

Ein modernes Michelson-Morley Experiment

(Die Relativitätstheorie auf dem Prüfstand)

**Moderne Physik und Schule
WS2009/2010**

Humboldt-Universität zu Berlin



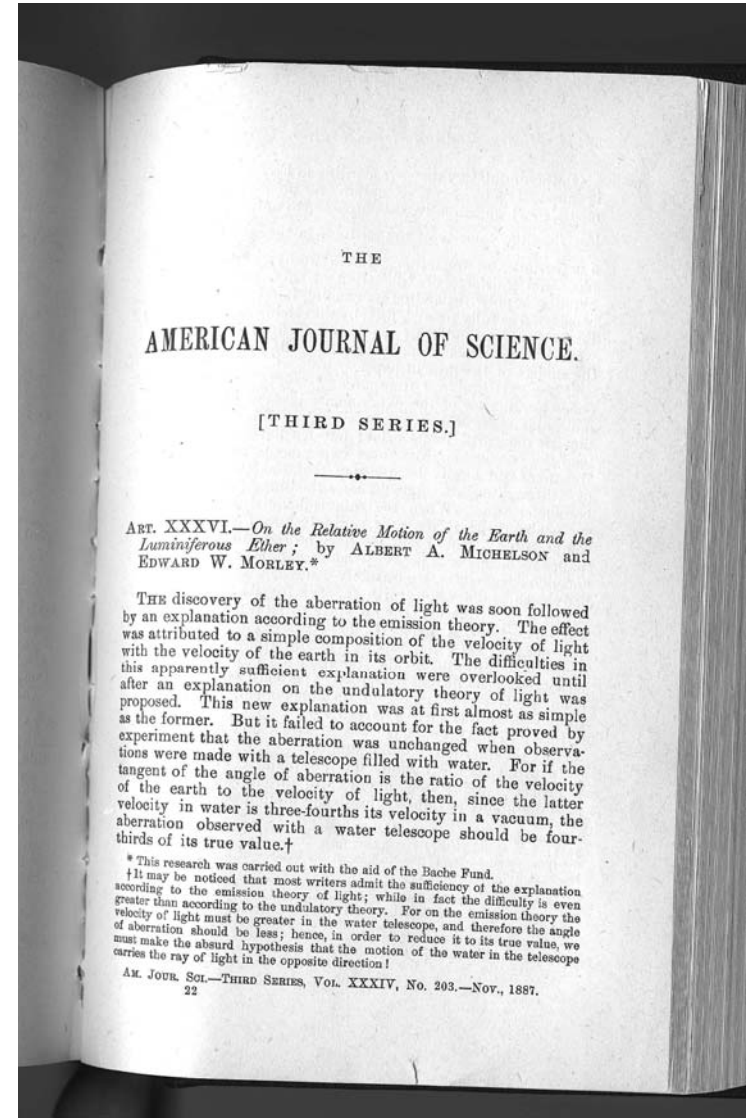
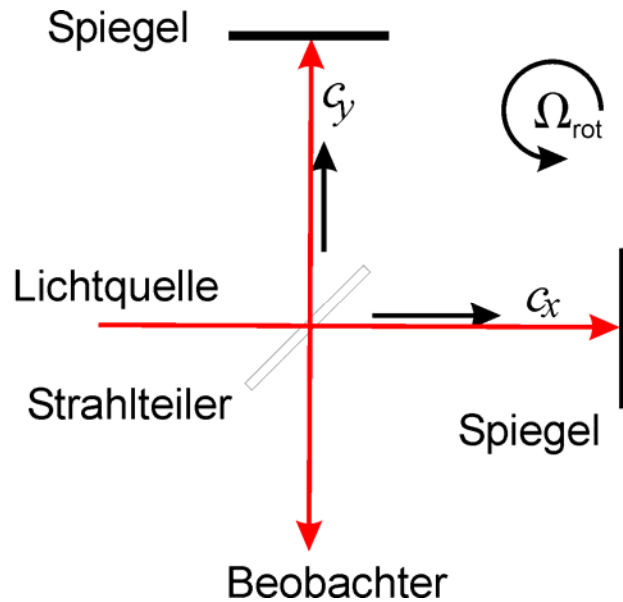
- Motivation und Einführung
- Was ist ein modernes MM-Experiment
- Moderne MM-Experimente
- Datenanalyse und Ergebnisse
- Verschwörung?
- Zusammenfassung und Ausblick



Motivation und Einführung



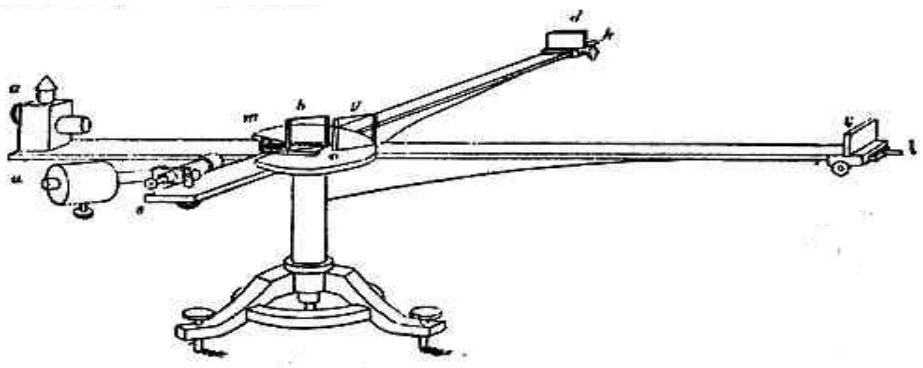
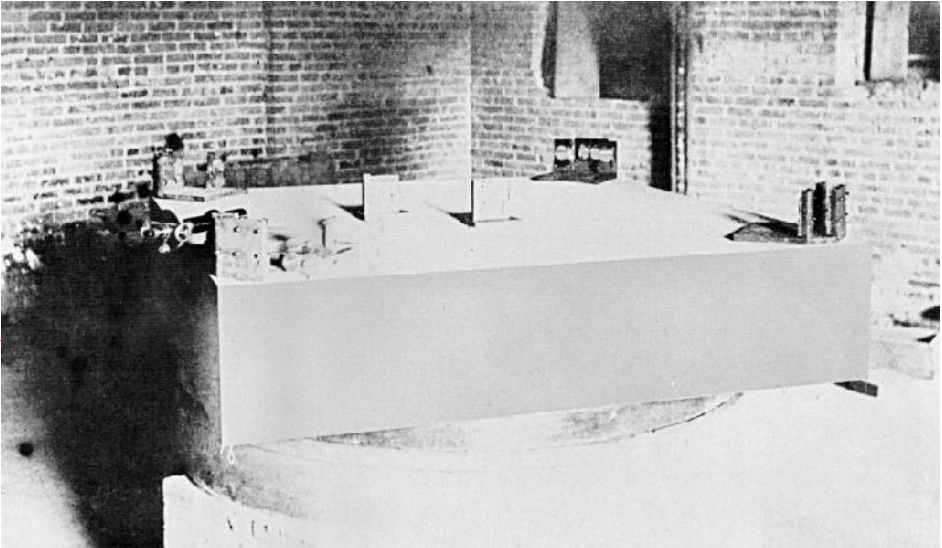
Klassisches Michelson Morley Experiment





Ein modernes Michelson-Morley Experiment

Klassisches Michelson Morley Experiment



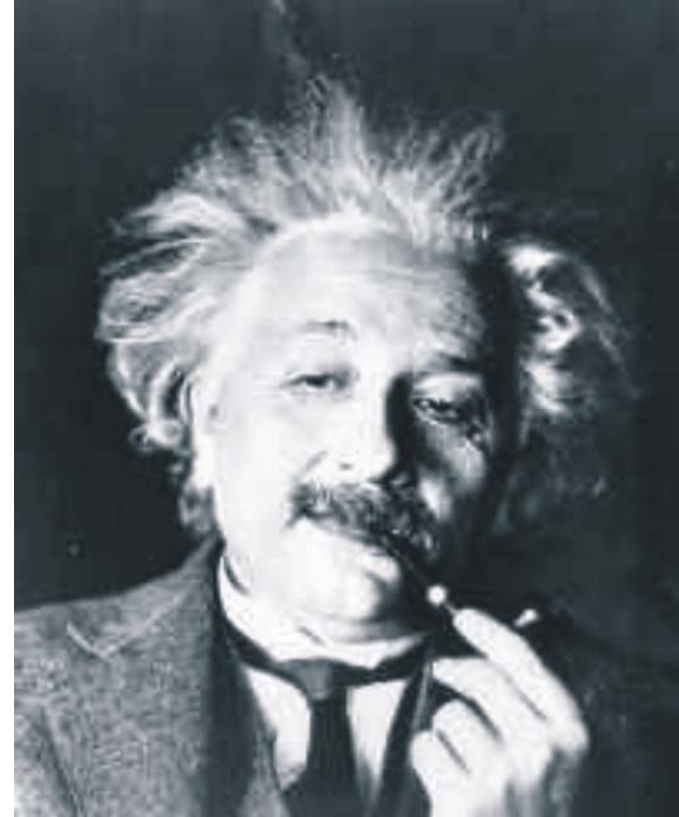


Ergebnis:
Der “Ether” vorhergesagt
durch klassische Theorien
existiert nicht! (?)



Albert Einsteins "Spezielle Relativitätstheorie"

$$\left\{ \begin{array}{l} x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ y' = y \\ z = z' \\ t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{array} \right.$$



Die Lorentzinvarianz ist inzwischen eines der Fundamente der modernen Physik!



Allgemeine Relativitätstheorie (1915): Gravitation

Spezielle Relativitätstheorie (1905)

Isotropie

Geschw.
Invarianz

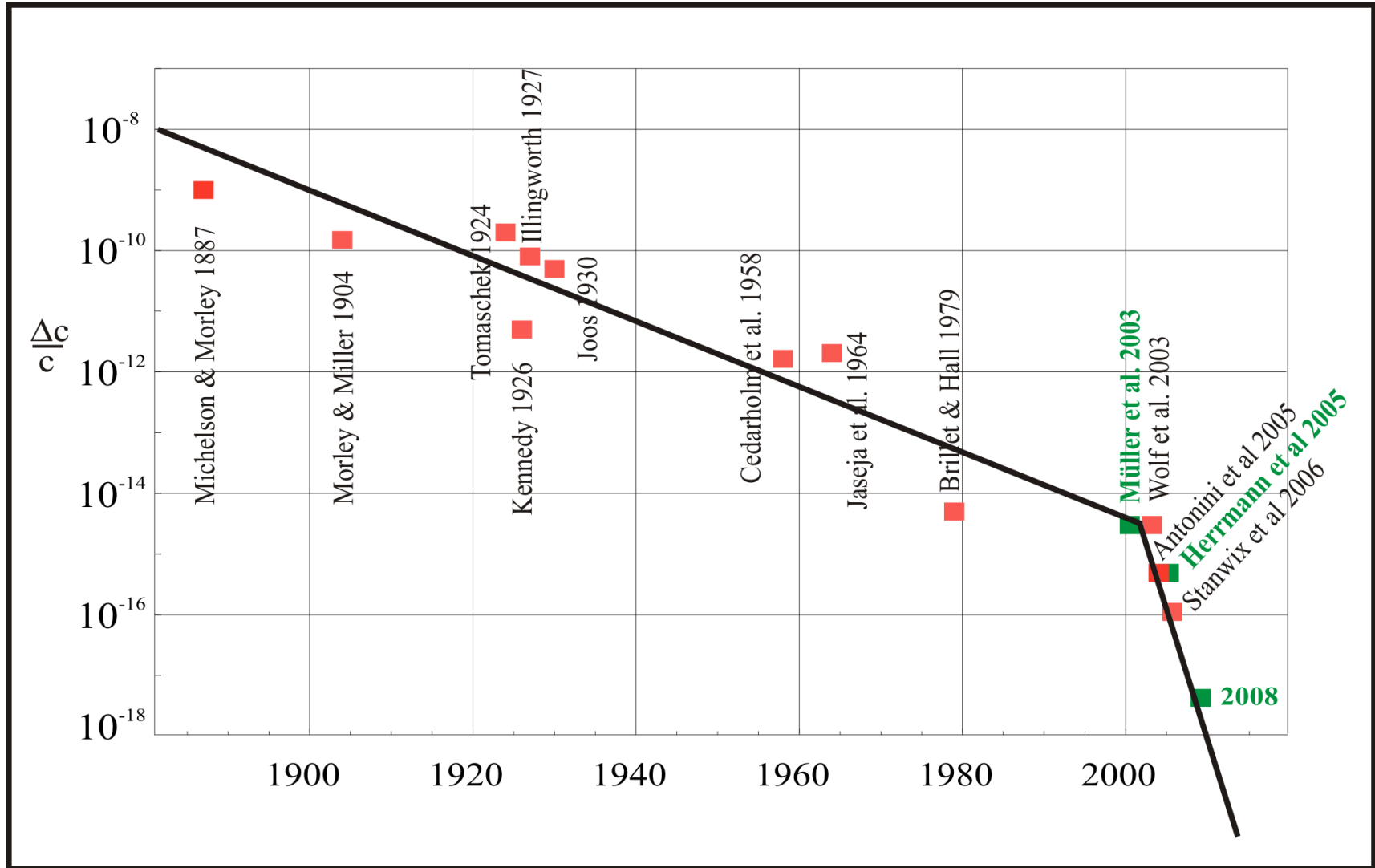
Zeit-
dilatation

Lokale Pos.-
Invarianz

Äquivalenz-
Prinzip



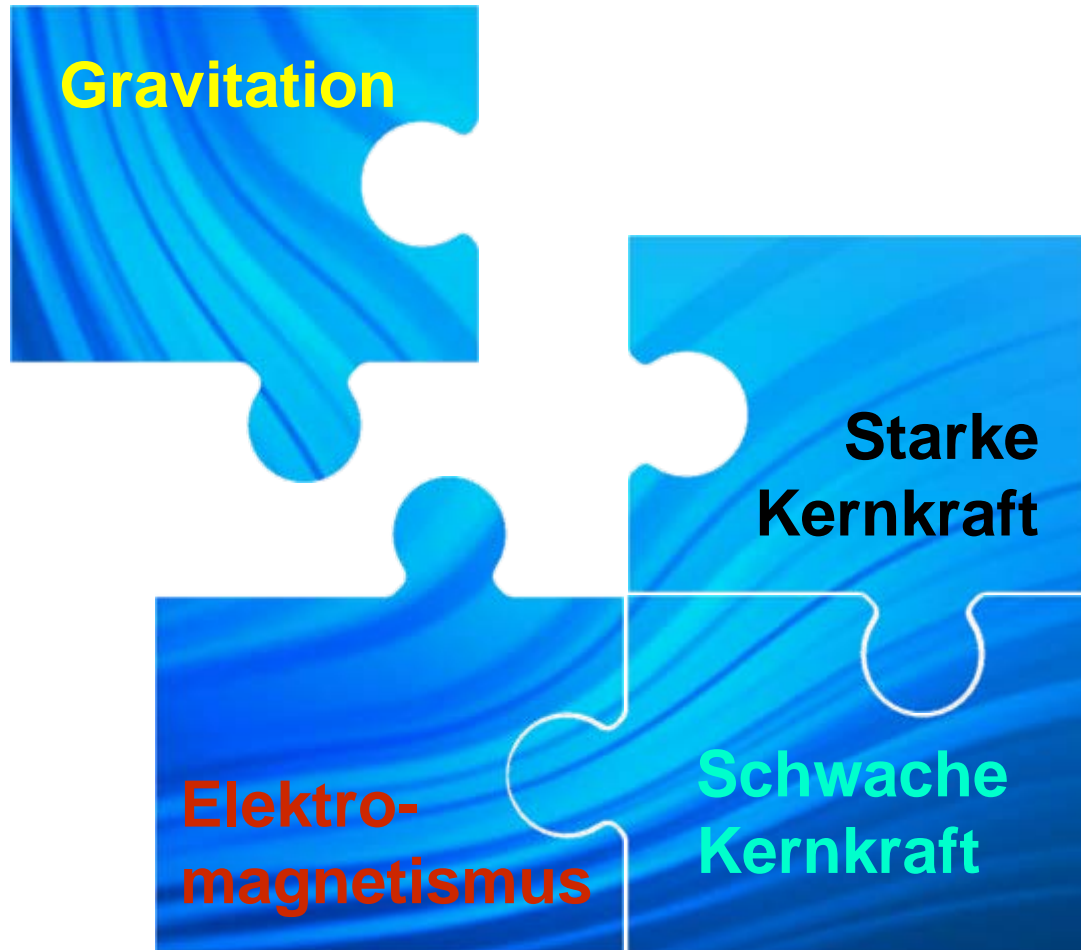
Weitere Michelson-Morley Experimente...





