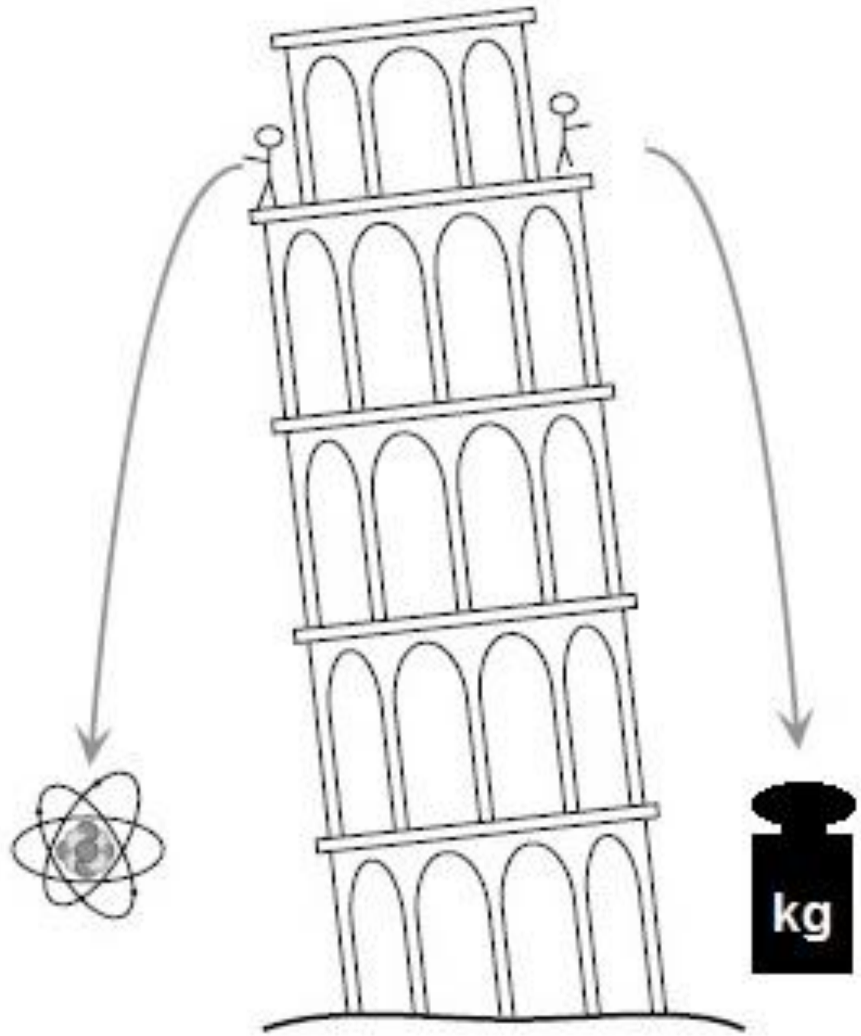
Atominterferometrie

Kai Lampmann

Berlin, den 23. Mai 2011

Motivation

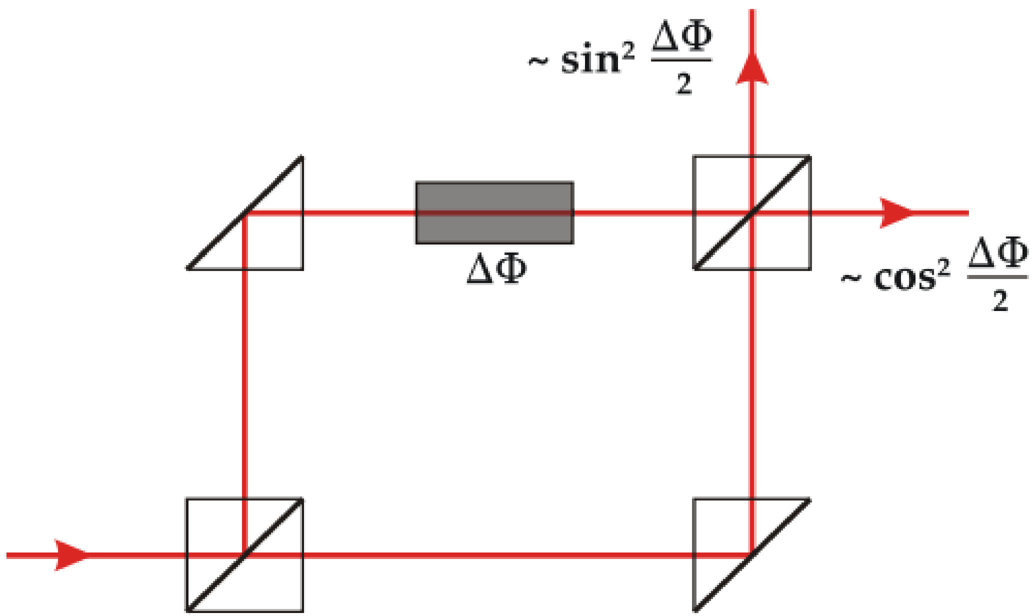


Gliederung

1. Einleitung
2. Atominterferometer
3. Test des Äquivalenzprinzips
4. Fazit

Lichtinterferometrie

Mach-Zehnder Interferometer



Komponenten eines Interferometers:

- Strahlteiler
- Reflexion
- Strahlüberlagerung

→ Phasenverschiebung zwischen den Armen des Interferometers

→Messung durch Interferenz

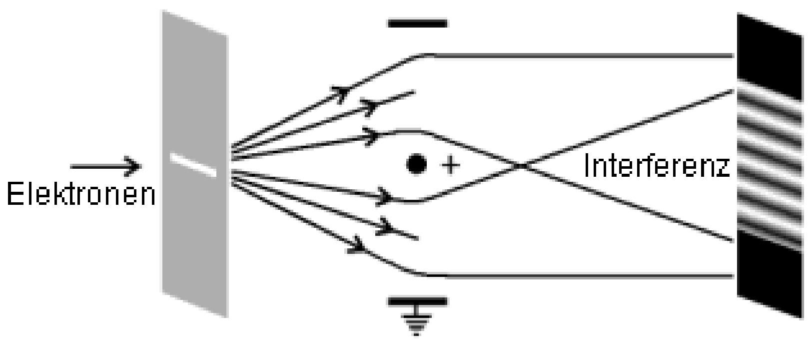
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c9/Mach-Zehnder_interferometer.svg

