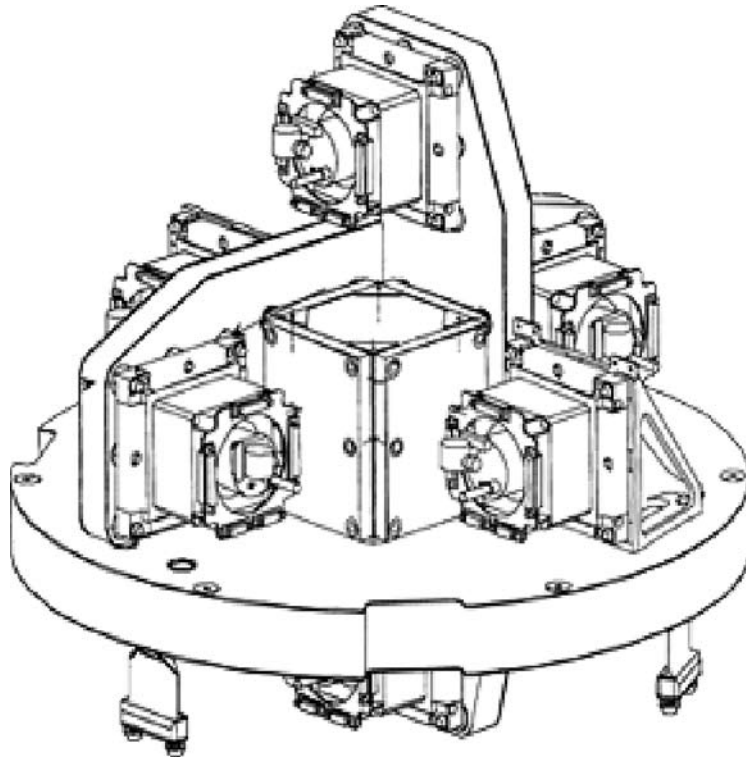


Bild 7: 6 Testmassen, freischwebend in einem kapazitiven elektrischen Feld

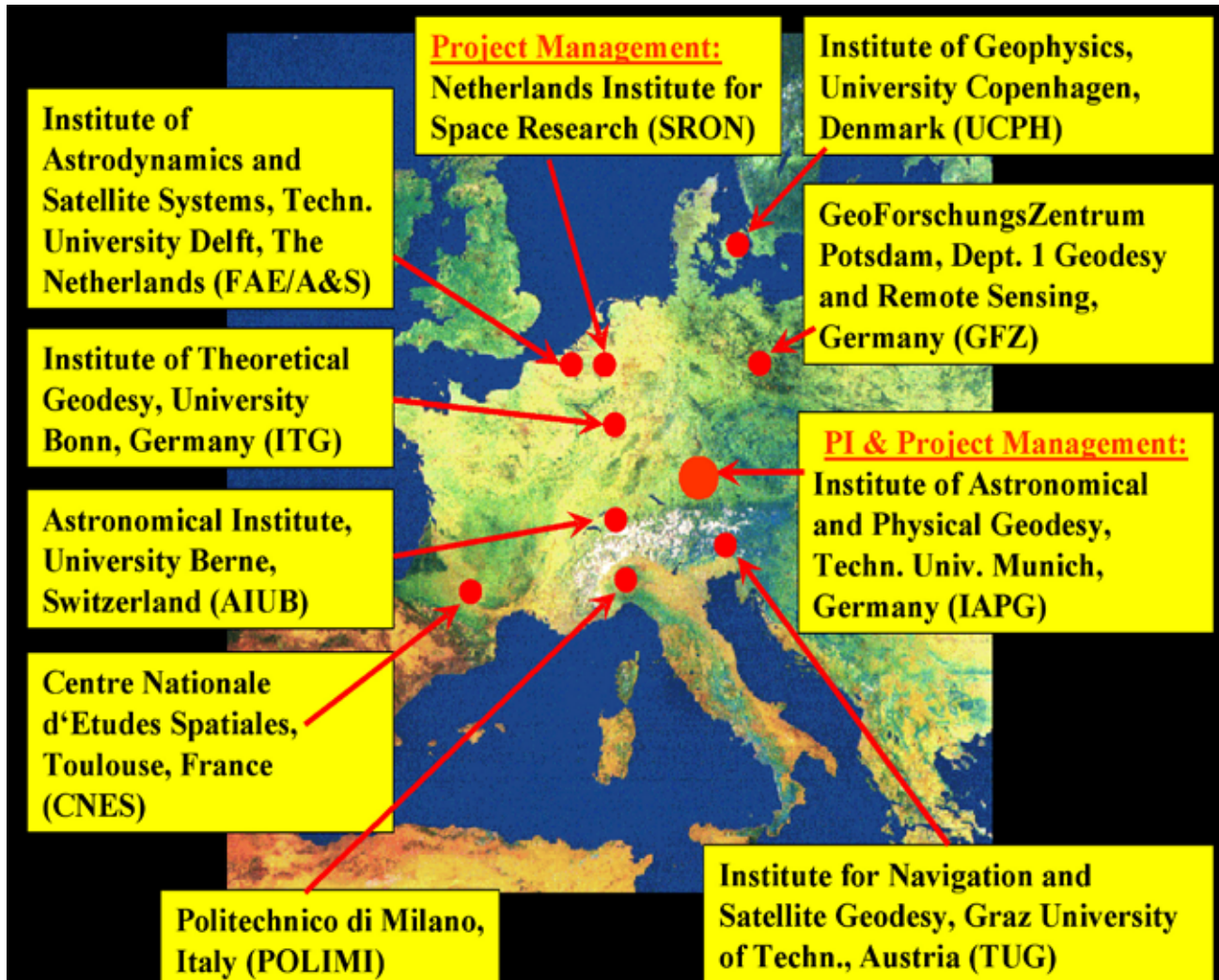


Bild 8: EGG-C Konsortium aus europäischen Universitäten und Fachinstitutionen



Bild 9: Zielvorstellungen, „Gravity and Steady-State Ocean Circulation Explorer“ (GOCE), (i) Geoid-Höhen, (ii) relative Genauigkeit 1ppm, (iii) räumliche Auflösung von 100 km:
 $n(\text{max}) = 200$