

**Symposium Grundlagenforschung im Weltraum**  
München 12. - 13. 6. 2008



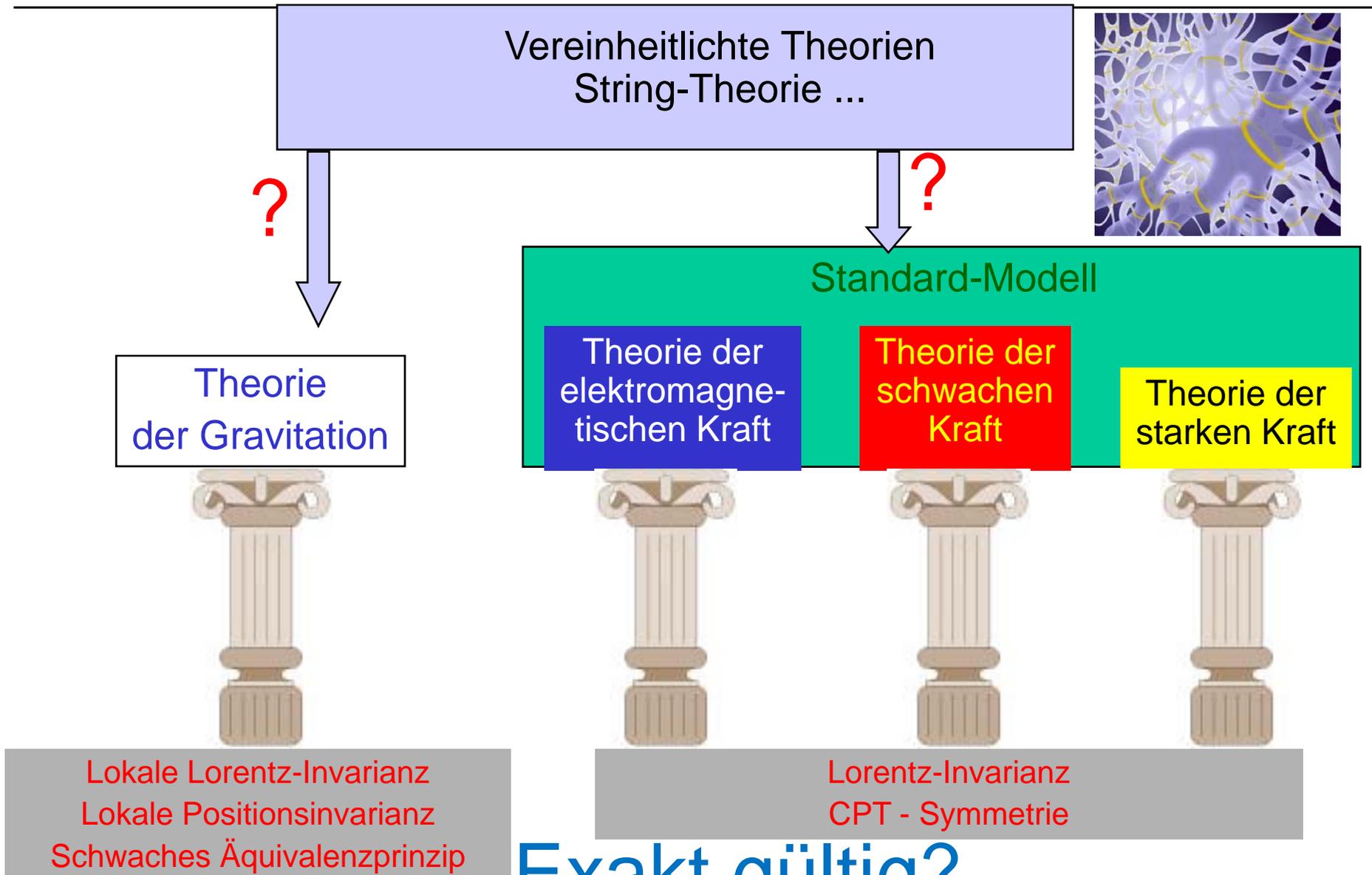
# **Satellitengestützte Tests der Allgemeinen Relativitätstheorie mittels Quantensensoren**