***Warum wird weiterhin nach einer
Verletzung der Lorentzinvarianz
gesucht ?***

Heutige Motivation...



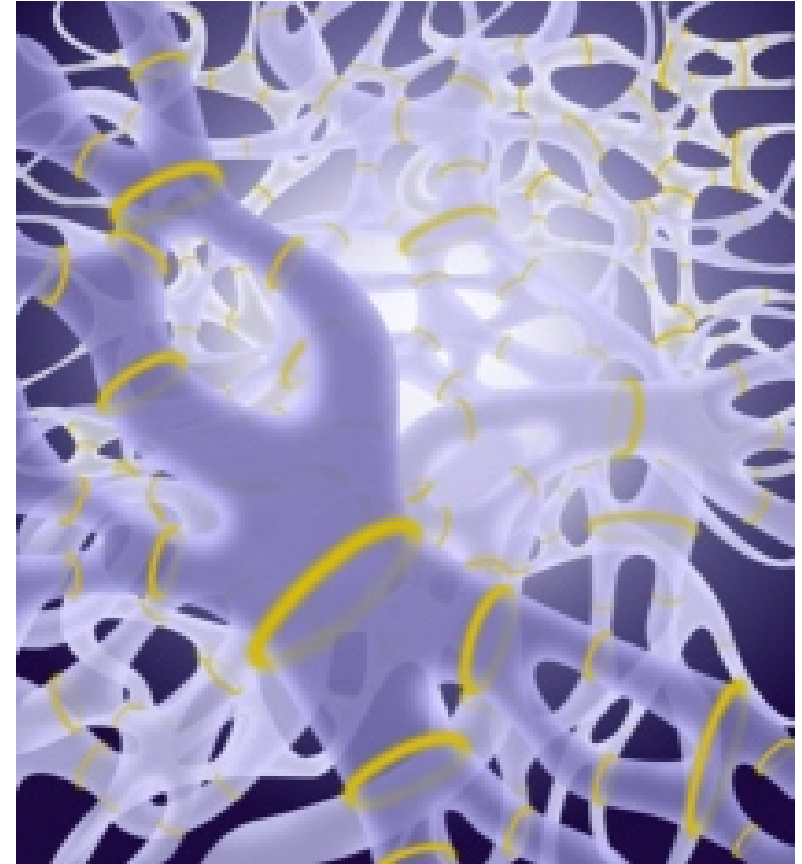
Animation: Claus Lämmerzahl



**Moderne Ansätze
(Stringtheorie, Loop
Quantengravitation,
etc.)**



**Verletzung der
Lorentzinvarianz!**

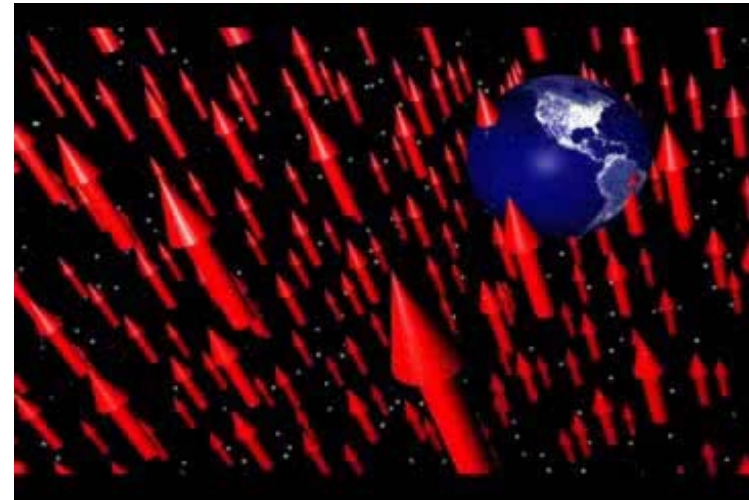
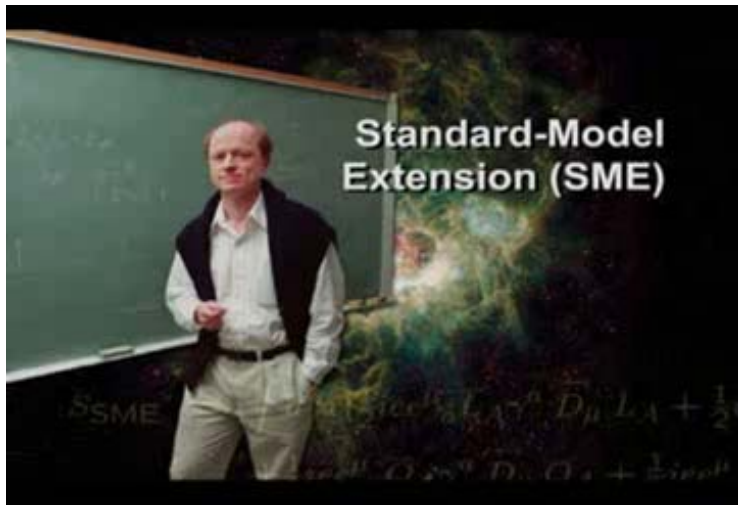


**Sehr komplizierte Theorien!
Keine „brauchbaren“ Vorhersagen!**



Standard Model Erweiterung (SME)

Ansatz: Erweitere das Standardmodell der Elementarteilchen um alle sinnvollen CPT- und Lorentzinvarianz-verletzenden Terme.



Example: $\mathcal{L} = - \underbrace{\frac{1}{4} F^{\mu\nu} F_{\mu\nu}}_{\text{Standard Lagrangian}} - \underbrace{\frac{1}{4} (k_F)_{\kappa\lambda\mu\nu} F^{\kappa\lambda} F^{\mu\nu}}_{\text{Lorentz Invariance violating Extension}}$

→ Modifications of Maxwell's equation of motion

→ $(k_F)_{\kappa\lambda\mu\nu}$: 19 independent parameters

Verschwinden oder Nichtverschwinden der SME-Parameter gibt Auskunft über Fundamentale Theorie von Allem

Colladay & Kostelecký, Phys. Rev. **D55**, 6760 (1997),
Colladay & Kostelecký, Phys. Rev. **D58**, 116002 (1998)



Warum testet man also die Lorentzinvarianz?

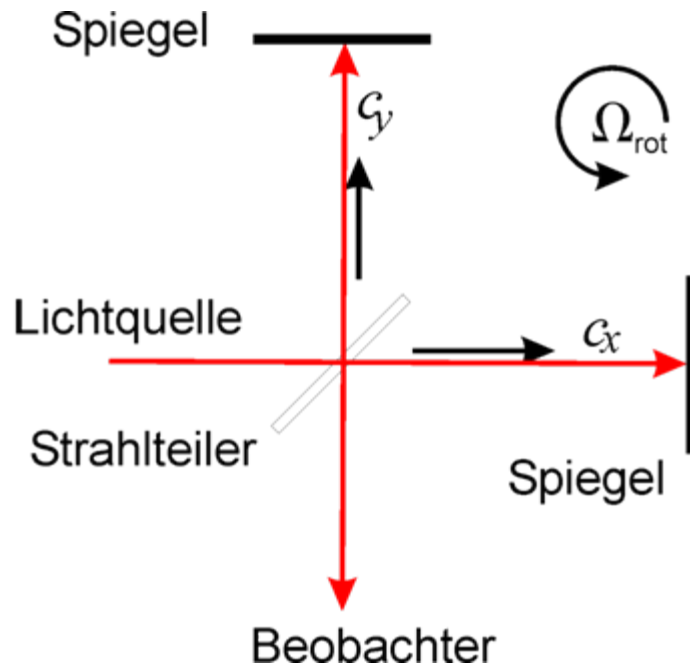
- Die Suche nach einer Theorie von Allem
 - Vorhersage einer möglichen Verletzung der lokalen Lorentzinvarianz
 - SME als Testtheorie
- Fundamentales Prinzip der modernen Physik
 - Bestätigung mit höchster Präzision ist generell interessant



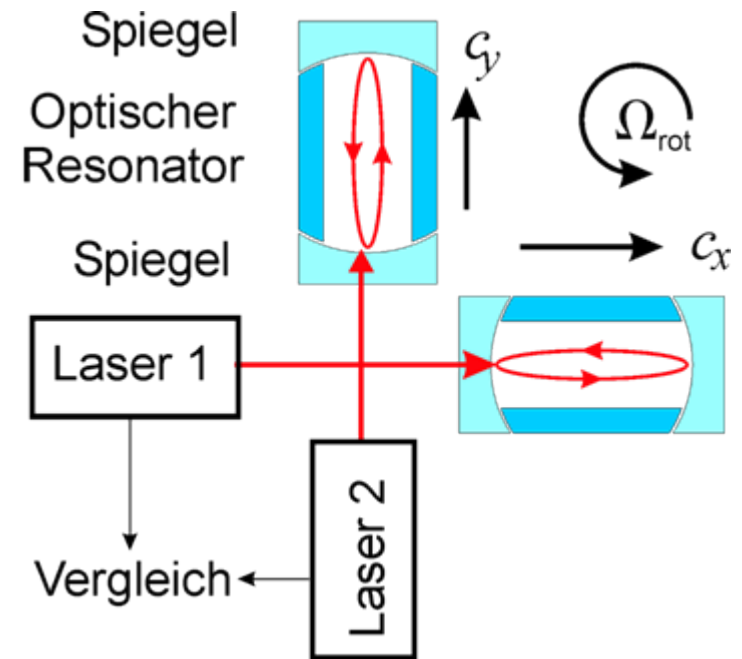
Was ist ein modernes Michelson-Morley Experiment

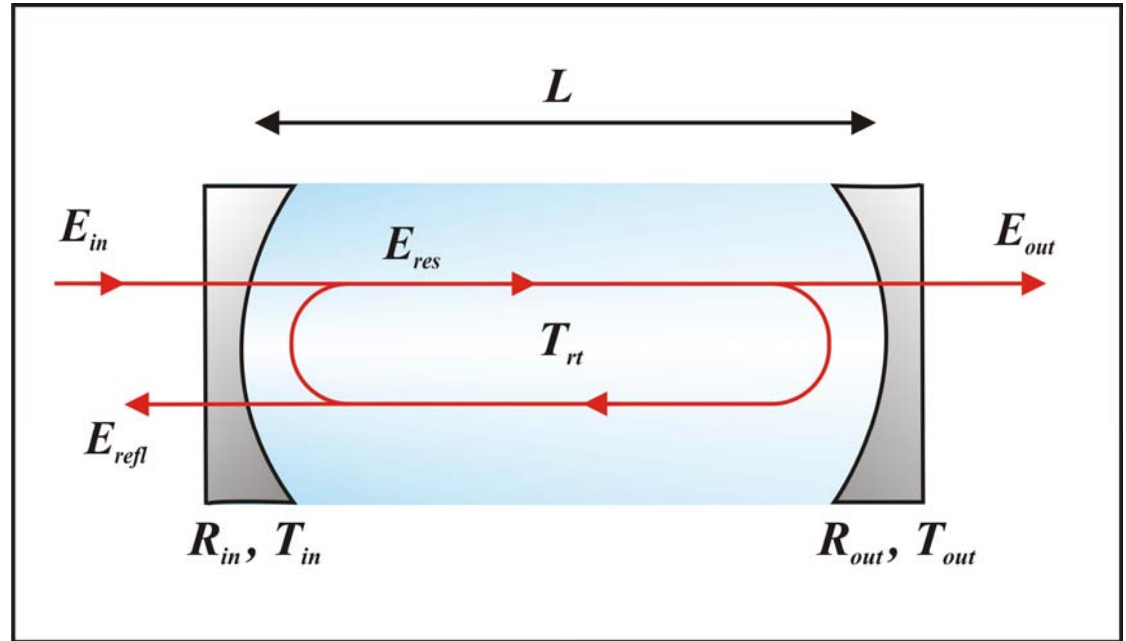
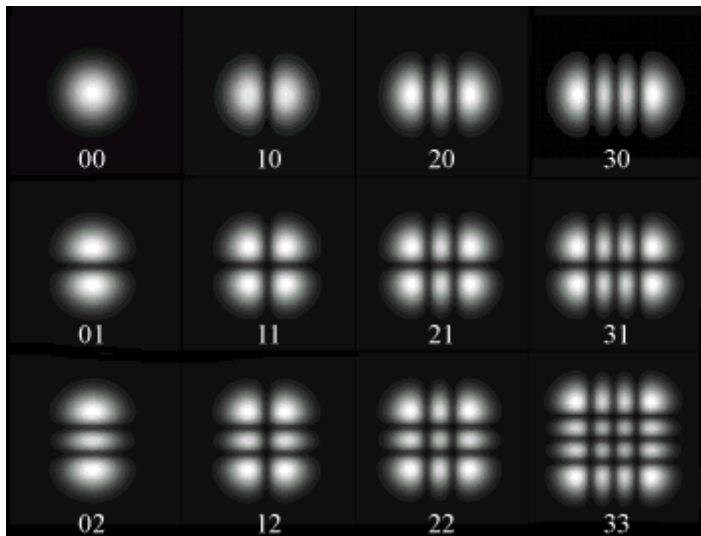
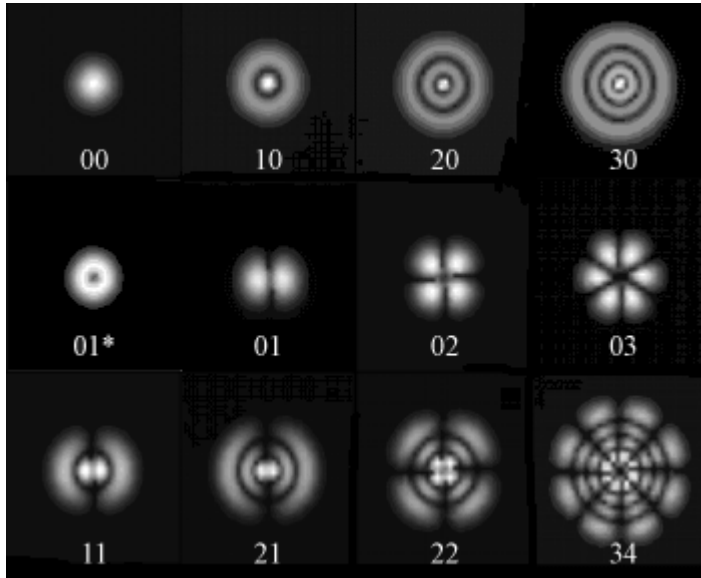