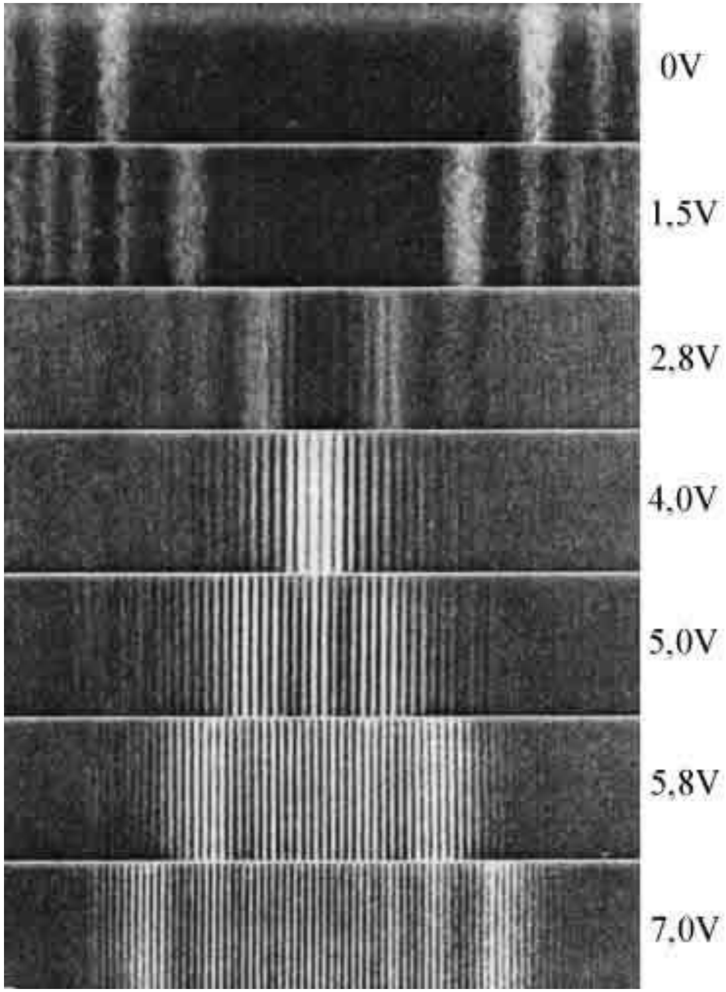
Elektronen-Interferenz

Luis de Broglie 1923: $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$

Elektronen-Interferenz

Möllenstedt und Dürker, 1954:



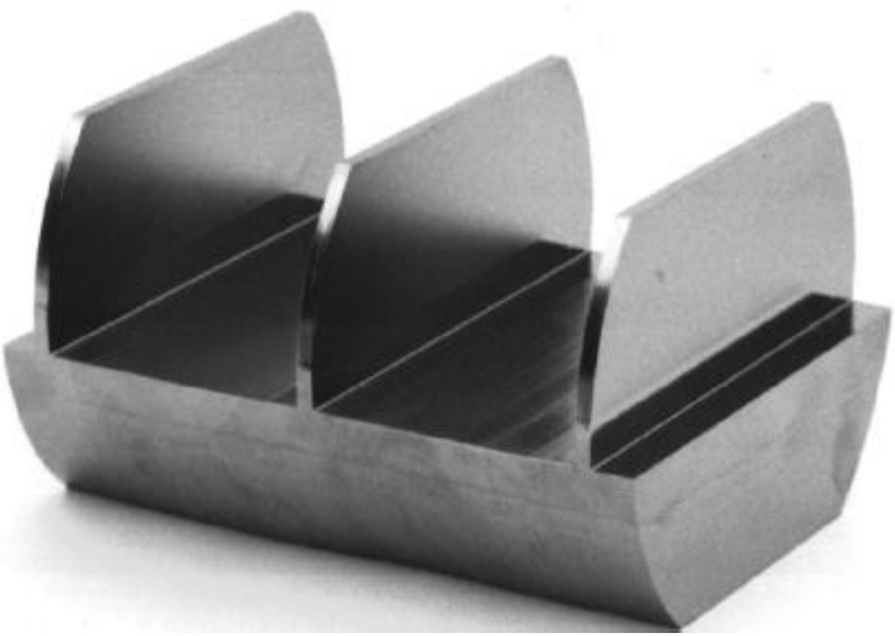


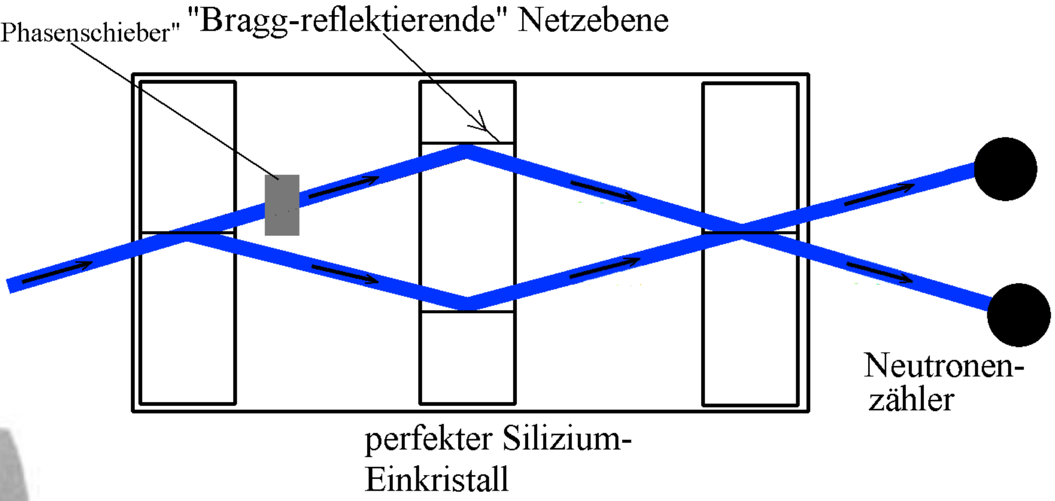
http://leifiphysik.de/web_ph12/versuche/09moellenstedt/moellenst.htm