**S. Schiller**

*Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf*



# Vereinheitlichung?



## Exakt gültig?

# Tests der ART

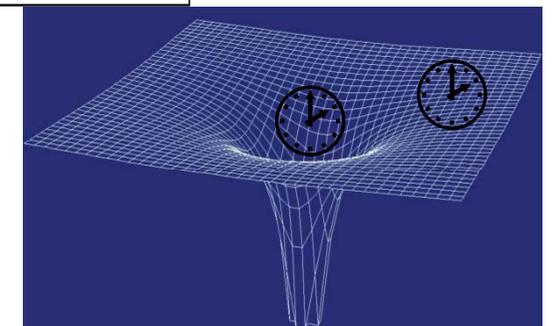
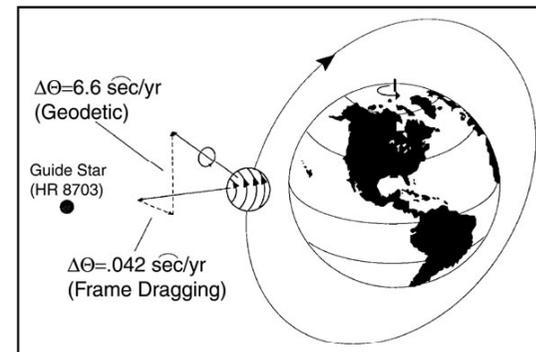
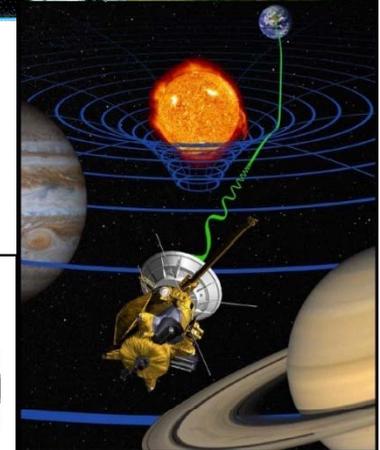
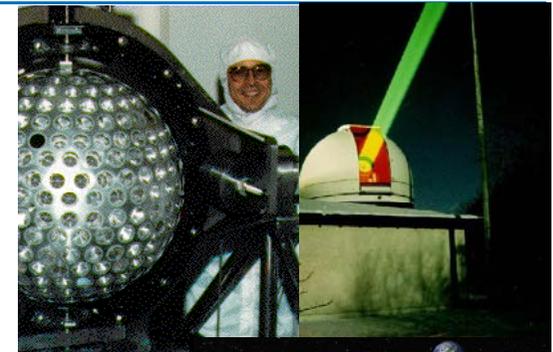
## ■ Tests der Vorhersagen

- Erde-Mond-System (Lunar Laser Ranging)
- Erde-Satellit-System
- Planetenbahnen
- Binäre Sternsysteme (Pulsar)
- Lichtablenkung
- Zeitverzögerung bei Wellenpropagation (Shapiro-Effekt)
- Frequenzverschiebung von Uhren (Gravity Probe A)
- Kreiselpräzession (Gravity Probe B)

Bisher erreicht:  
relative Ungenauigkeit  
 $2 \times 10^{-5}$

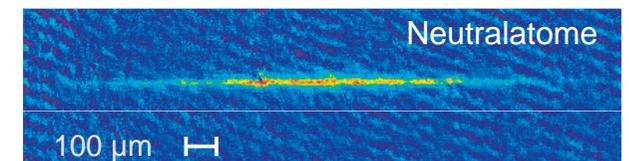
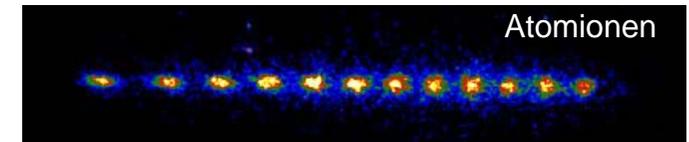
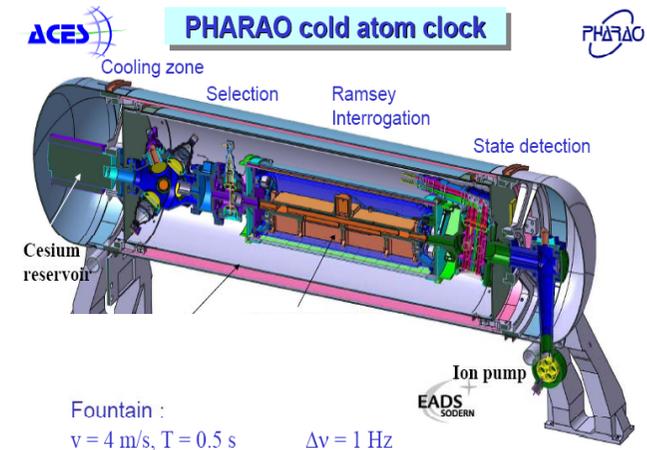
## ■ Tests der Grundannahmen (Einstein-Äquivalenzprinzip)