**Michelson (1881, Potsdam)
Michelson & Morley (1887, Cleveland)**



Moderne Variante



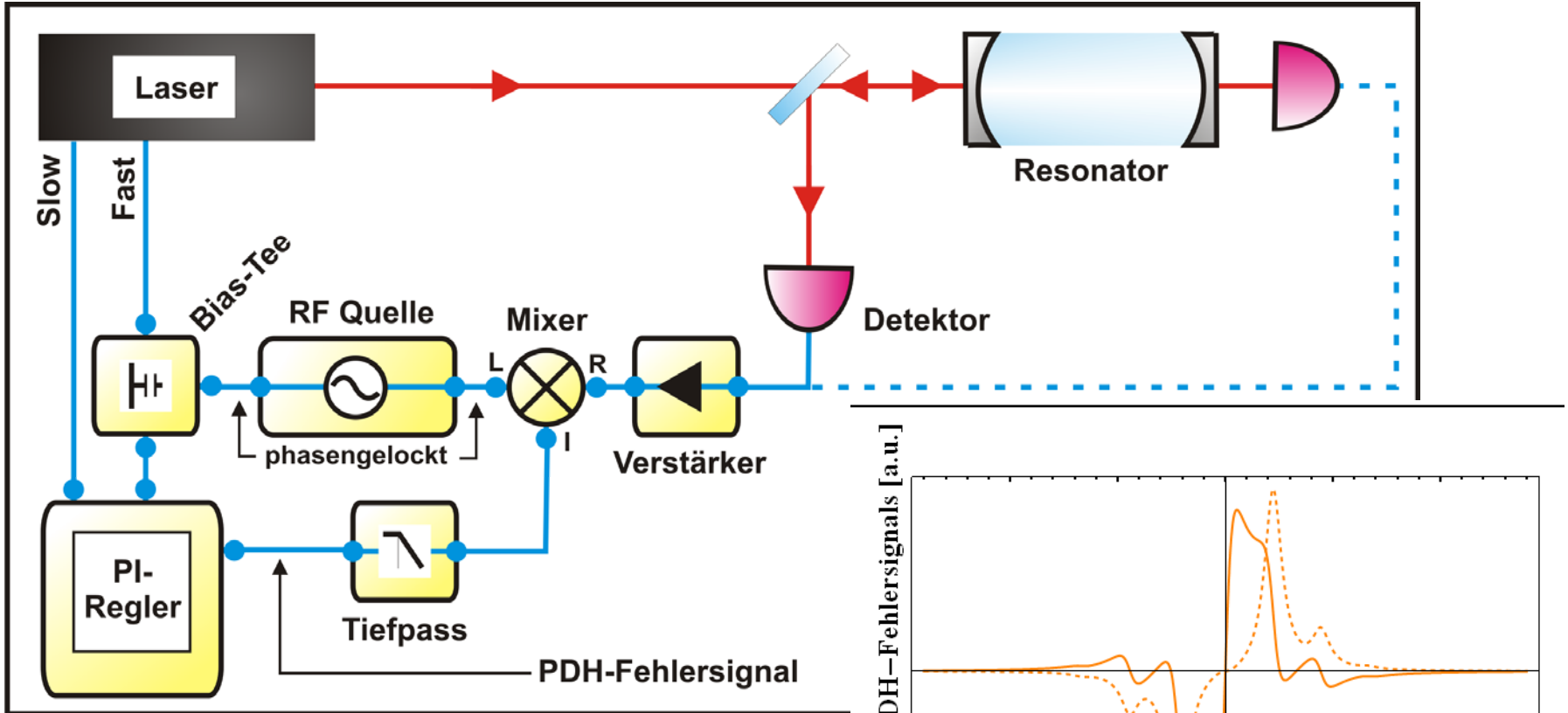


$$\text{TEM}_{00} \longrightarrow \boxed{v_q \propto q \frac{c}{2nL}}$$

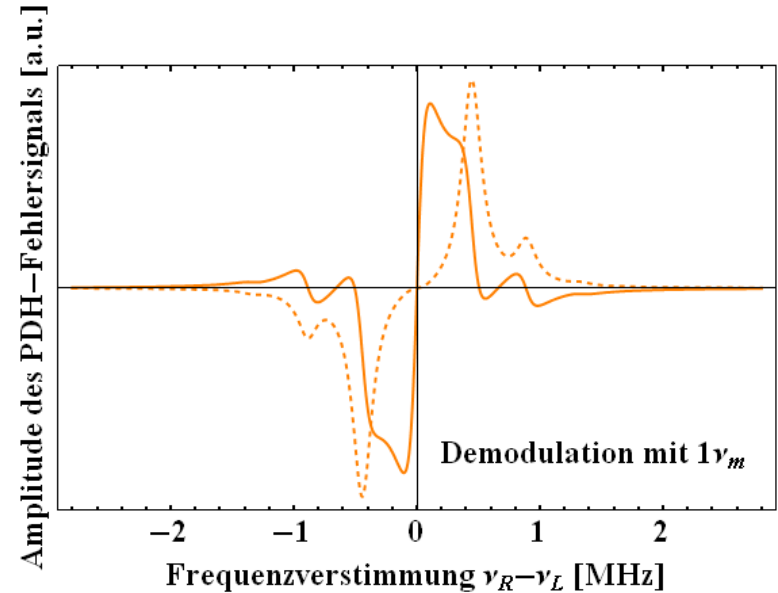
$$\boxed{\frac{\delta v}{v} = \frac{\delta c}{c} - \frac{\delta L}{L} - \frac{\delta n}{n}}$$



Pound-Drever-Hall-Frequenzstabilisierungsverfahren

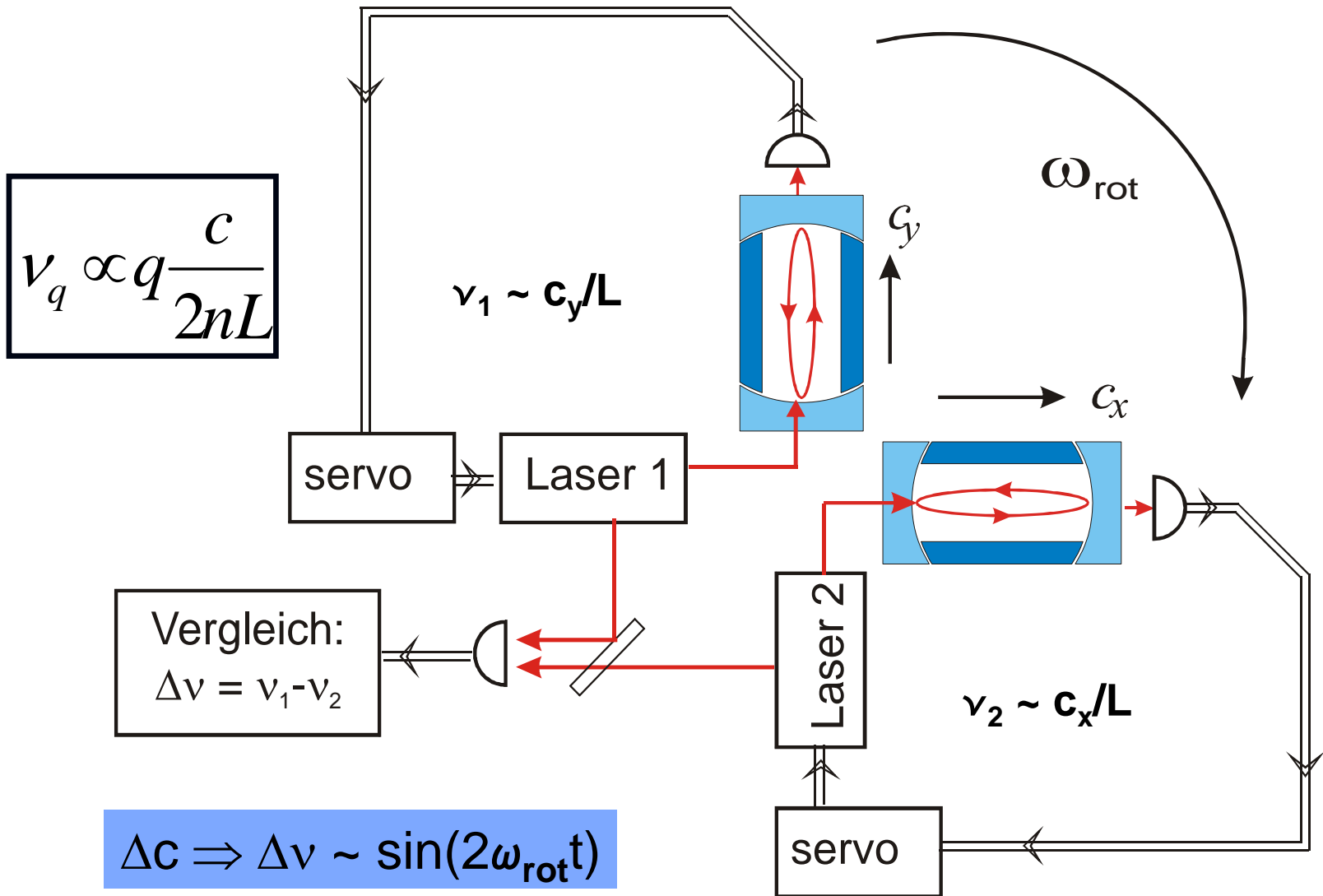


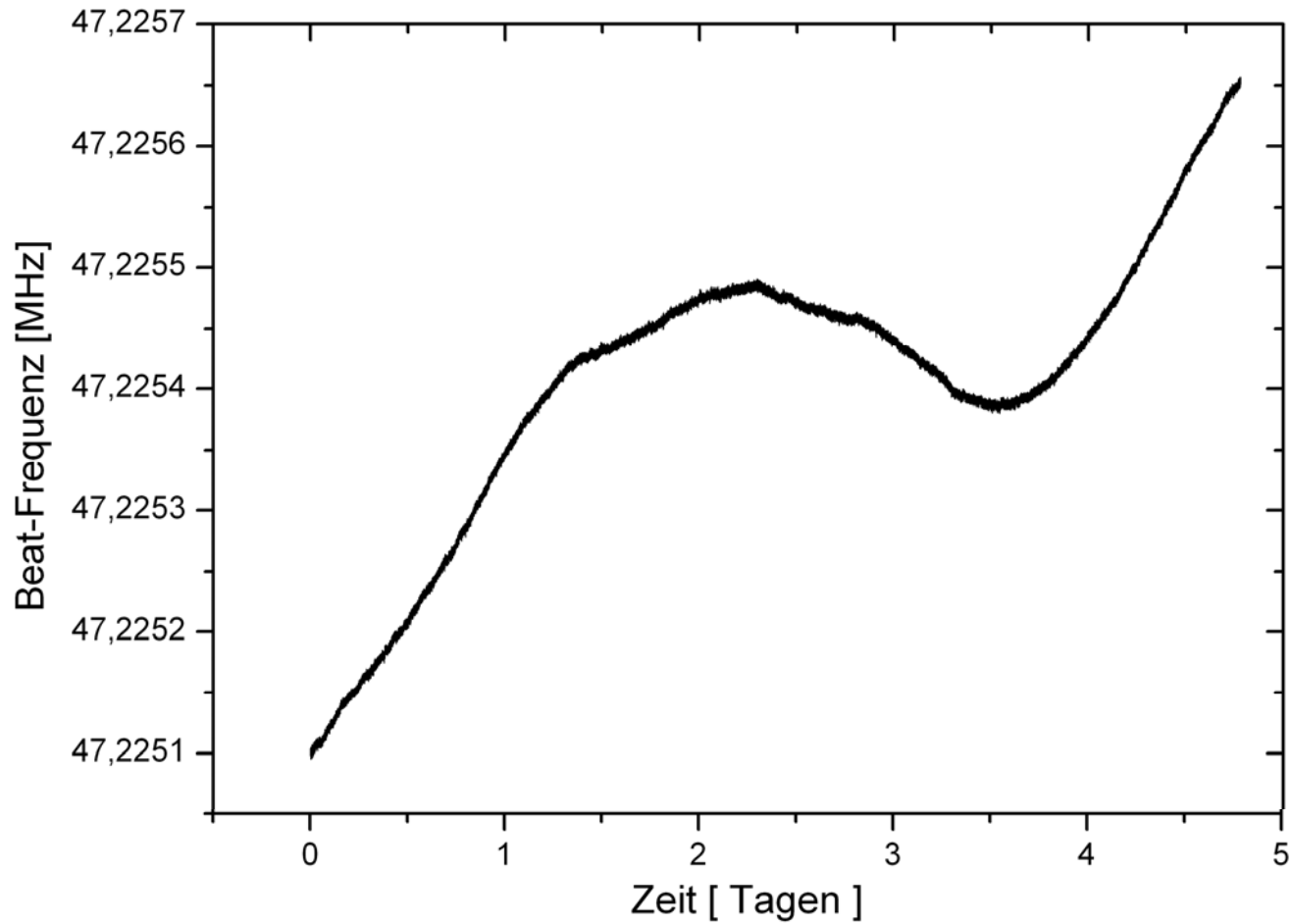
Stabilisierung der Laserfrequenz auf eine Eigenfrequenz des Resonators