Neutronen-Interferometrie

Rauch, 1974

Silizium-Perfektkristall-Neutronen-Interferometer





Mach-Zehnder-Interferometer

Strahlteilung und Reflexion durch Ausnutzung der Bragg-Reflexion an den Netzebenen im Kristall

http://www.forphys.de/Website/qm/exp/v37.html (bearbeitet)
K. Littrell et al. Phys. Rev. A 56, 1767 (1997)

Materie-Interferometrie

Schwierigkeiten bei Interferometern mit Materiewellen:

- Andere Propagationseigenschaften von Materiewellen verglichen mit Lichtwellen
  - → Andere Verfahren zur Manipulationen nötig
- Sehr genaue Kontrolle der experimentellen Bedingungen nötig

Vorteile von Materieinterferometern:

- Neue Messgrößen zugänglich / genauer messbar
  - Messung von Beschleunigungen
  - Messung von Rotationen
  - Messung von allg. relativistischen Effekten

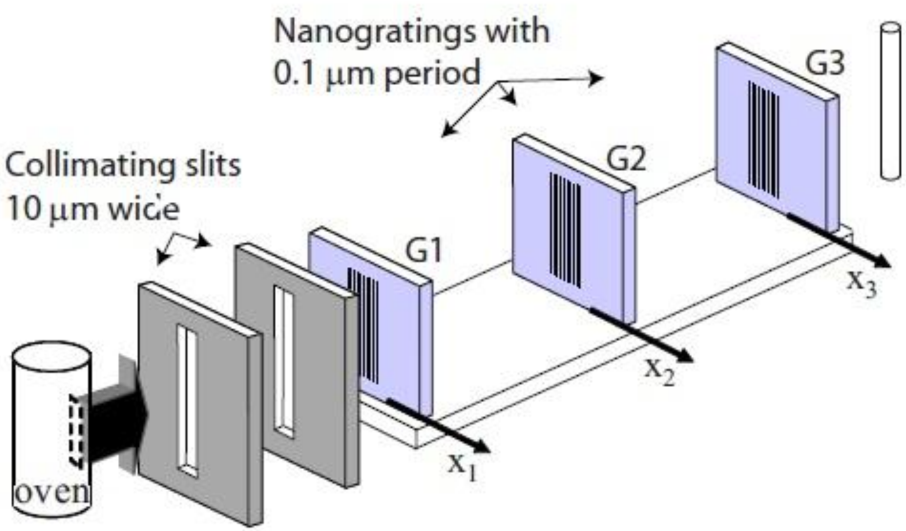
Gliederung

1. Einleitung
2. Atominterferometer
3. Test des Äquivalenzprinzips
4. Fazit

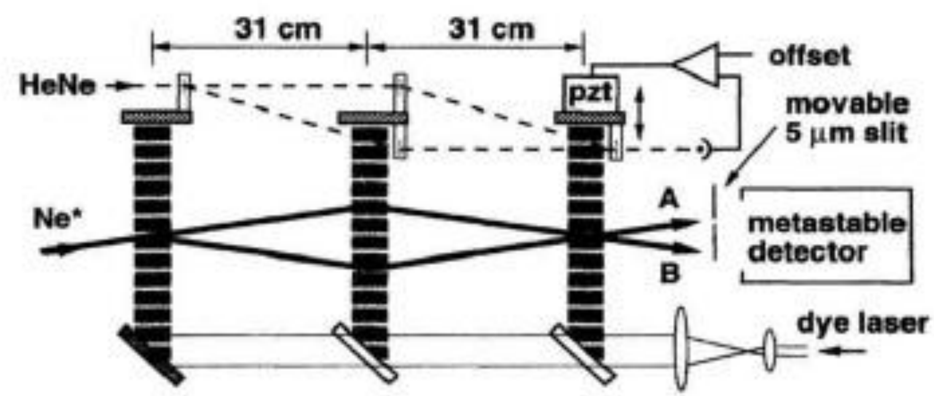
Atominterferometer

Atominterferometer mit Gittern

- Transmissionsgitter mit Perioden ≈ 100 nm
- Herstellung mittels Nanolithographie



Atominterferometer mit Lichtwellen



- Realisierung des Gitters durch stehende Lichtwellen
- Brechung der Materiewellen nach der Bragg-Beziegung:

$$n \times \lambda = 2 \times d \times \sin(\theta)$$

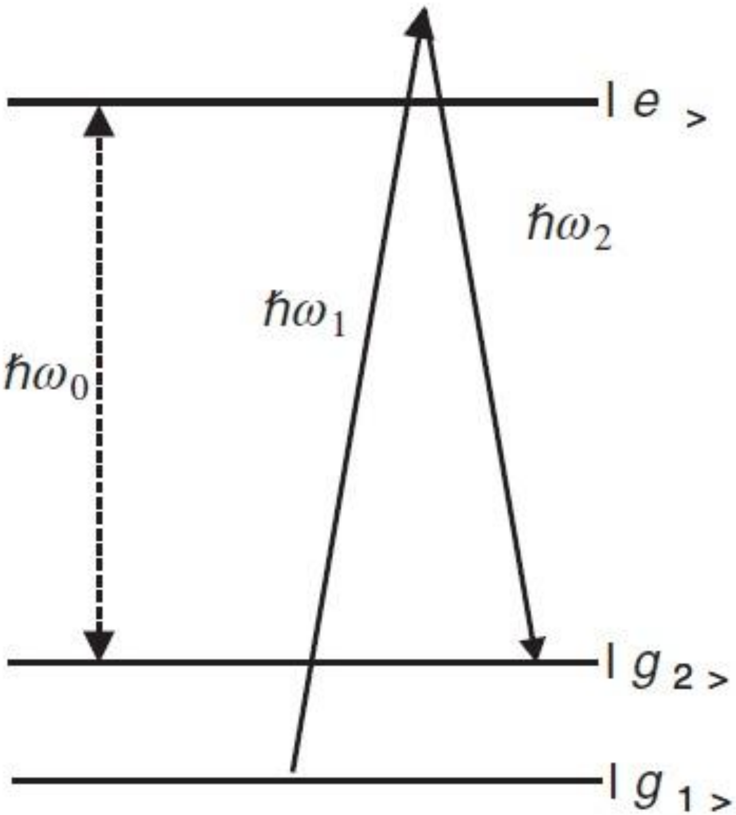
Links: Keith et al., 1991 ; rechts: Giltner et al, 1995