- Laborexperimente (Isotropie, Schwaches Äquivalenzprinzip, Konstanz der Konstanten)
- Vergleich der Spektren entfernter Quellen mit heutigen Labordaten

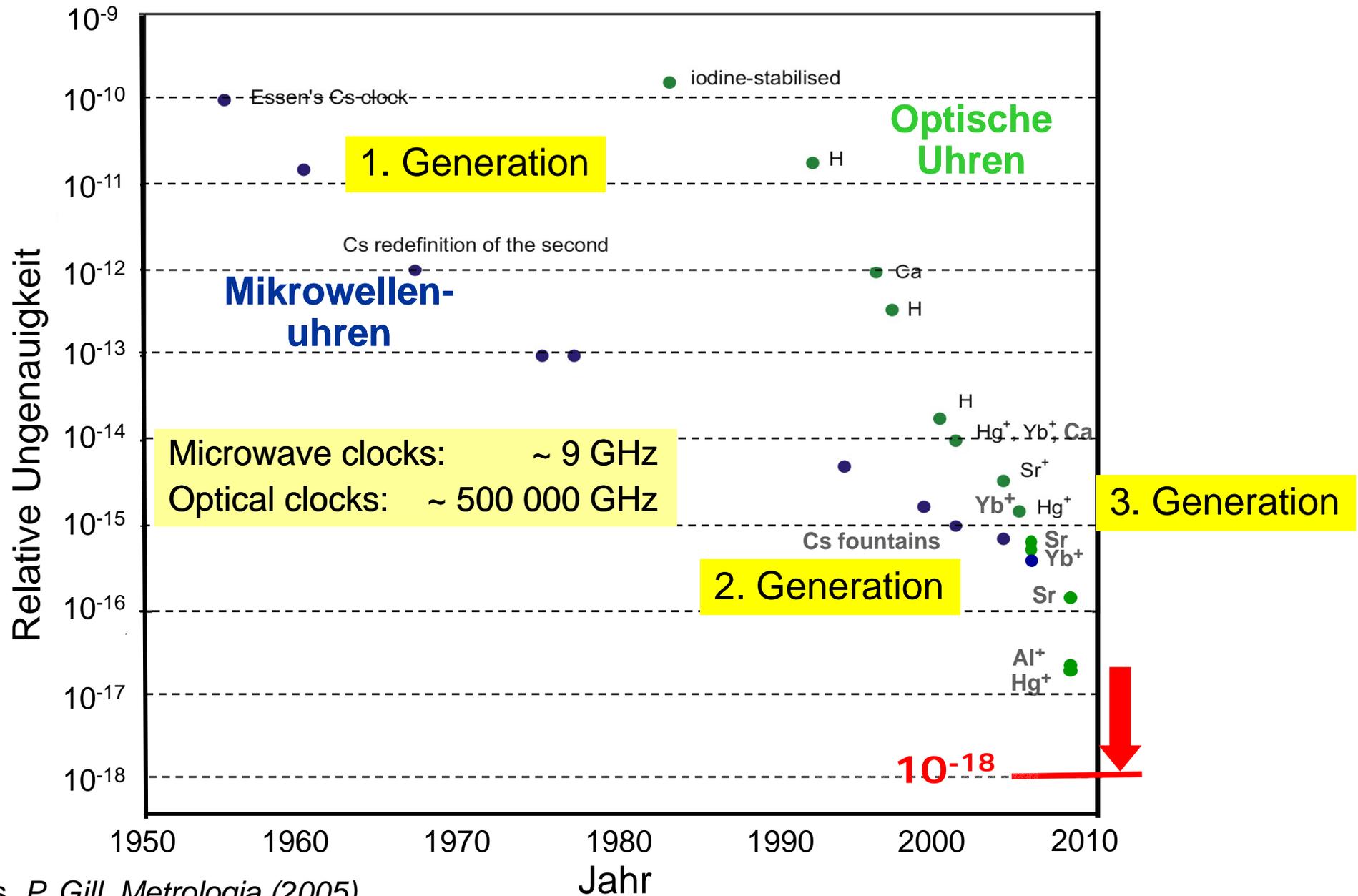


# Quantensensoren

- Bisherige Tests: mechanische, makroskopische Sensoren, Mikrowellentechnik, Atomuhren der 1. Generation
- Genauigkeit wird durch geplante Missionen weiter verbessert werden (MORE auf BepiColombo, ACES, MICROSCOPE, GAIA)
- Quantensensoren: basieren auf Entwicklungen auf dem Gebiet der Quantenoptik seit Mitte der 80er Jahre
  - Einzelne Atome
  - verdünntes Gas, schwach wechselwirkend
  - in sehr kleinen Volumina gespeichert (gute Kontrolle über die lokalen Bedingungen)
  - Atome sind sehr kalt (langsam), daher geringer Dopplereffekt
  - Ausnutzung spezieller innerer Quantenzustände bzw. Überlagerungen von Quantenzuständen
- Atomuhren der 3. Generation (optisch), Beschleunigungsmesser, Gyroskope, Kraftsensoren



# Atomuhren



s. P. Gill, Metrologia (2005)

# Quantensensoren für Tests der ART

---

- Hochgenaue Messung von:
    - Zeitintervalle (lokal)
    - Beschleunigung/Rotation von Satelliten;  
Erzeugung des „freien Falls“ durch aktive Regelung der Satellitengeschwindigkeit
  - Hochgenaue Zeitvergleiche zwischen weit entfernten Uhren mittels Mikrowellen- oder optischer Strecken
  - Vergleich des Verhaltens benachbarter unterschiedlicher Quantensysteme bei Änderung der Orientierung und des Gravitationspotentials (Nulltests)
  - Genauere Tests der
    - Zeitverzögerung von Wellen (Shapiro-Effekt)
    - Gravitationsrotverschiebung im Sonnenfeld **und** im Erdfeld  
(Unabhängigkeit der Fundamentalkonstanten von der Natur der Quelle)
    - Universalität der Gravitationsrotverschiebung
    - Bahnbewegung von Satelliten
- Kombiniert mit günstigen Missionsszenarien, sind Genauigkeiten bis zu  $10^5$  mal höher als bisher möglich
  - Empfindlichkeiten im theoretisch interessanten Bereich