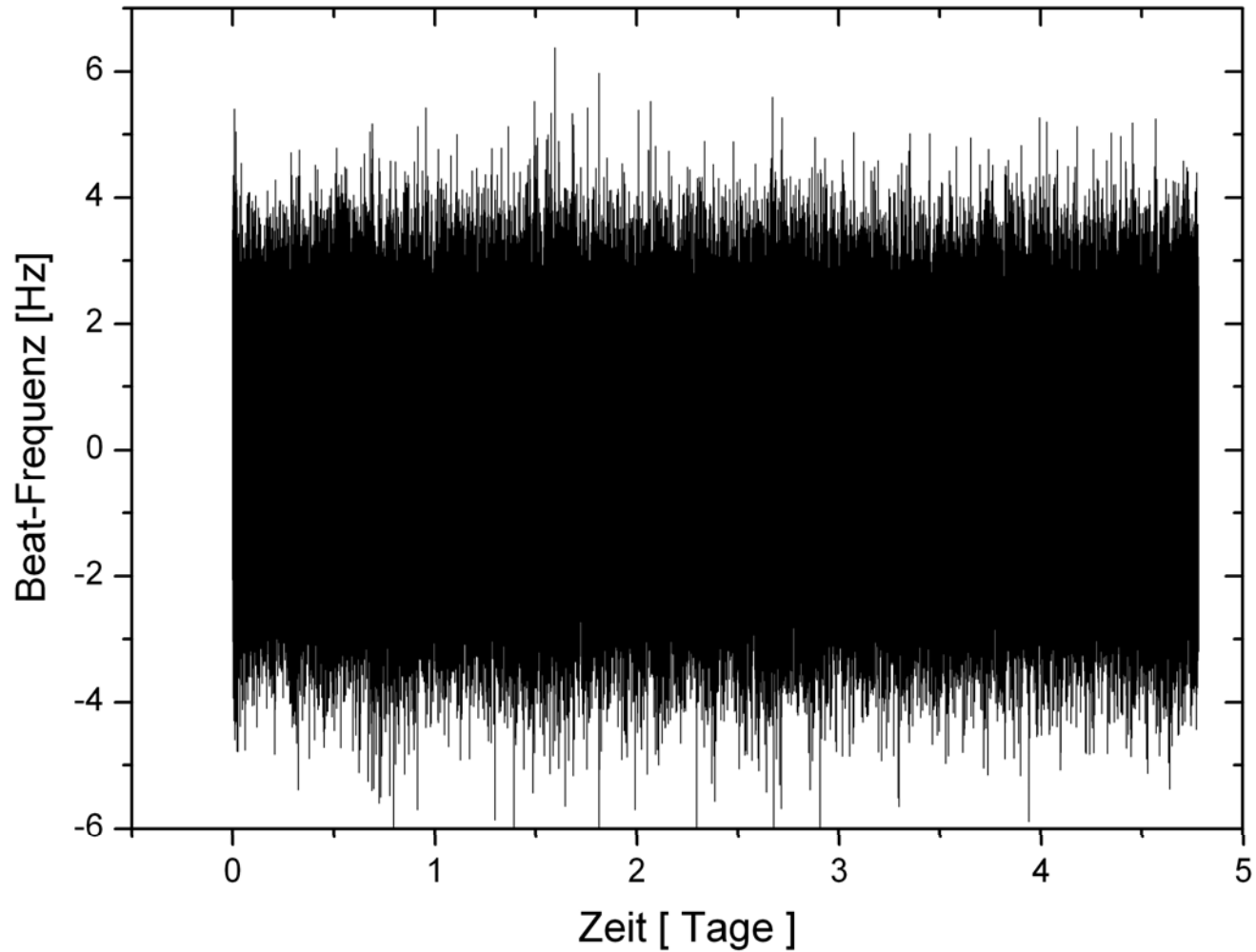


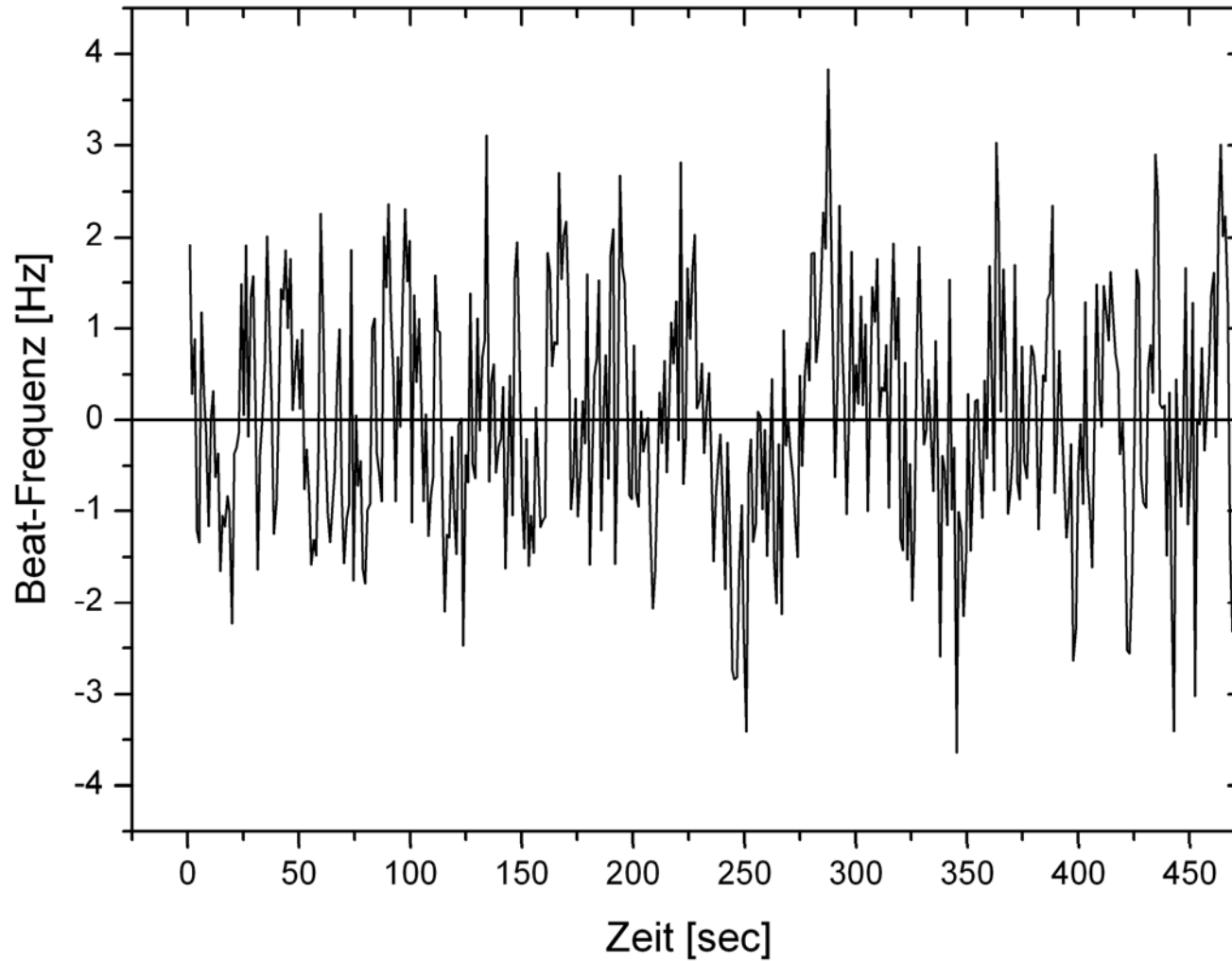


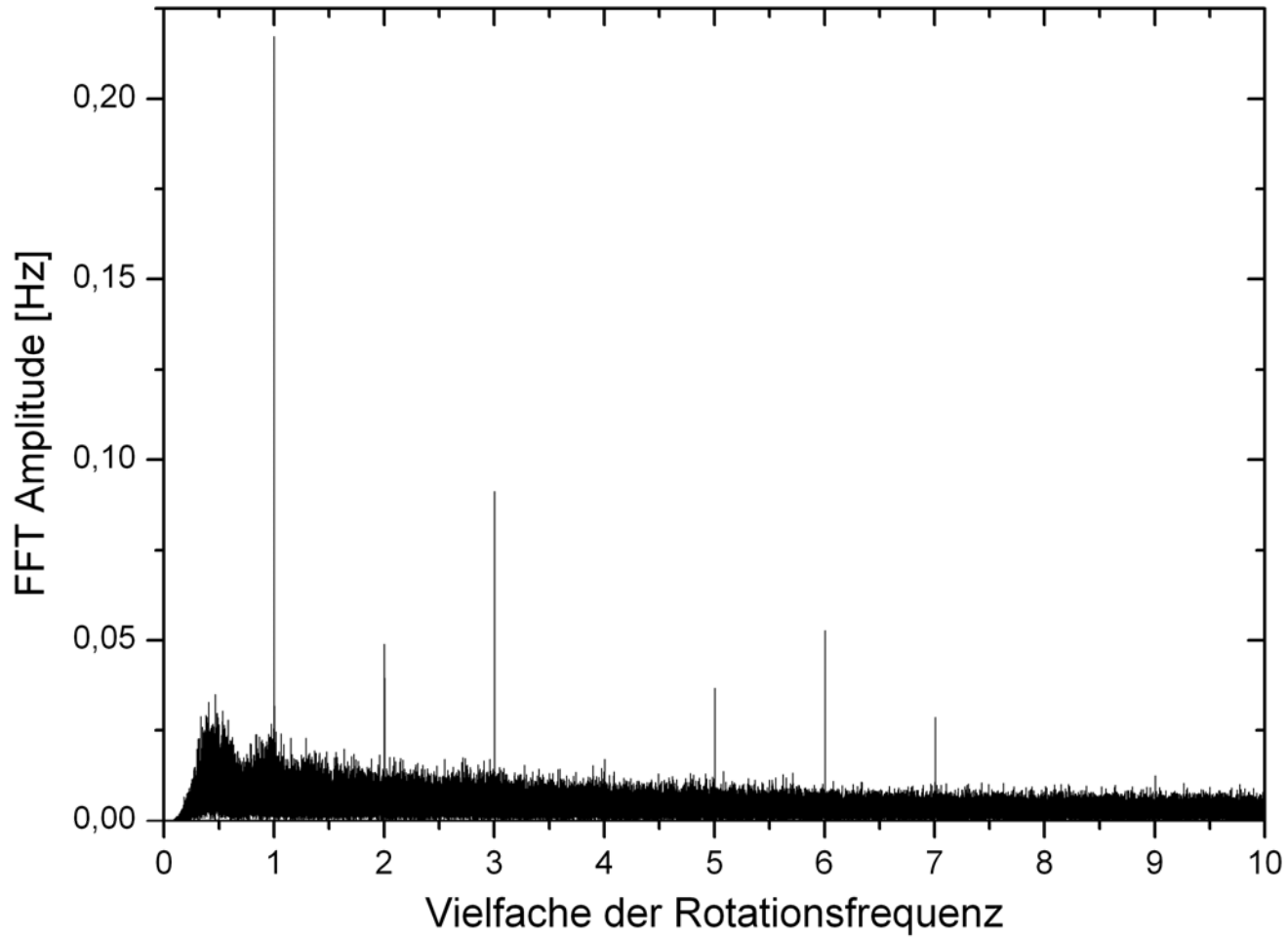
Messprinzip







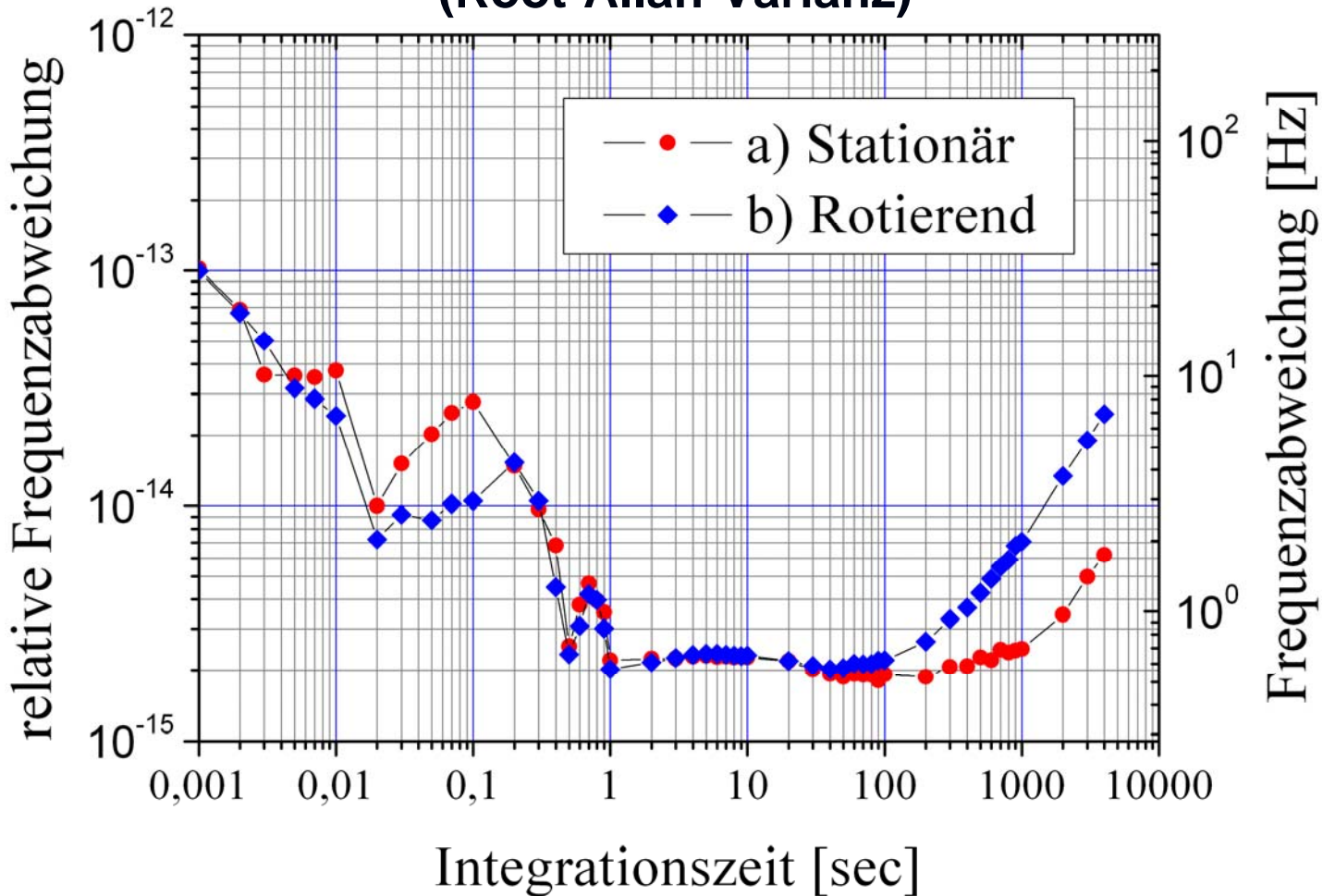








Frequenzstabilität (Root-Allan-Varianz)

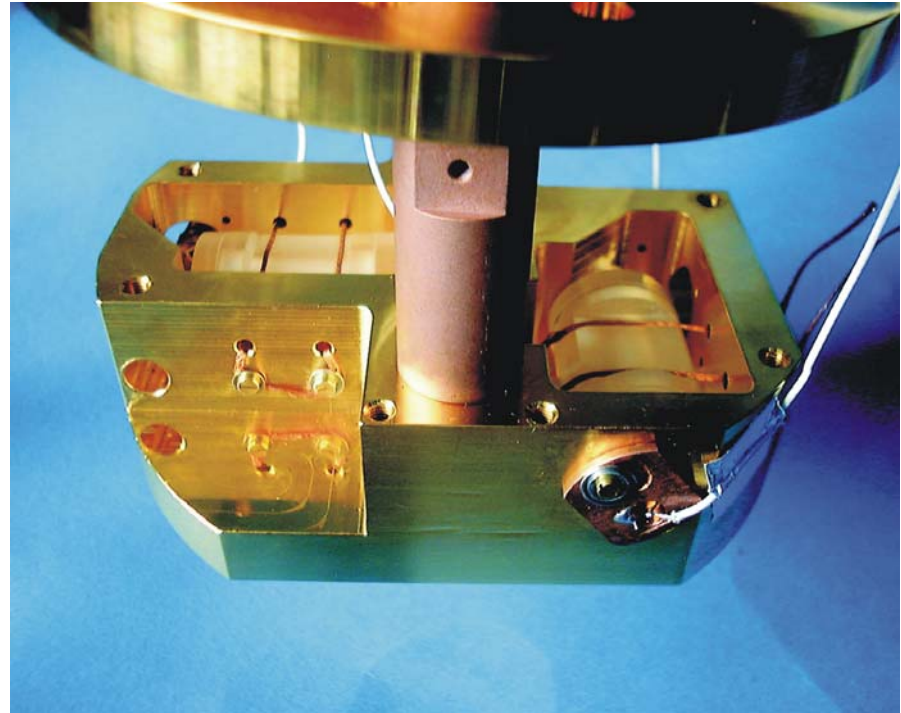
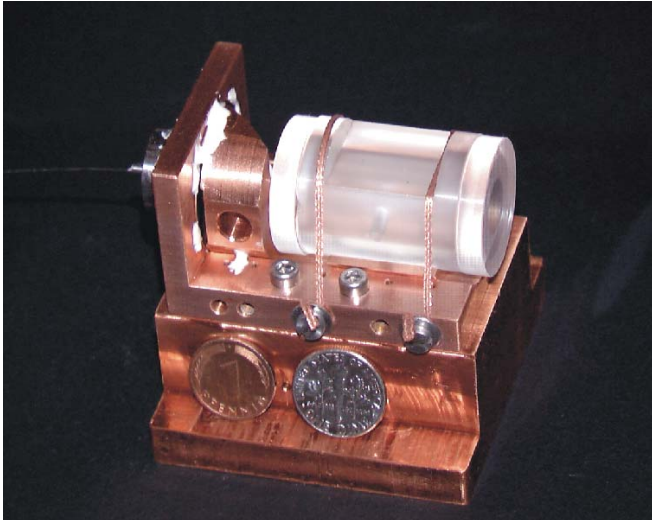