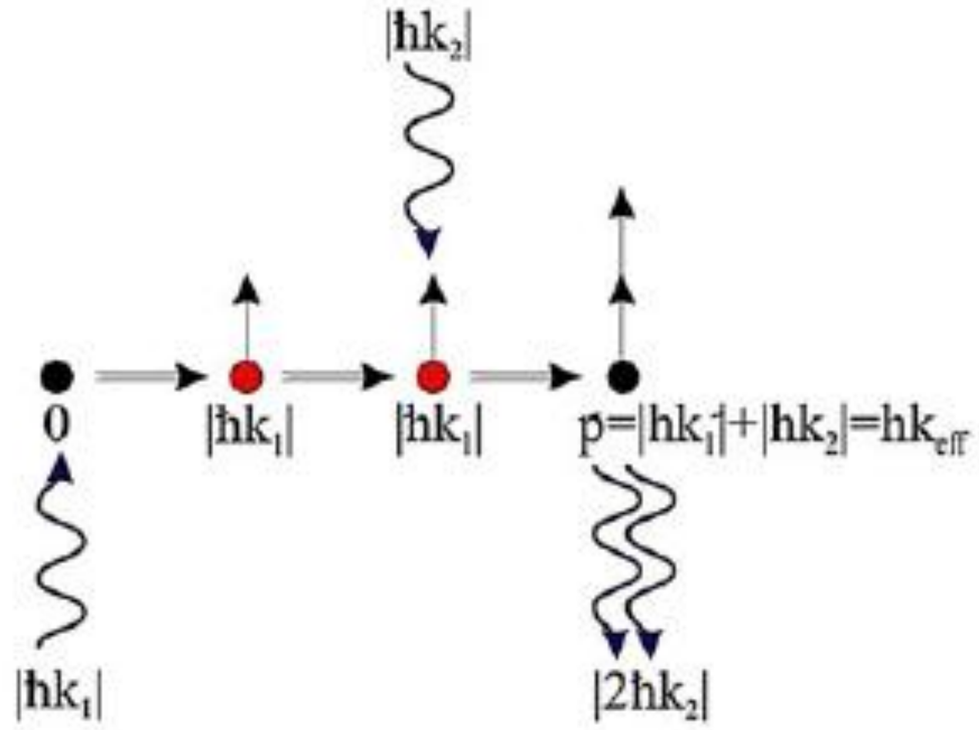
Atominterferometer mit Lichtpulse

Stimulierte Raman-Übergänge

Es gilt: $k_{1,2} = \frac{\omega_{1,2}}{c}$

und $|k_{eff}| = |k_1| + |k_2|$

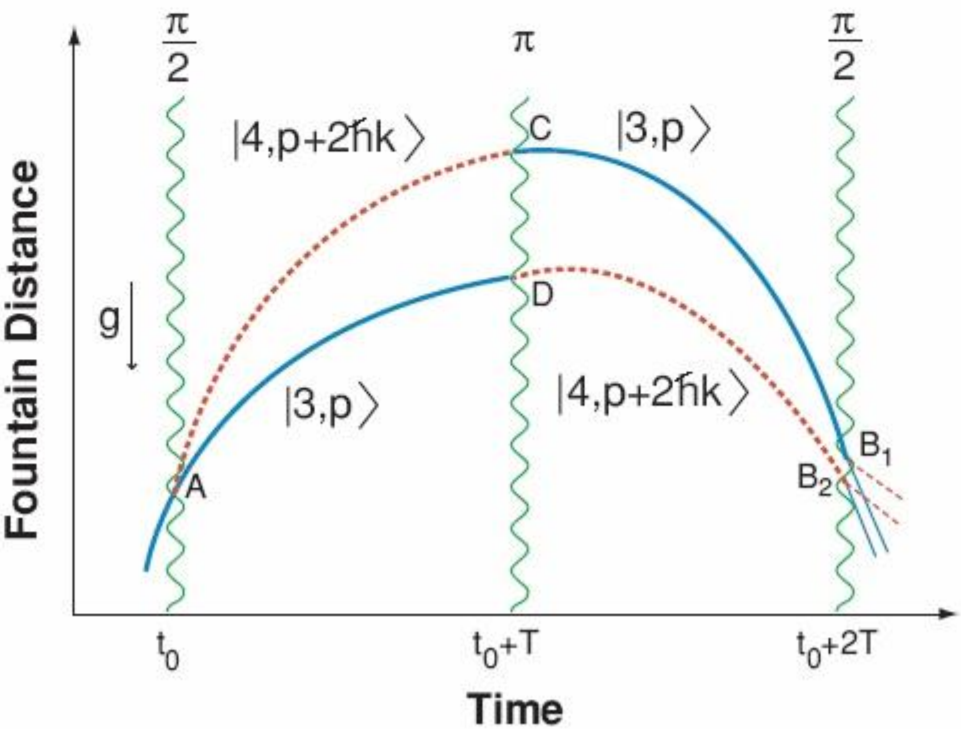


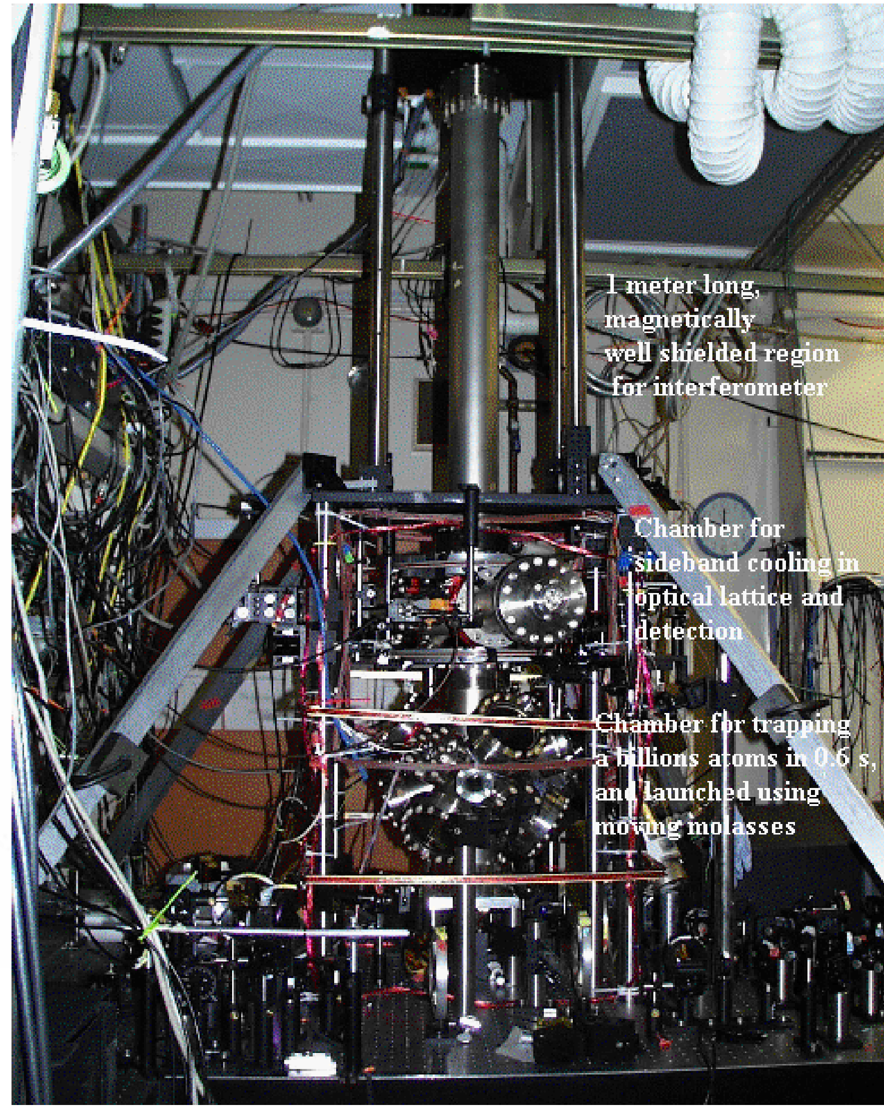