# Missionen

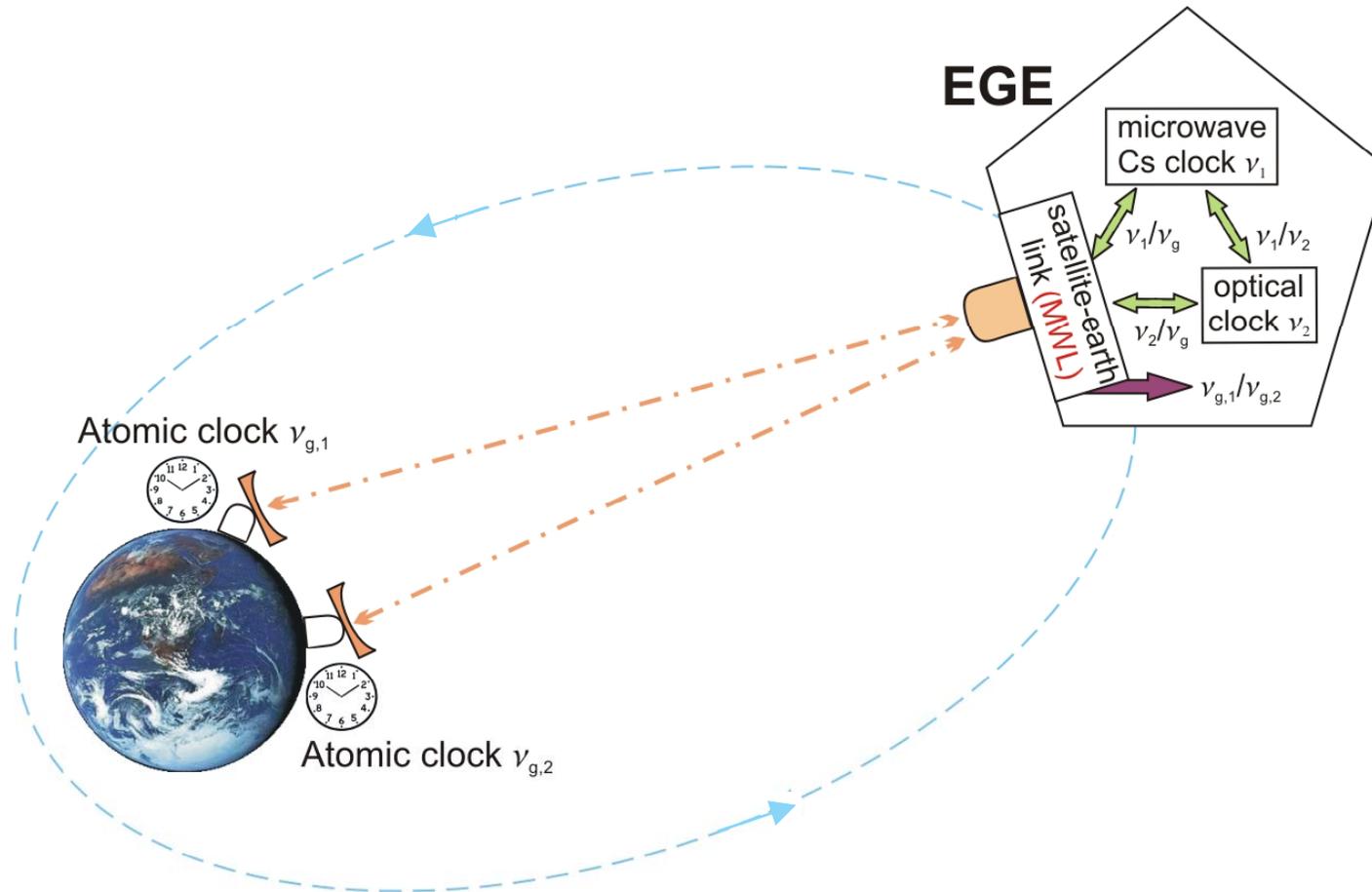
---

- Demonstrator  
(hochgenauer Vergleich entfernter terrestrischer Uhren über Transponder-Satellit; geophysikalische Anwendungen)
- Erdbundener Satellit mit 2 Atomuhren  
(ohne Beschleunigungssensor)
- Sonnenorbit, zu inneren Planeten
- Interplanetare Mission  
(Test der ART auf großen Distanzen)



Test des Schwachen Äquivalenzprinzips: Matter Wave Explorer of Gravity (MWXE)

# „Einstein Gravity Explorer“ (Class-M Vorschlag für Cosmic Vision 2015-2025)



- Hochelliptischer Orbit (2500/38000 km)
- 2 Atomuhren, optisch + Mikrowellen
- Vergleich zwischen Satelliten- und terrestrischen Uhren an  $\geq 2$  Bodenstationen
- Common-view Vergleiche von terrestrischen Uhren
- Missionsdauer 2 Jahre

# Ziele der EGE Mission

- Primary Goals:

- High-precision measurement of the gravitational redshift
- First precise measurement of sun gravitational time dilation
- Test of space-time variability of fundamental constants
- First search for neutron scalar charge
- Test of anomalous coupling of matter to quantum fields
- Test of Lorentz Invariance in the matter and photon sector
- Contribution towards establishing a new definition of the unit of time

Rel. inaccuracy  
25 ppb  
1 ppm  
30 ppb  
30 ppb  
×20 improv.