Moderne Michelson-Morley Experimente

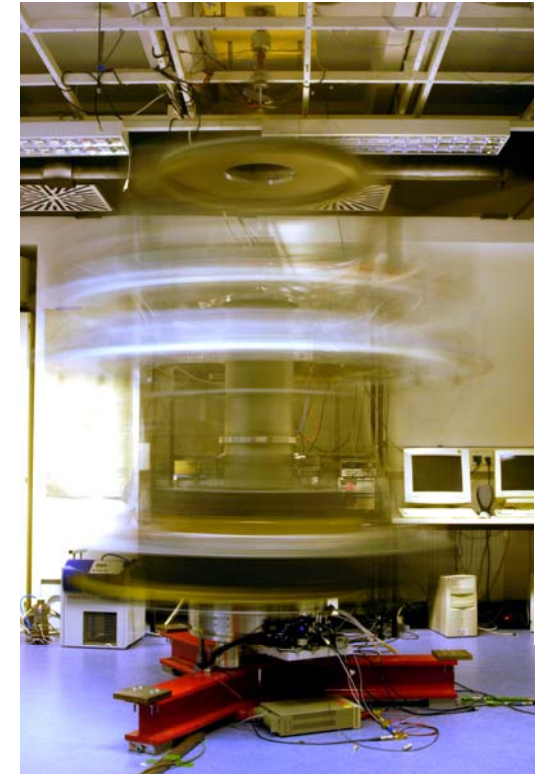
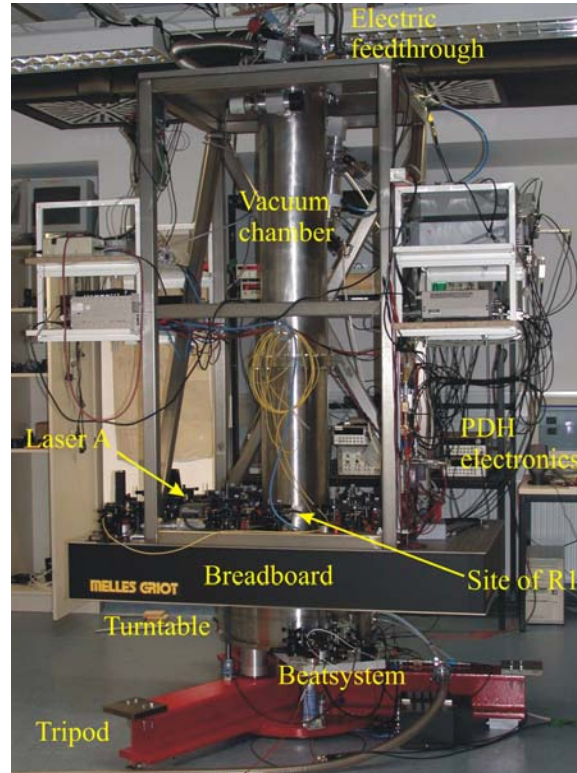
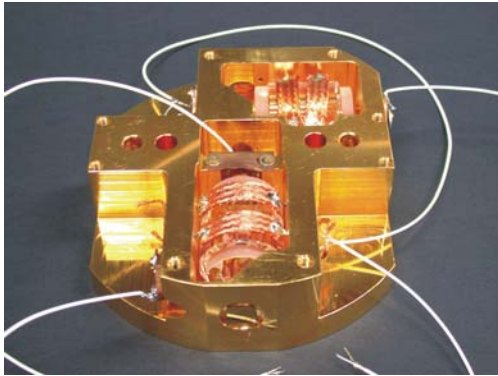


First Generation Experiment (Konstanz)



- Cryogenic sapphire optical resonators (CORE)
- Operated at LHe temperature (4.2 K)
- Solely relied on Earth's rotation
- ~ one year of data

$$\delta\nu = (0.73 \pm 0.48) \text{ Hz}$$
$$\delta c/c = (2.6 \pm 1.7) \cdot 10^{-15}$$



- Used fused silica resonators (BK7 mirrors)
- Operated at room temperature
- Used precision air-bearing turntable
- ~ 1 year of data (with large gaps)

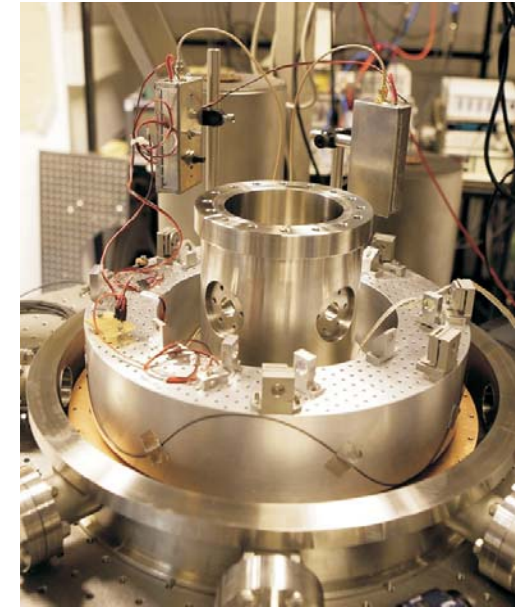
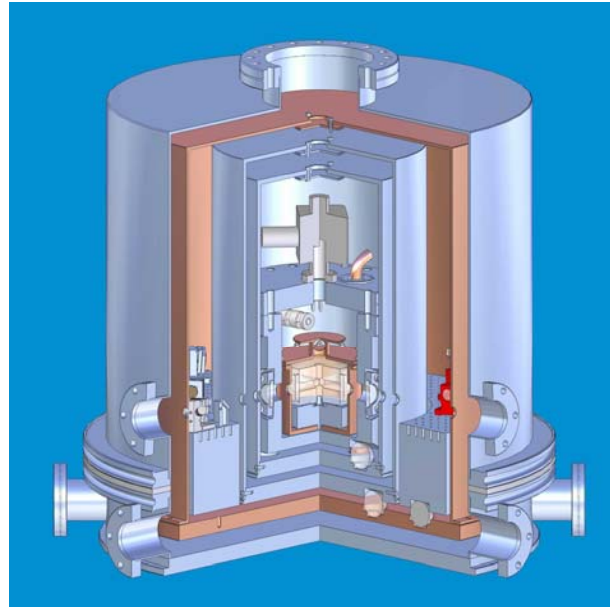
$$\delta\nu = (0.070 \pm 0.076) \text{ Hz}$$

$$\delta c/c = (2.5 \pm 2.7) \cdot 10^{-16}$$



Ein modernes Michelson-Morley Experiment

Third Generation Experiment (Berlin)

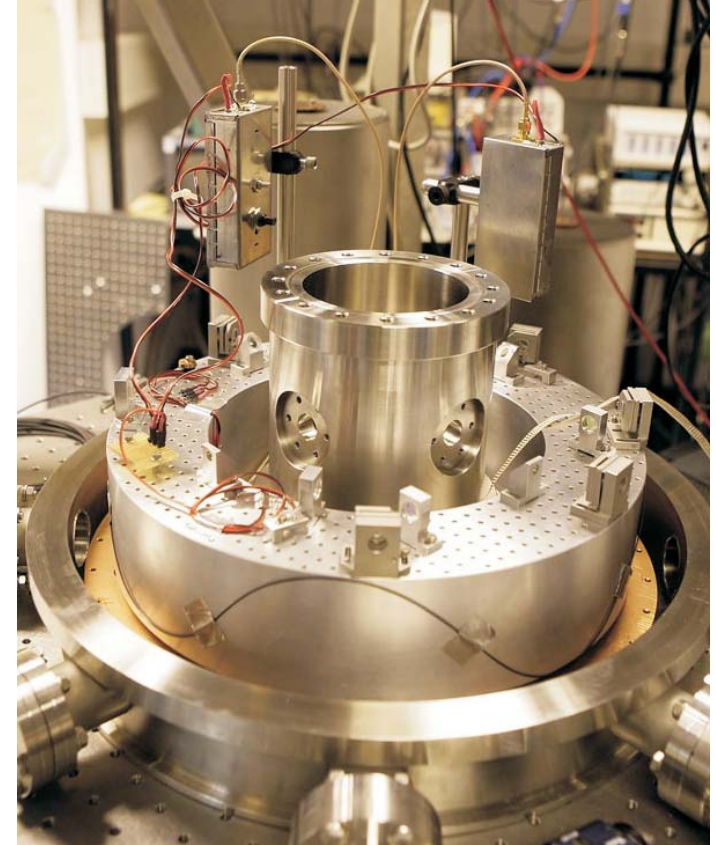
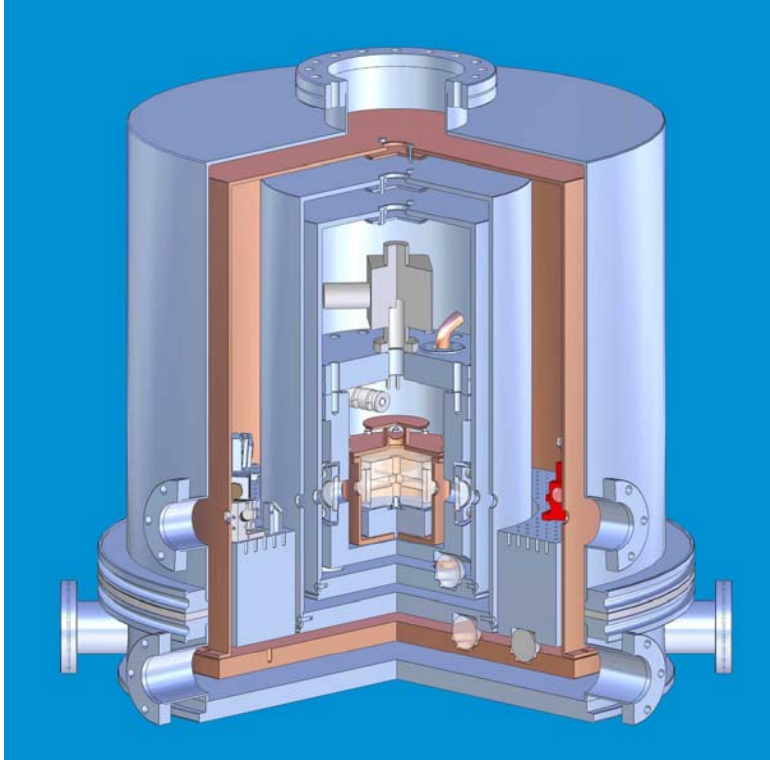


**Optimiertes modernes Michelson Morley Experiment unter
Raumtemperaturbedingungen**



Fused Silica Resonators

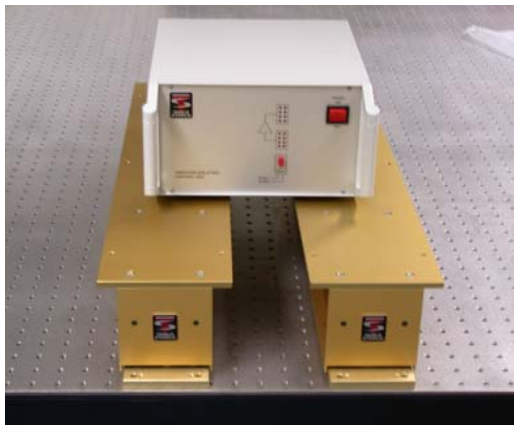
- special design
- monolithic block made of fused silica
- length: 5.5cm
- high common mode rejection
- small linewidth (6.5kHz)
- high finesse ~ 400 000



- High mechanical stability
- Extremely high thermal insulation ($T_{th} \sim 1$ week)
- Coupling optics inside the vacuum chamber
- UHV inner vacuum chamber for resonators

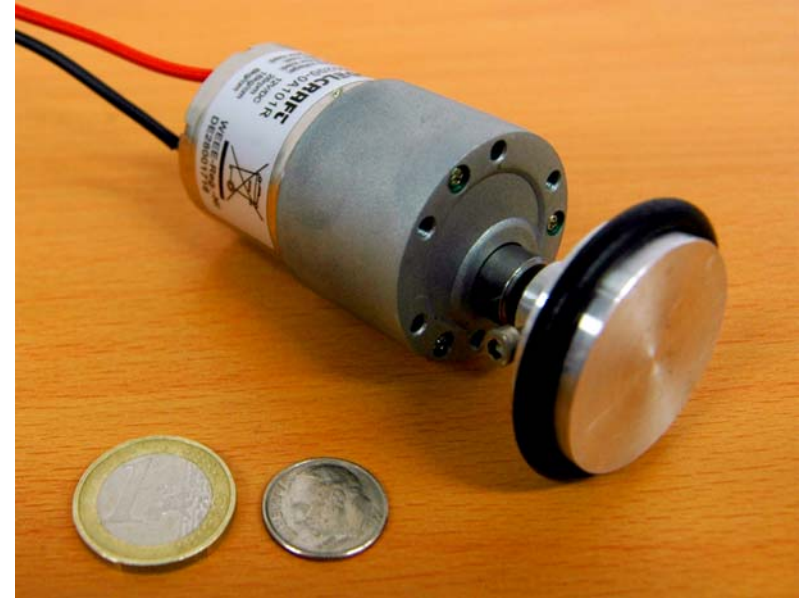


- Active tilt control to $\sim 1 \mu\text{rad}$
- Centering of mass to $\sim 1 \text{ mm}$
- Active vibration isolation
- Precise rotation rate control
- Minimization of RF-Interference