M de Angelis, A Bertoldi, L Cacciapuoti, A Giorgini, G Lamporesi, Mprevedelli, G Saccorotti, F Sorrentino und G M Tino Meas.Sci. Technol. 20 (2009) 022001

Atomfontäne

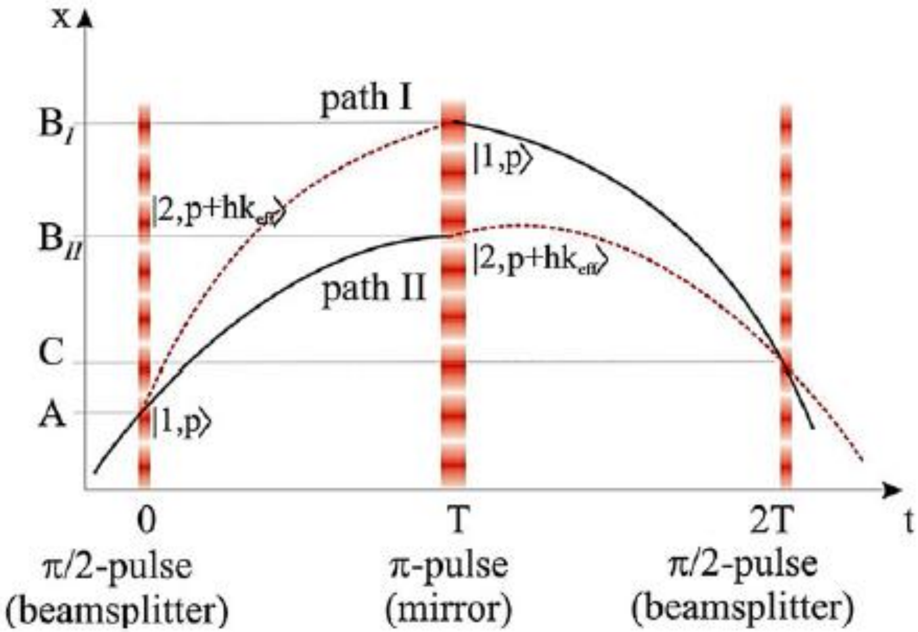
Realisierung des Interferometers:





Aus Talk von M. Kasevich, Stanford University
http://www.stanford.edu/group/chugroup/amo/interferometry.html