- Secondary Goals (outside fundamental physics):

- Establishment of a new approach for the determination of the geopotential
- Comparison of distant terrestrial clocks at  $10^{-18}$  level
- Demonstration of technology for future applications, e.g. in precision spacecraft navigation
- Demonstration of real-time range determination
- Comparison of orbit determination approaches
- Atmospheric signal propagation effects

1 ppb =  $1 \times 10^{-9}$

# Missionsszenarien

---

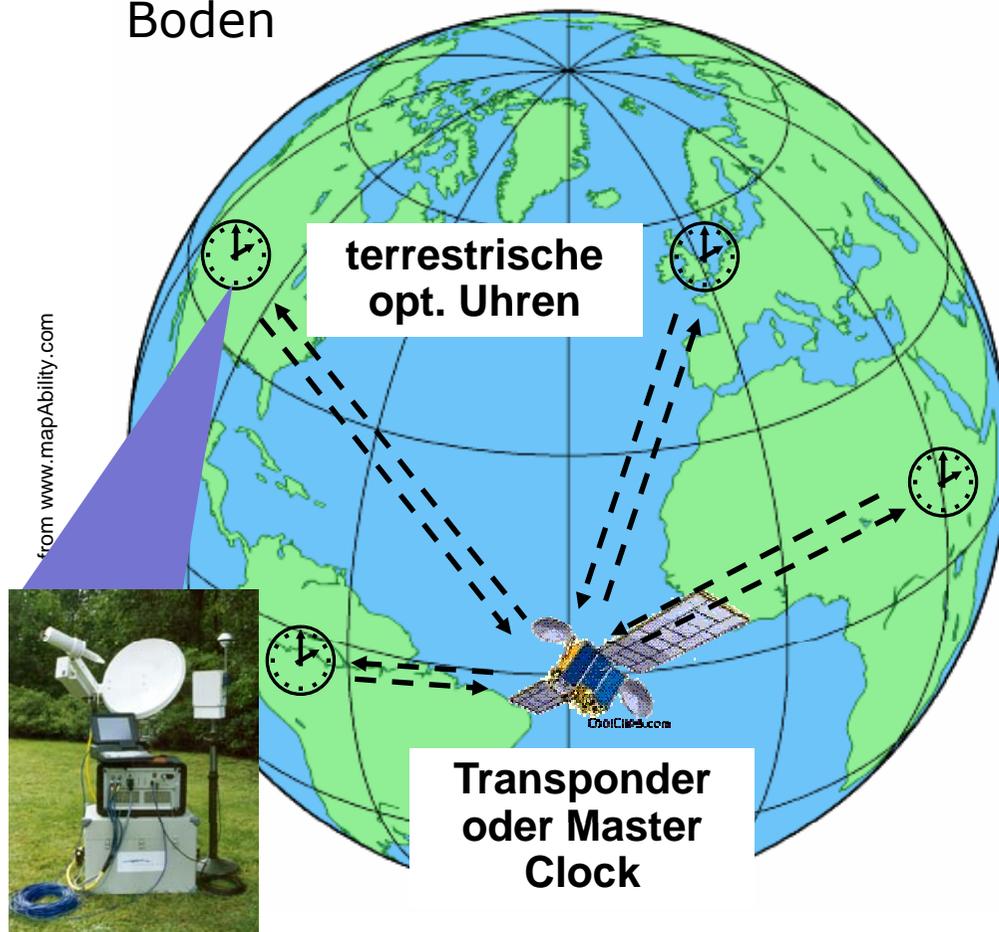
- Demonstrator
- Erdgebundener Satellit mit 2 Atomuhren
- Sonnenorbit, zu inneren Planeten  
(x 100 größeres Gravitationspotential, Konjunktion, Vgl. Missionsvorschlag ASTROD I, GTD)
- drag-free mittels Beschleunigungsquantensensor
- Optische Uhren, Vergleich mit terrestrischer Uhr
- Messung der Rotverschiebungen (Beitrag 2. Ordnung in  $U/c^2$ )
- Messung des Shapiro-Effekts,  $\gamma$  mit Ungenauigkeit  $2 \cdot 10^{-8}$
- Interplanetare Mission (Test der ART auf großen Distanzen), z.B. Missionsvorschlag SAGAS, Pioneer Anomaly



Test des Äquivalenzprinzips: Matter Wave Explorer of Gravity (MWXE)