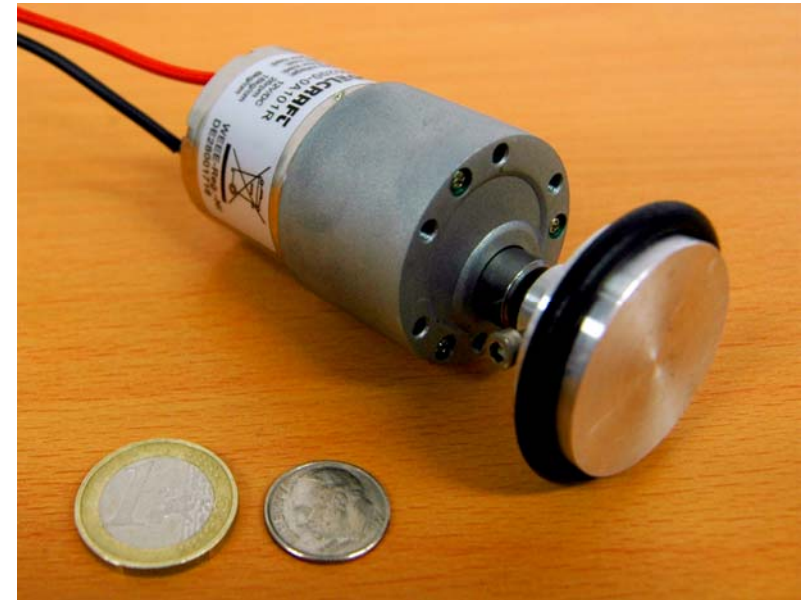
Drehtisch
→ 30.000 €



Motor
→ 8 €



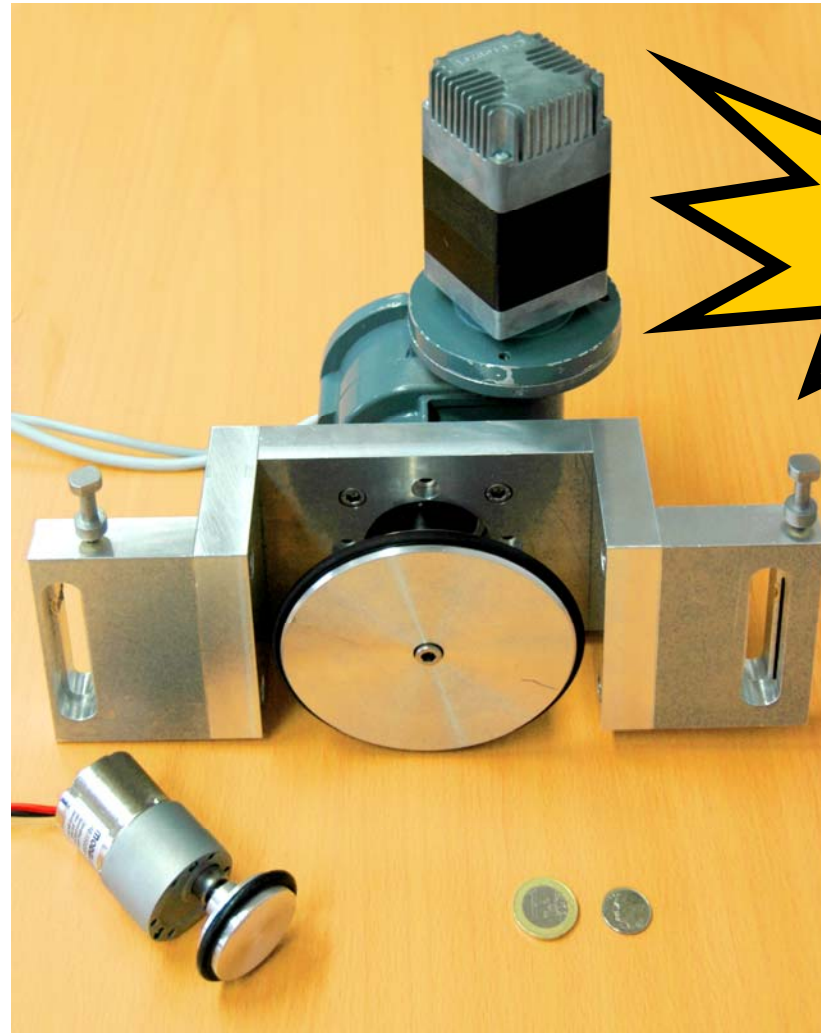
**Problem:
Geringe Lebensdauer ...**



**Motor
→ 8 €**



**Problem:
Geringe Lebensdauer ...**



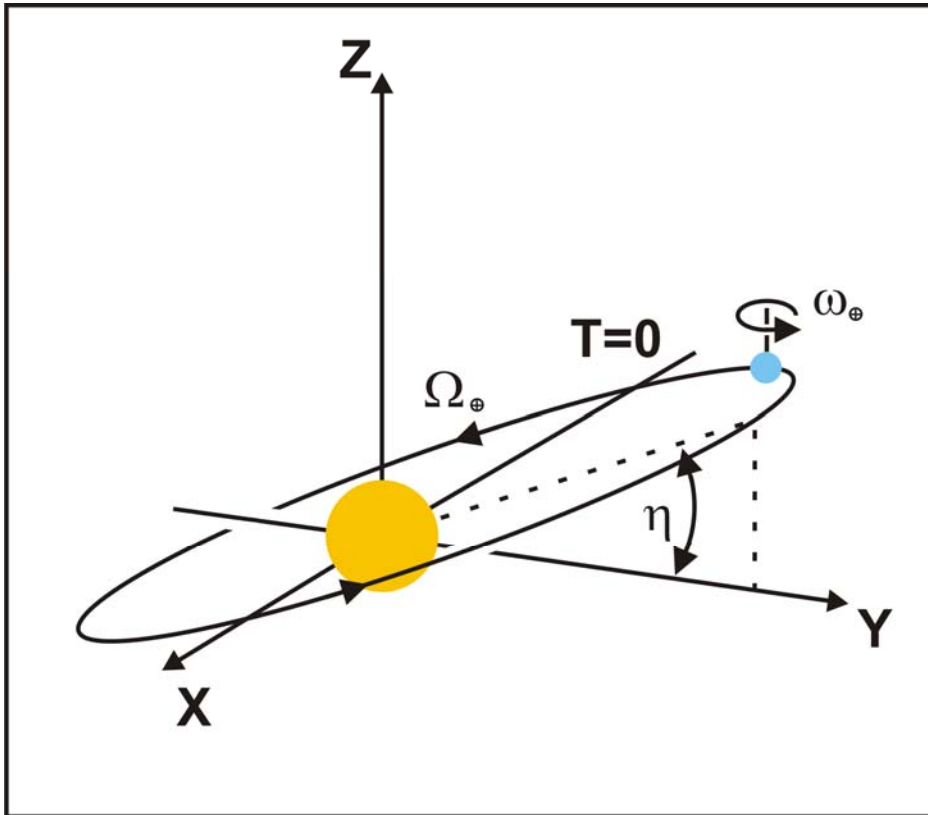
Einbau eines “richtigen” Motors ...



Na gut, dann geht man halt einkaufen ...



Datenanalyse und Ergebnisse



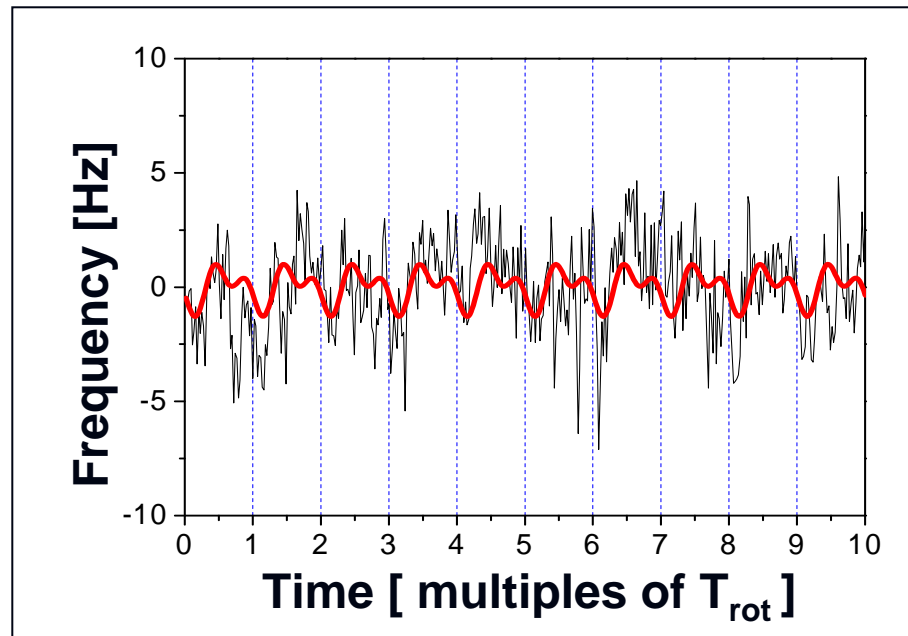
Drei Modulationen:

- **Modulation durch Drehtisch**
- **Modulation durch Erddrehung**
- **Modulation durch Erdbahn**



Datenanalyse

1. Bestimme Modulationsamplituden, korreliert mit Drehtischrotation, von kleinen Datensätzen (10 Umdrehungen)

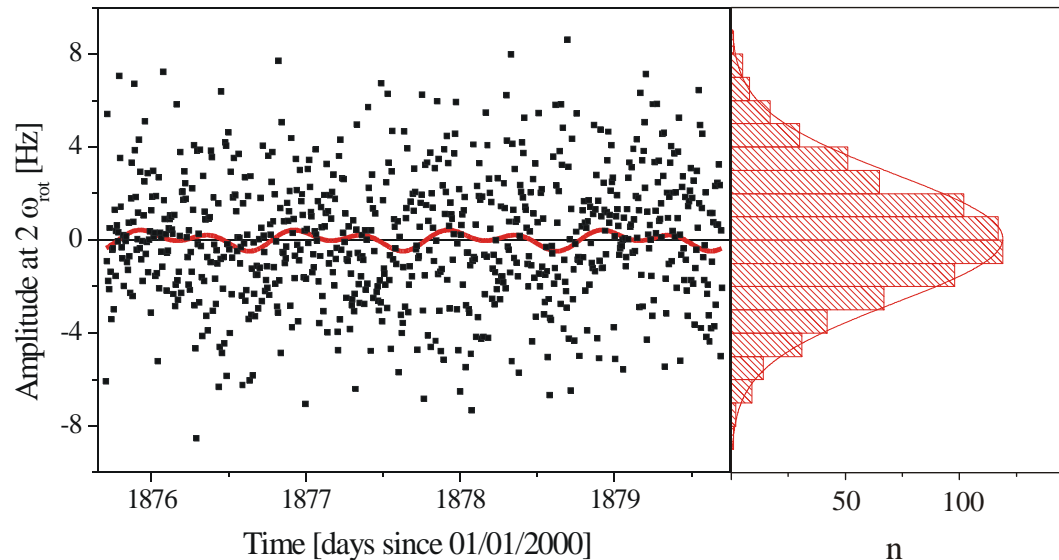


$$\Delta\nu/\nu = 2B \sin(2\omega_{rot}t) + 2C \cos(2\omega_{rot}t) + \text{Syst.} + \text{Drift}$$



Datenanalyse

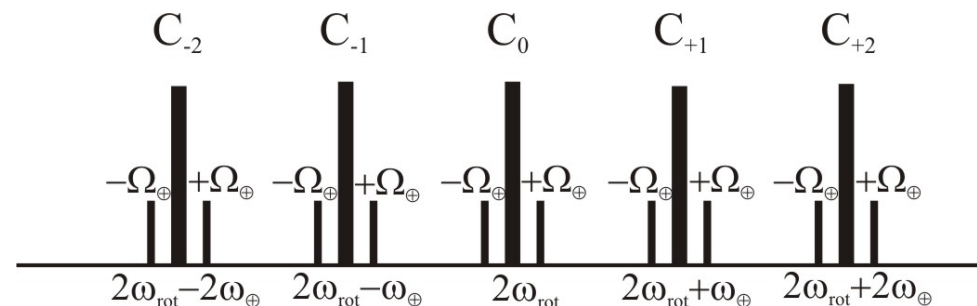
1. Bestimme Modulationsamplituden, korreliert mit Drehtischrotation, von kleinen Datensätzen (10 Umdrehungen)
2. Bestimme Tagesmodulationsamplituden (Herausmittlung systematischer Effekte, die mit Drehtischrotation korreliert sind)





Datenanalyse

1. Bestimme Modulationsamplituden, korreliert mit Drehtischrotation, von kleinen Datensätzen (10 Umdrehungen)
2. Bestimme Tagesmodulationsamplituden (Herausmittlung systematischer Effekte, die mit Drehtischrotation korreliert sind)
3. Bestimme Jahresmodulationsamplituden (Herausmittlung systematischer Effekte, die mit Tag/Nacht Rhythmus korreliert sind)





- 2x15 Amplituden
- Teilweise abhängig voneinander
- Bestimmung von SME-Parametern

SME Lorentz-Invariance violation parameters ($\times 10^{-17}$)

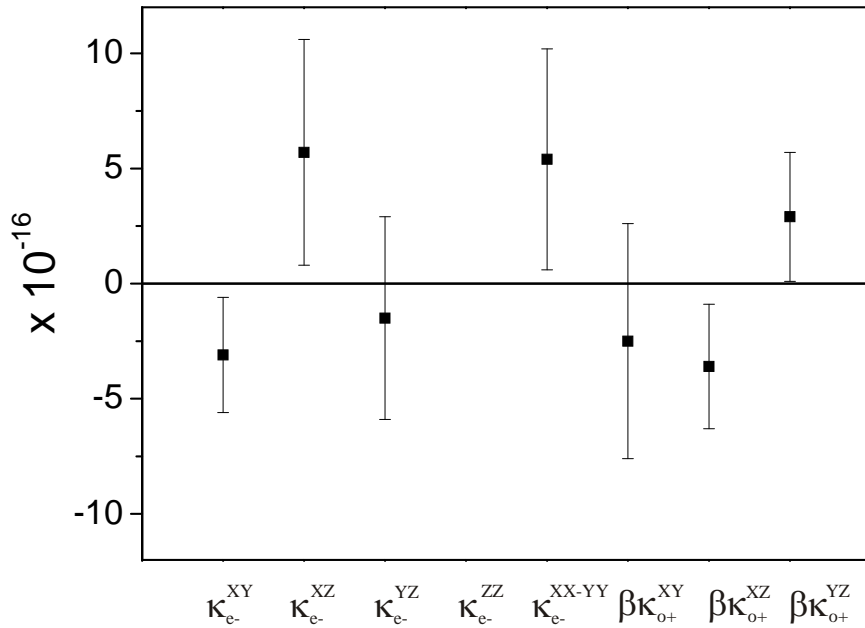
κ_{e-}^{XY}	κ_{e-}^{XZ}	κ_{e-}^{YZ}	$\kappa_{e-}^{XX} - \kappa_{e-}^{YY}$	κ_{e-}^{ZZ}
-0.31 ± 0.73	0.54 ± 0.70	-0.97 ± 0.74	0.80 ± 1.27	-0.04 ± 1.73
$\beta\kappa_{o+}^{XY}$	$\beta\kappa_{o+}^{XZ}$	$\beta\kappa_{o+}^{YZ}$		
-0.14 ± 0.78	0.45 ± 0.62	0.34 ± 0.61		

- Anschaulich: Bestimmung eines Limits der relativen Anisotropie der Vakuumlichtgeschwindigkeit

$$\delta v = (0.002 \pm 0.003) \text{ Hz}$$

$$\delta c/c = (6.2 \pm 12.3) \cdot 10^{-18}$$

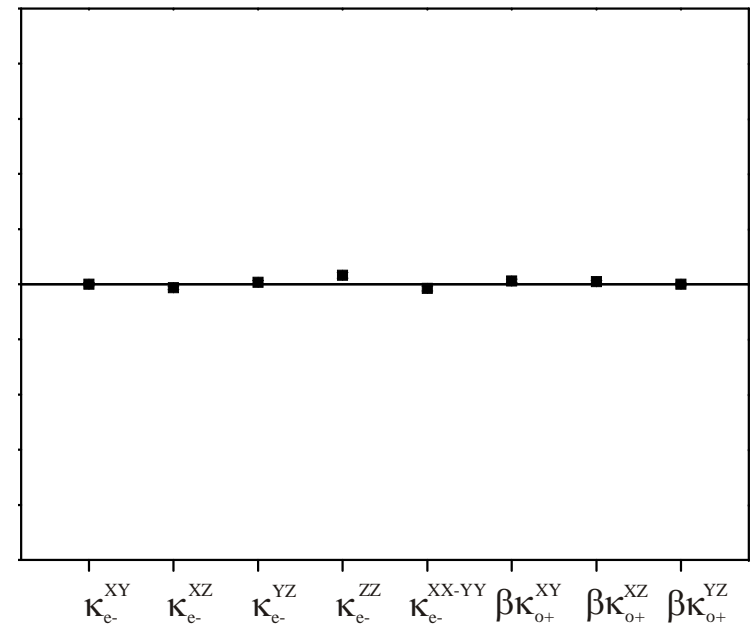
(Fused Silica – Fused Silica)