Einfluss der Gravitation auf den Phasenunterschied



Berechnung der Phasendifferenz

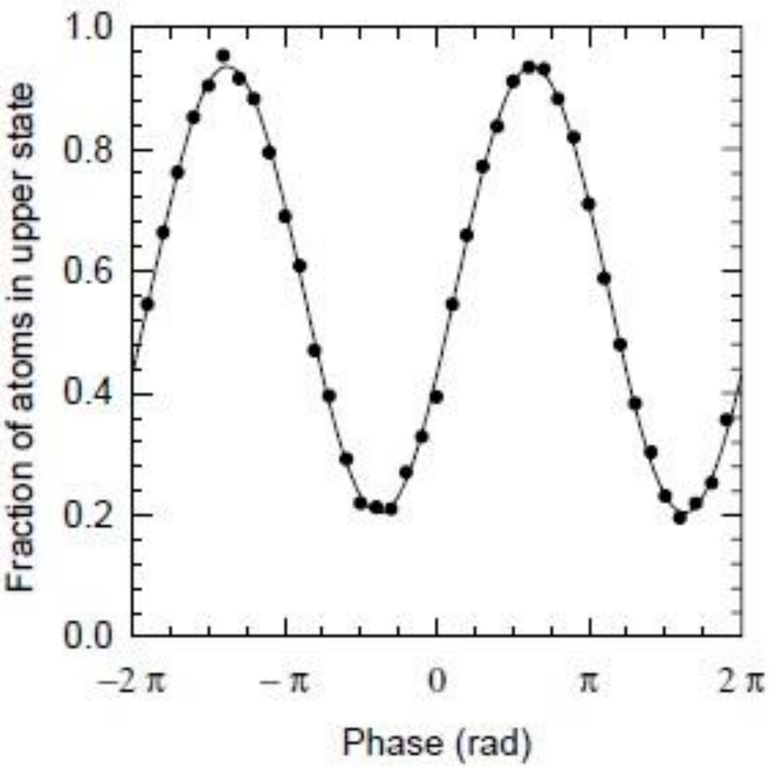
$$
\begin{aligned}
\Phi(x^A, 0) &= 0 \\
\Phi(x^B_{II}, T) &= k_{eff}\left[-\frac{1}{2}gT^2 + v_0 T\right] \\
\Phi(x^B_I, T) &= k_{eff}\left[-\frac{1}{2}gT^2 + \left(v_0 + \frac{\hbar k_{eff}}{m}\right)T\right] \\
\Phi(x^C, 2T) &= k_{eff}\left[-2gT^2 + \left(2v_0 + \frac{\hbar k_{eff}}{m}\right)T\right]
\end{aligned}
$$

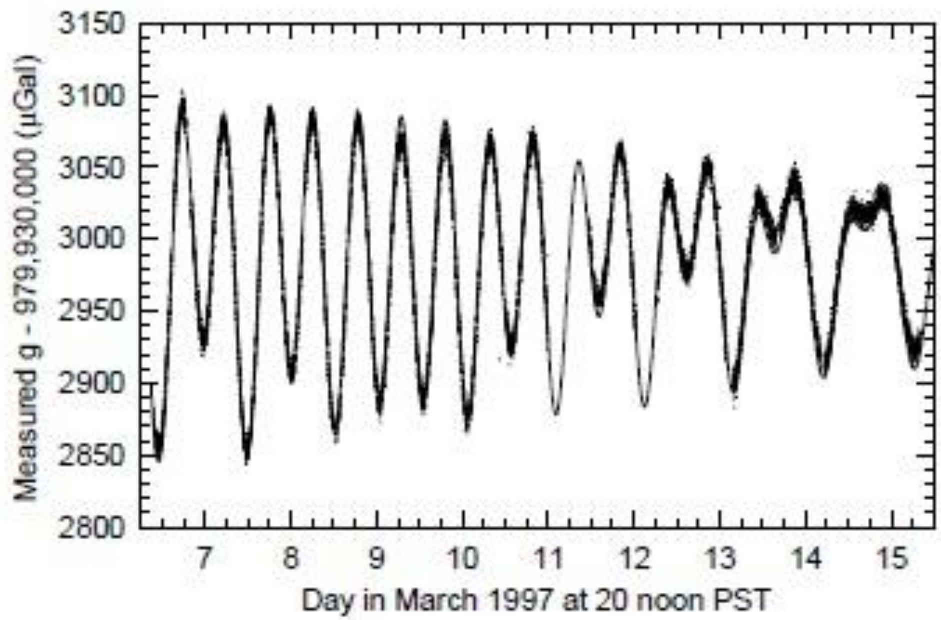
Phasenunterschied:

$$\Delta\Phi_g = -k_{eff}gT^2$$

M de Angelis, A Bertoldi, L Cacciapuoti, A Giorgini, G Lamporesi, Mprevedelli, G Saccorotti, F Sorrentino und G M Tino Meas.Sci. Technol. 20 (2009) 022001

Messergebnis

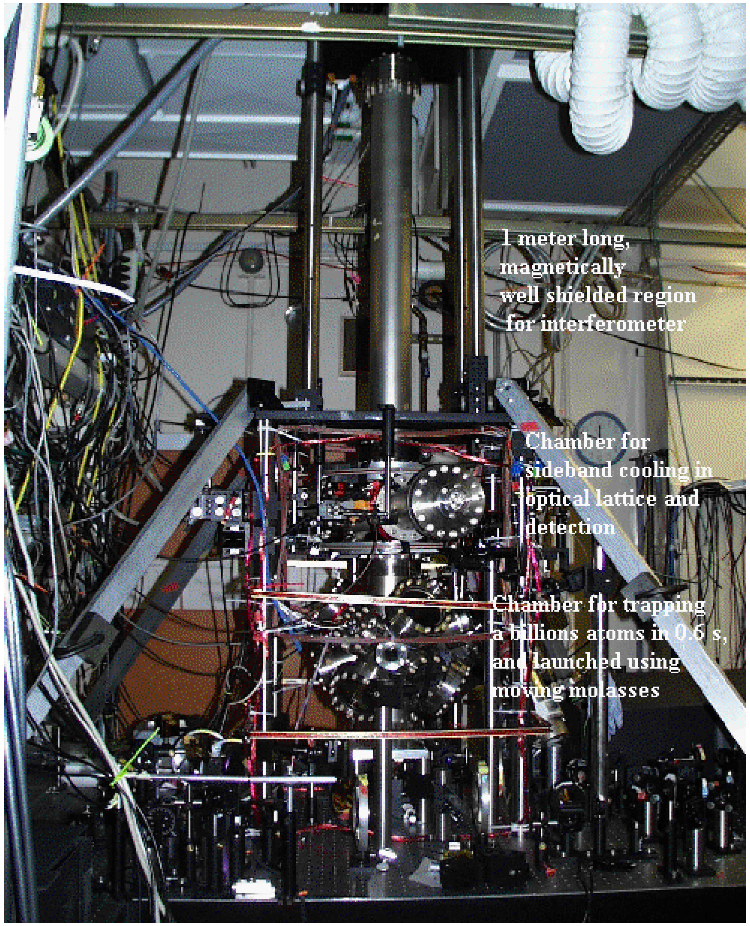




g = 979 933 160 ± 4 Gal mit 1 Gal = 0,01 m/s²

Peters, A; PhD Thesis, Stanford University 1998

Vergleich mit Standard



vs.