# Anwendung von Quantensensoren

- Direkte Messung des Geopotentials  $U(\mathbf{r})$  mit höchster räumlicher Auflösung durch Verwendung der Gravitationsrotverschiebung
- Komplementär zu Gravimetern oder Satelliten-Gravimetrie
- Liefert Informationen z.B. über Änderungen z.B. Wasserhaushalt im Boden



Vergleich von Uhren  
mit Genauigkeit  $10^{-18}$  mit einer  
„Master Clock“



Bestimmung von  $U$   
mit äquivalenter  
Höhenauflösung von 1 cm

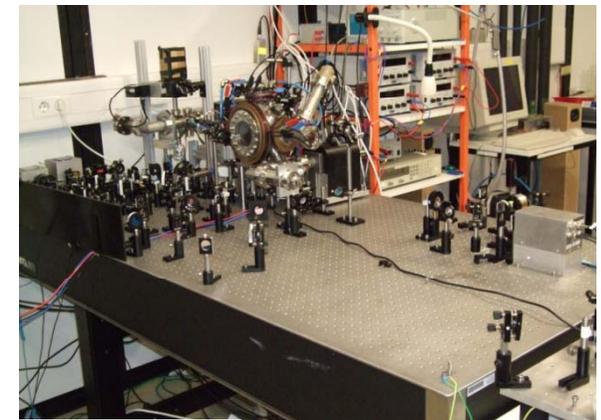
Netzwerk von  
(transportablen) optischen  
Uhren zum kontinuierlichen  
Monitoring des Geopotentials

# Deutsche Aktivitäten & Voraussetzungen

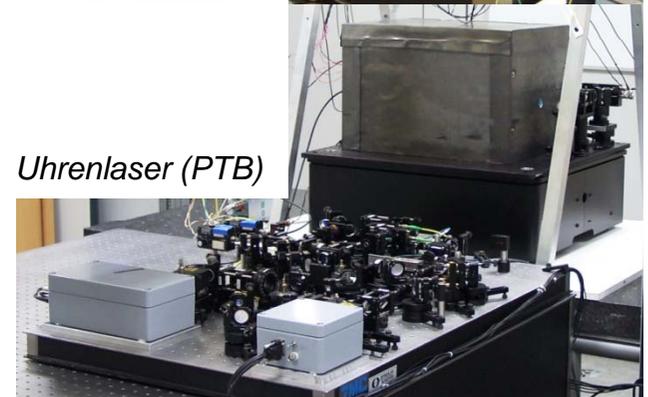
---

- Erbe: Grundlegende Entwicklungen zur Quantenoptik (Laserspektroskopie, Ionenfallen, ultrastabile Laser, optischer Frequenzkamm, optische Uhren, Atominterferometer, Präzisionsexperimente,...)
- Zahlreiche Forschungsgruppen (experimentell, theoretisch, Universitäten, MPI, PTB)
- Industrie
  - Raumfahrtbereich (Optik, Mikrowellen, Laser, Elektronik)
  - Lasertechnologie (Menlo Systems, TOPTICA,...)
- Grundlagenuntersuchungen für zukünftige weltraumtaugliche Sensoren
  - „Space Optical Clocks“ (ESA/DLR)
  - „QUANTUS“ (DLR)
  - „Space Atom Interferometer“ (ESA)

*Transportable Yb-Gitteruhr (U. Düsseldorf)*



*Uhrenlaser (PTB)*



# Förderbedarf

- Technologische Entwicklung von kritischen Komponenten in Hinblick auf Weltraumanwendungen (u.A. kompakte, langlebige Lasersysteme, Atomquellen, Automatisierung, Strahlungsresistenz)



Lasersystem PHARAO

- Entwicklung zu kompakten Demonstratoren und Tests (~ 4-5 Jahre)
  - Optisch-Mikrowellen-Oszillator (Laser, Referenzresonator, und Frequenzkamm)
  - Optische Uhr (Einzelionenuhr, Gitteruhr)
  - Zeit-/Frequenzvergleiche (Mikro wellen/optisch)
  - Atominterferometer
- Engineering-Modelle
- Entwicklung neuer Technologien/Systeme
  - Chipfallen, Fallenarrays
  - Neuartige Systeme (Laser, Moleküle, Kerne)

U. Ulm