Vorheriges Experiment

$$\delta\nu = (0.070 \pm 0.076) \text{ Hz}$$
$$\delta c/c = (2.5 \pm 2.7) \cdot 10^{-16}$$

Herrmann, Senger et al,
Phys. Rev. Lett. **95**, 150401, (2005)



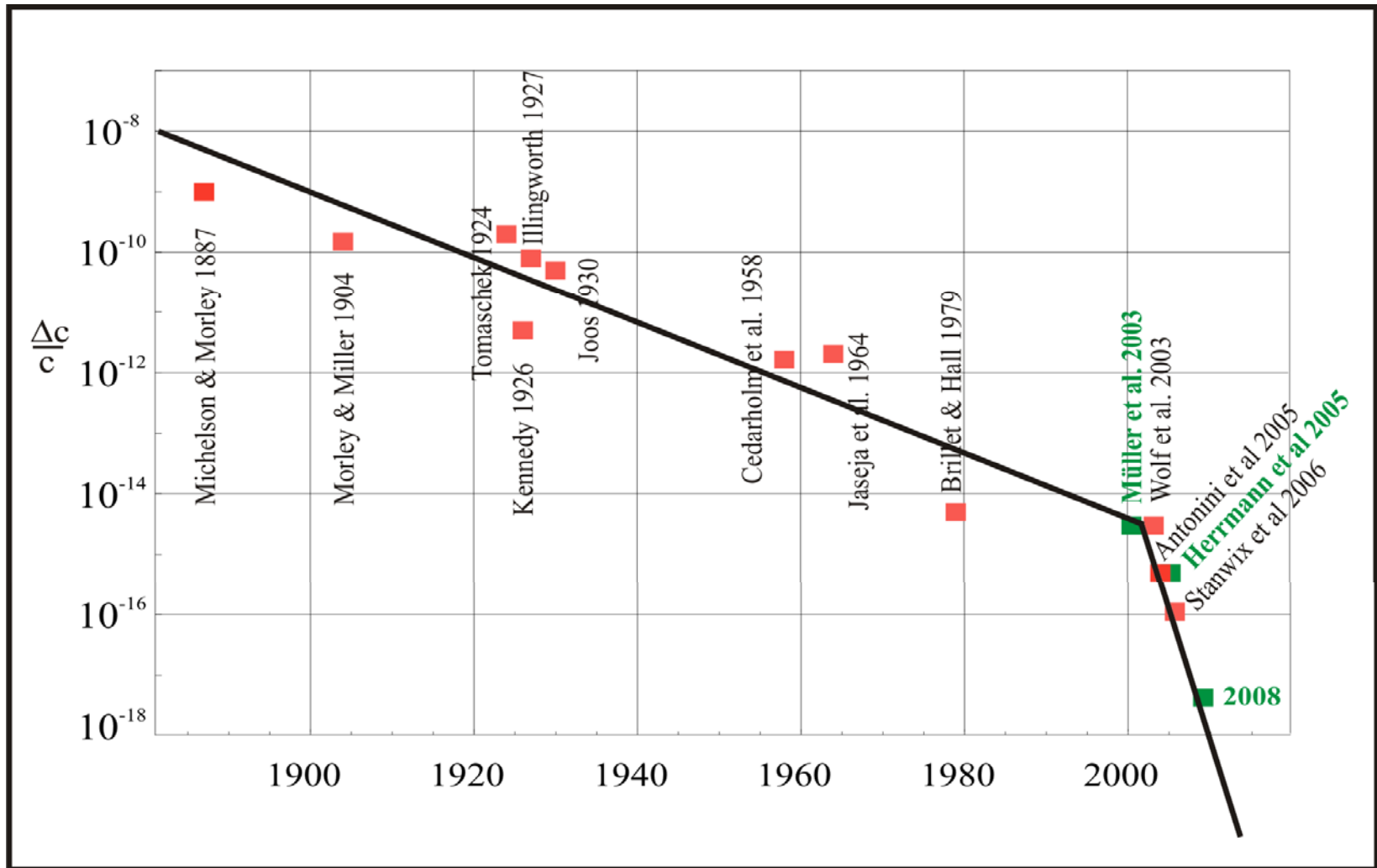
Momentanes Experiment

$$\delta\nu = (0.002 \pm 0.003) \text{ Hz}$$
$$\delta c/c = (6.2 \pm 12.3) \cdot 10^{-18}$$

Herrmann, Senger et. al,
Phys. Rev. **D80**, 105011 (2009)



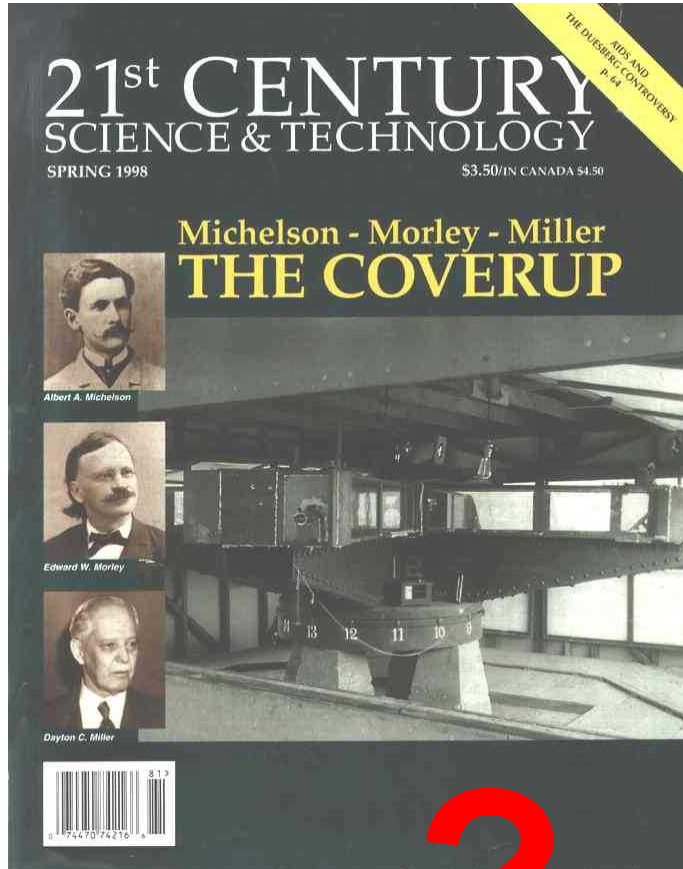
Ergebnisse



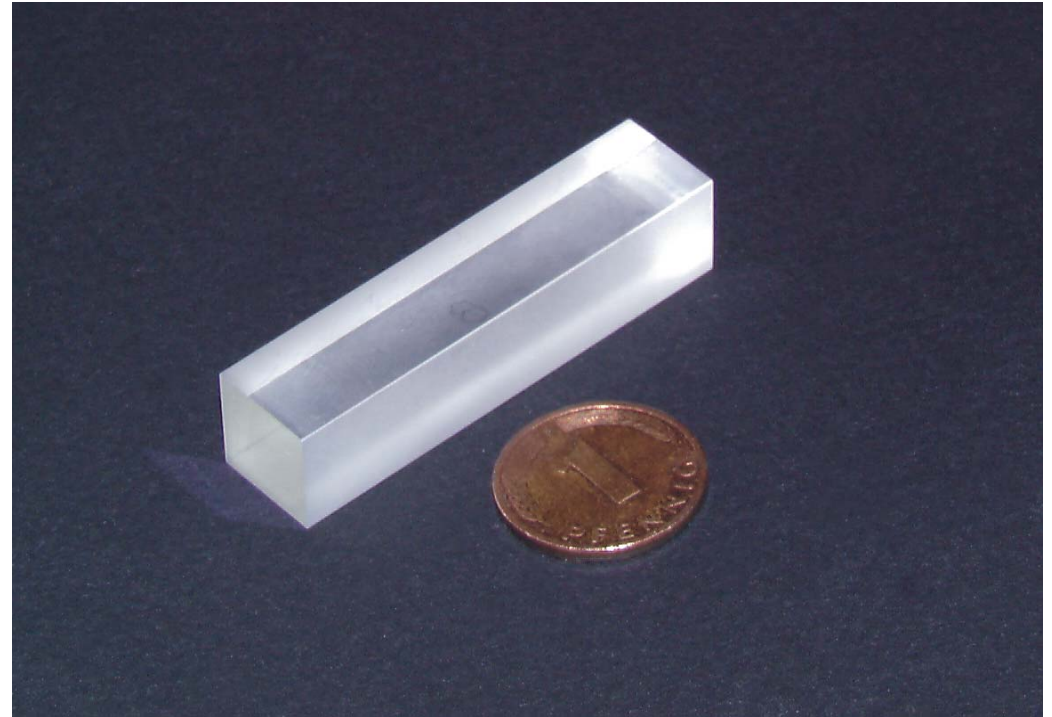
Mehr als eine Größenordnung Verbesserung



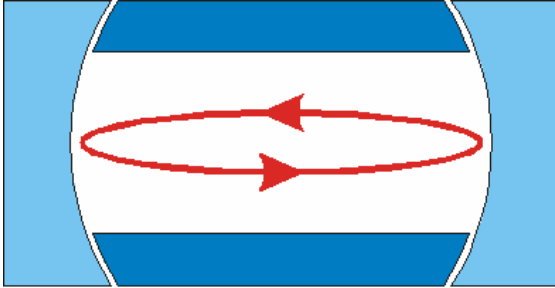
Verschwörung? Michelson-Morley und Materie



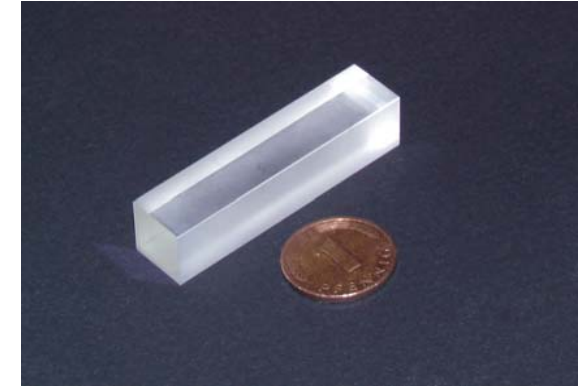
Lichtausbreitung in Materie ...



Monolithischer Sapphire Resonator



$$\nu \propto \frac{c}{2Ln}$$



$$\delta\nu = \delta c - \delta L - \delta n$$



Maxwellsche und Diracsche Bewegungsgleichungen



Mehr Koeffizienten der SME: $(k_F)_{\kappa\lambda\mu\nu}$, $c_{\mu\nu}$



Lösung: Verwendung verschiedenartiger Resonatoren

H.Müller *et al.*, *Phys.Rev.* **D68**, 116006, (2003)

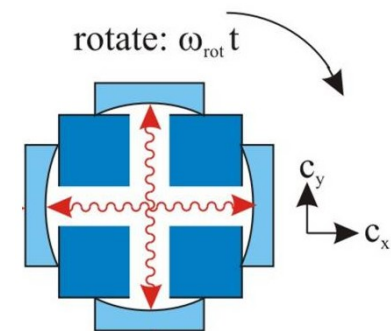
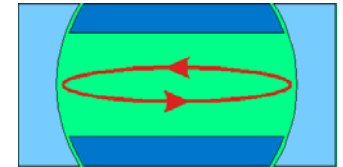
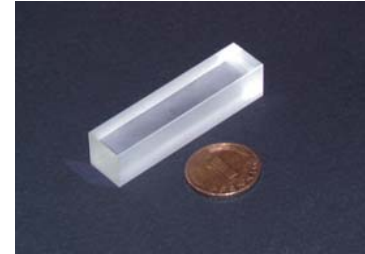
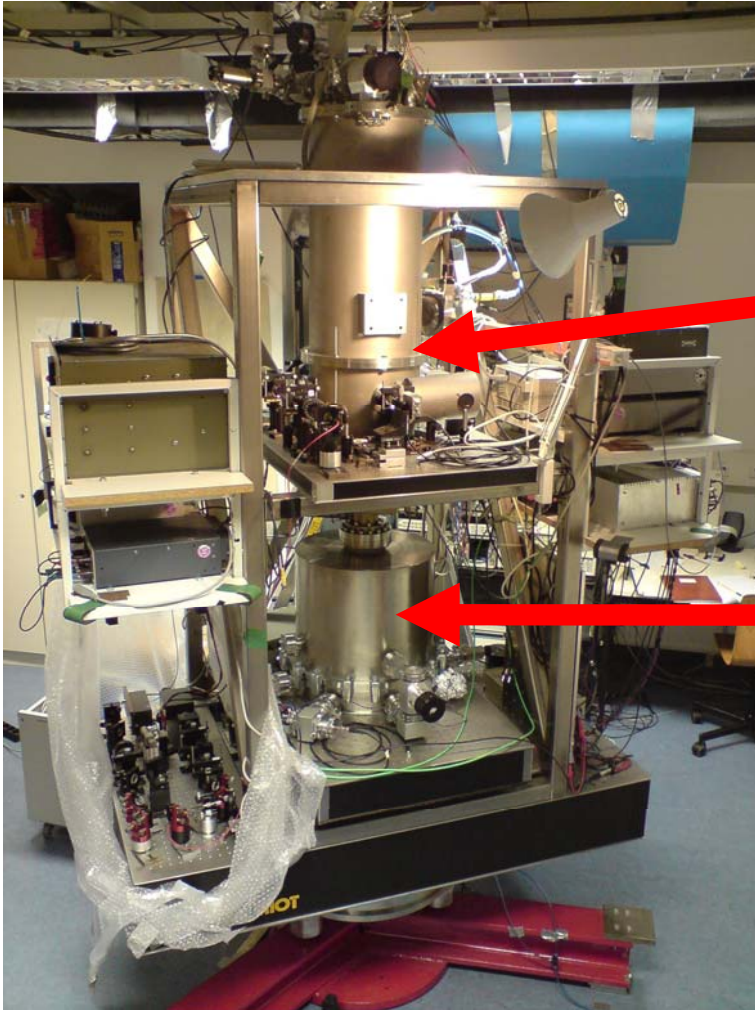
H.Müller, *Phys.Rev.* **D71**, 045004, (2005)

H.Müller *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 050401, (2007)