Gravimeter FG5

Beschleunigung zusammen messen:

$\delta g \approx 7 \times 10^{-9}$

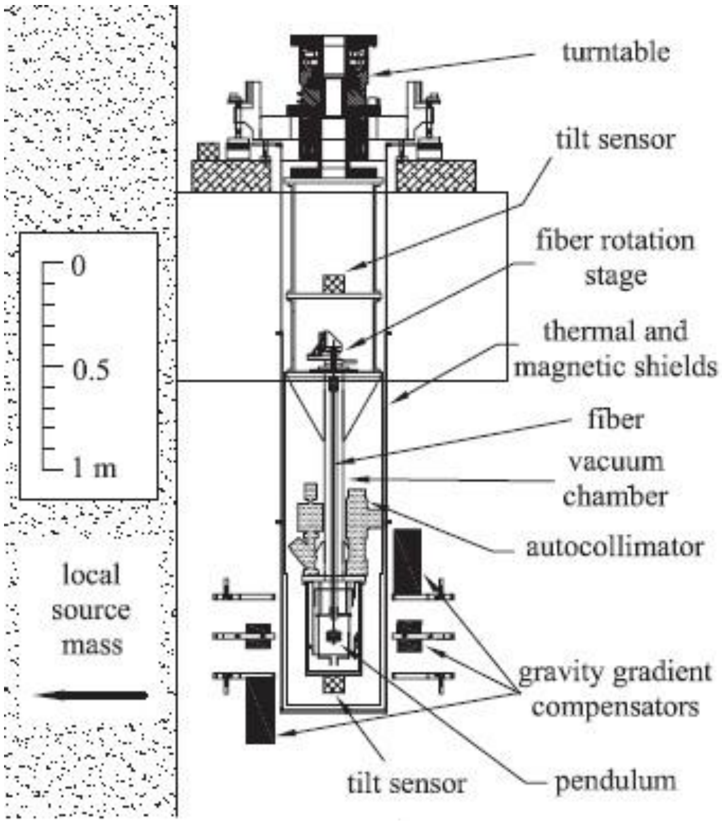
http://www.microglacoste.com/images/FG5.small.jpg