Ein modernes Michelson-Morley Experiment

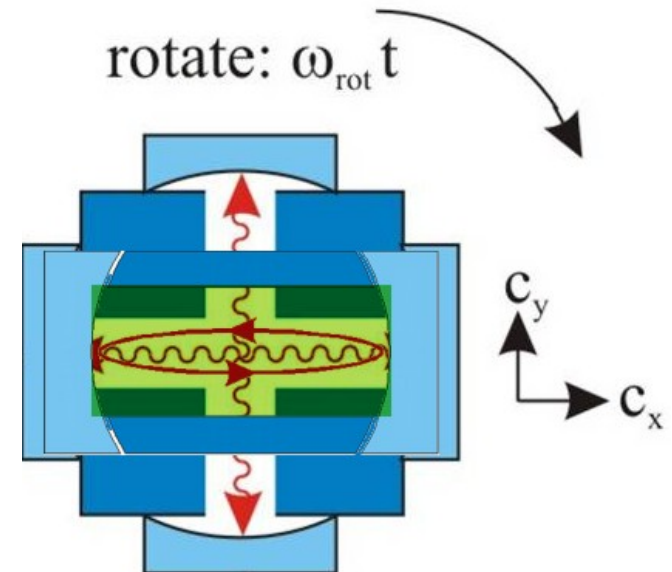
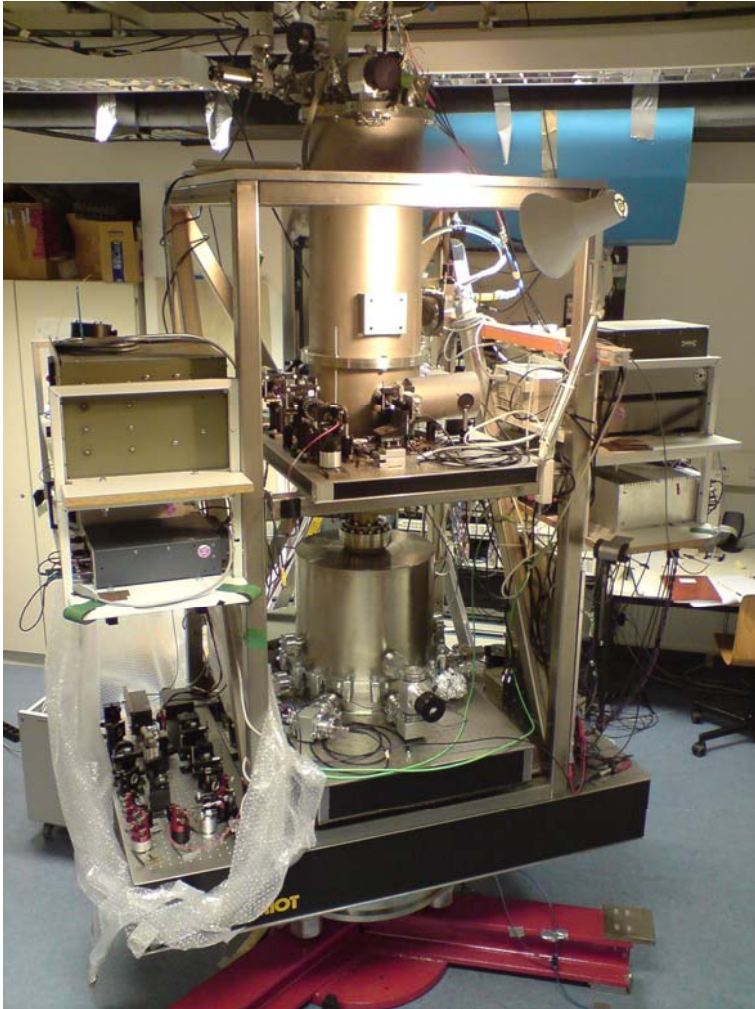
Multi-Resonator Experiment (Berlin)

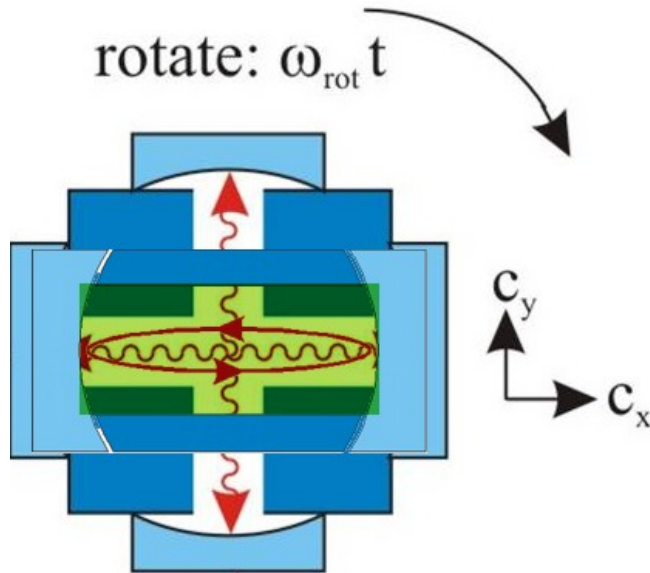




Ein modernes Michelson-Morley Experiment

Multi-Resonator Experiment (Berlin)

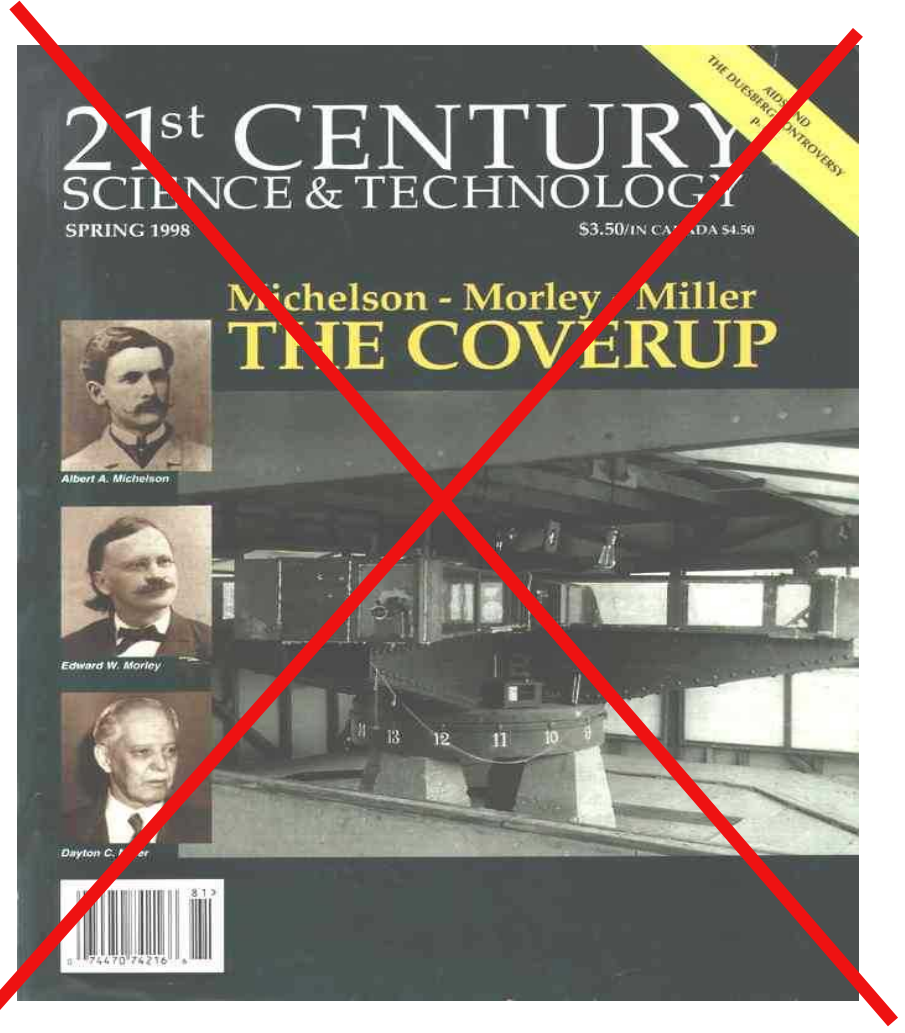




Preliminary:

$$\delta\nu = (1.07 \pm 0.68) \text{ Hz}$$

$$\delta c/c = (3.8 \pm 2.4) \cdot 10^{-15}$$





Zusammenfassung und Ausblick

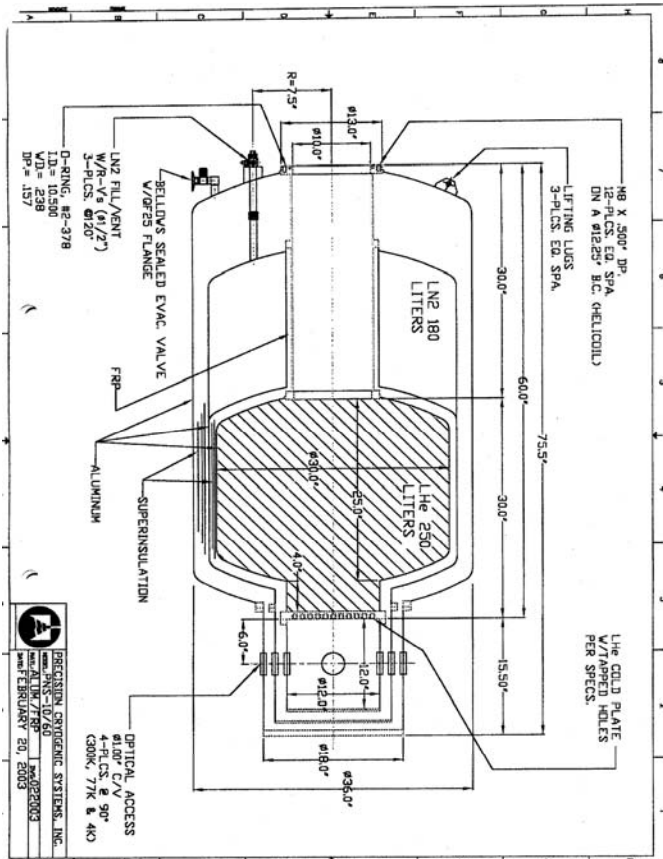
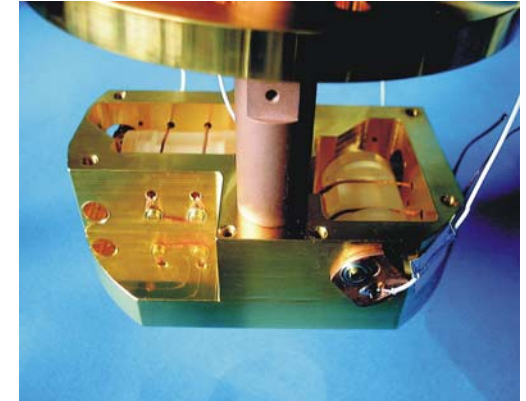


Keine signifikante Verletzung der Lorentzinvarianz gemessen! (Lichtausbreitung in fester Materie nicht besonders!)

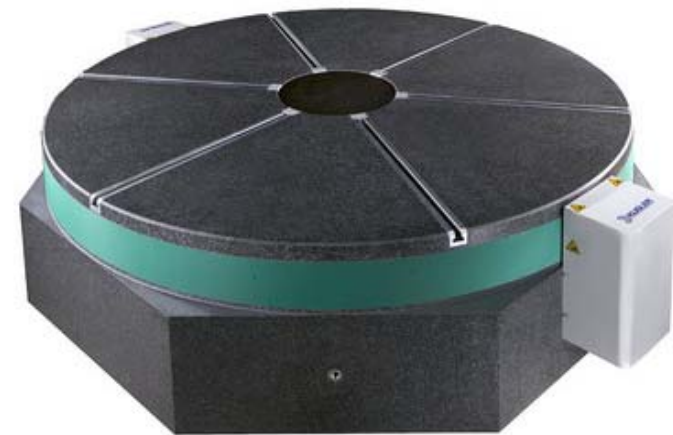


Keinen Grund zur Sorge, noch...

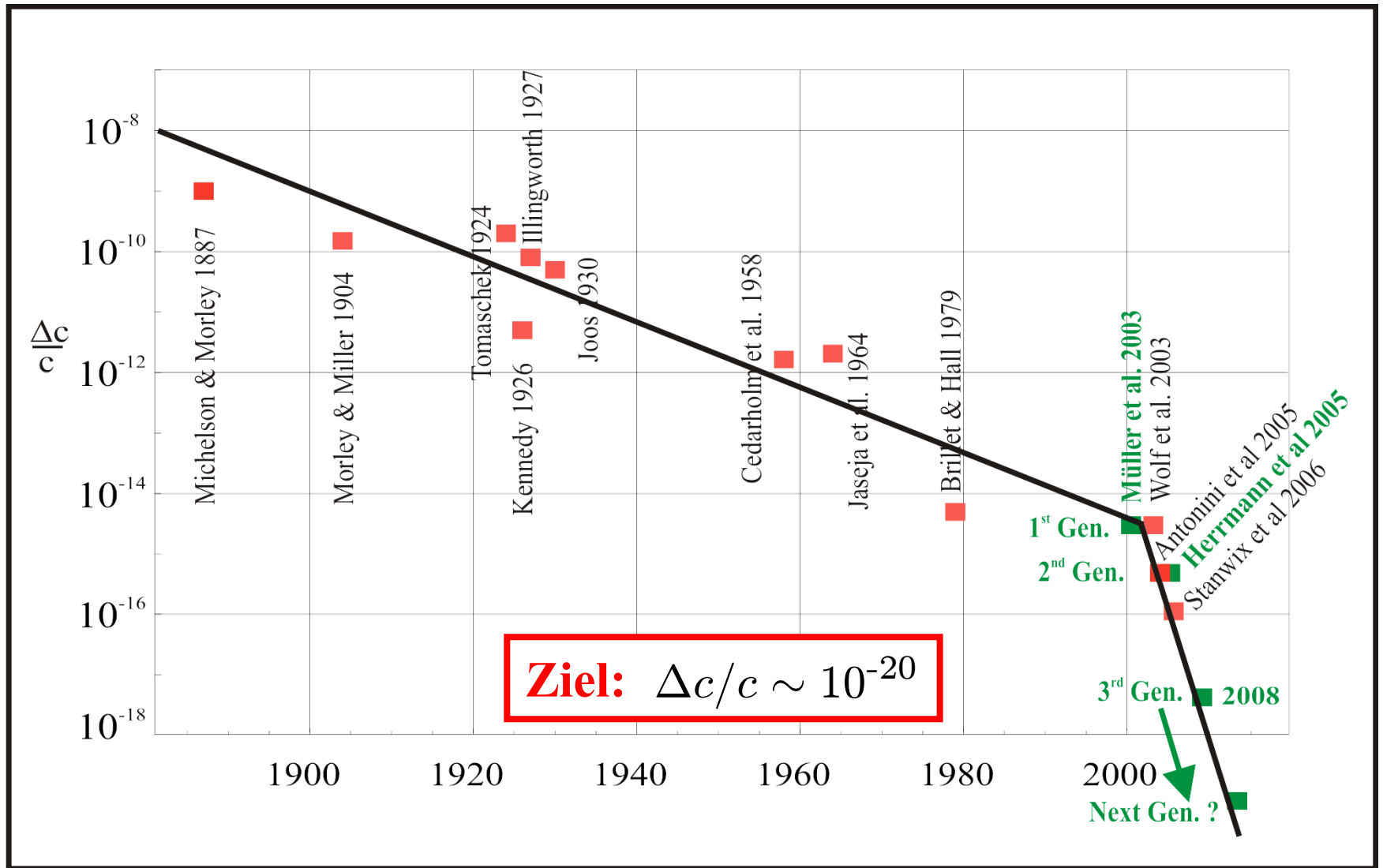
Back to the future... Kryogene Resonatoren

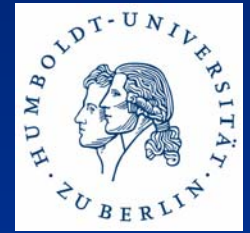


Großvolumiger Kryostat



Großer Drehtisch
(Kugler GmbH)





Mehr Infos unter <http://www.physik.hu-berlin.de/qom>