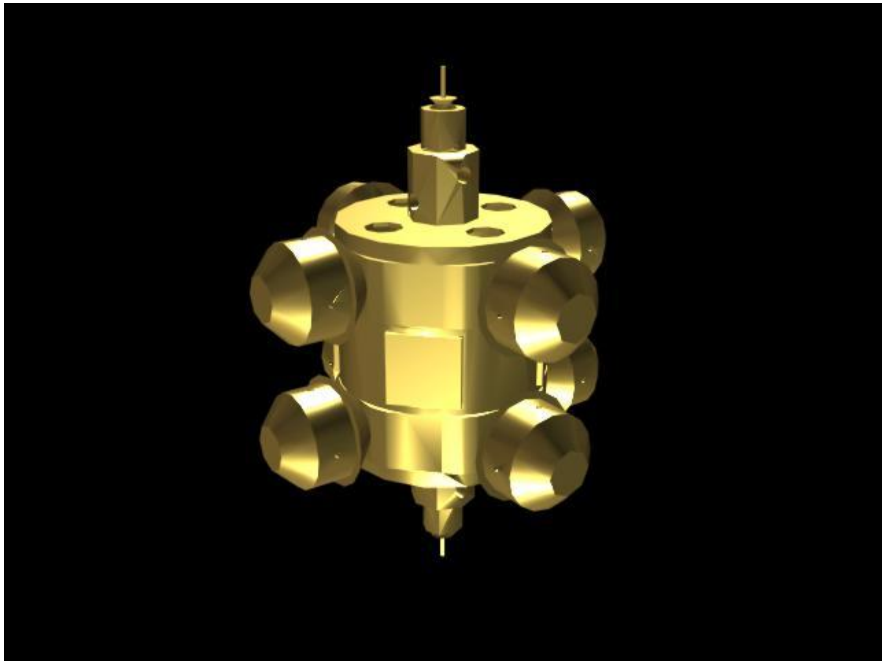
Gliederung

1. Einleitung
2. Atominterferometer
3. Test des Äquivalenzprinzips
4. Fazit

Äquivalenzprinzip

= Universalität des freien Falls



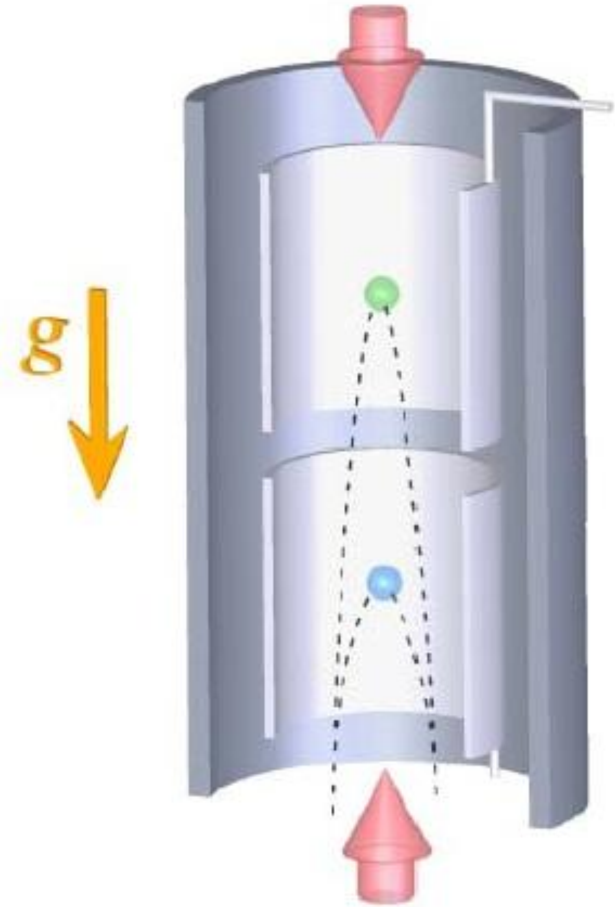


Sensitivität: $\delta g \approx 10^{-13}$

Adelberger et. al; PRL 100, 041101 (2008)
http://www.npl.washington.edu/eotwash/experiments/m6_2.html

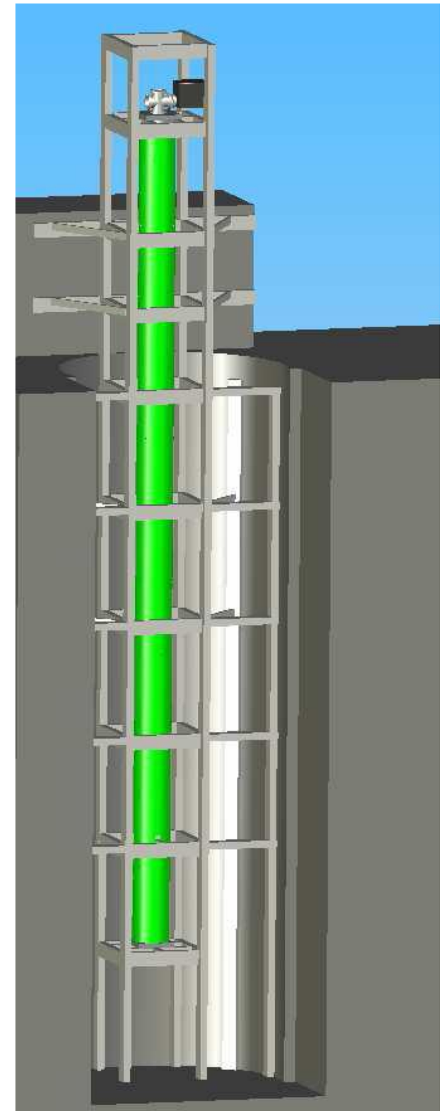
Äquivalenzprinzip auf Quantenebene

Direkter Vergleich der Beschleunigung eines ^{85}Rb und eines ^{87}Rb Ensembles



Aus Talk von M. Kasevich, Stanford University

10-Meter-Fontäne in Stanford

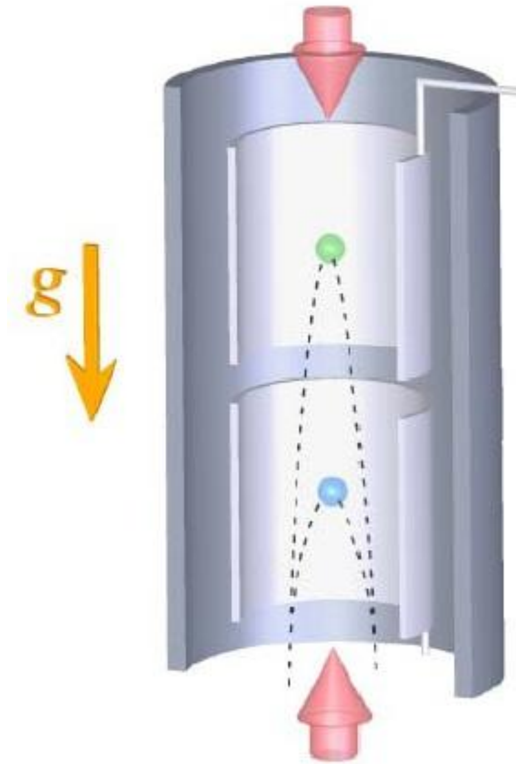


Aus Talk von M. Kasevich, Stanford University

Verbesserung der Sensitivität

$$\Delta\Phi_g = -k_{eff} g T^2$$

10m Fontäne → Faktor 100



Common-Mode-Rejection → ca. Faktor 100

Statistische Sensitivität:
$\delta g \approx 10^{-15}$ mit einem Monat Integrationszeit

Systematische Einflüsse

$-k_{eff}\, g\, T^2$	-2.84724×10^6	1.

Systematische Einflüsse

$-k_{eff}\, g\, T^2$	-2.84724×10^{8}	$1.$
$k_{eff}\, R_E\, \Omega_y{}^2\, T^2$	6.21045×10^{5}	2.18122×10^{-3}
$k_{eff}\, T_{zz}\, V_L\, T^3$	1.57836×10^{3}	5.54347×10^{-6}
$-\frac{7}{12}\, k_{eff}\, T_{zz}\, g\, T^4$	-9.20709×10^{2}	3.23369×10^{-6}
$2\, k_{eff}\, v_{x0}\, \Omega_y\, T^2$	1.97884×10^{1}	6.95002×10^{-8}
$-3\, k_{eff}\, V_L\, \Omega_y{}^2\, T^3$	-5.16411	1.81373×10^{-8}
$\frac{7}{4}\, k_{eff}\, \Omega_y{}^2\, g\, T^4$	3.0124	1.05801×10^{-8}
$\frac{7}{12}\, k_{eff}\, R_E\, T_{zz}\, \Omega_y{}^2\, T^4$	2.00827	7.05338×10^{-9}
$\frac{k_{eff}{}^2\, T_{zz}\, \hbar\, T^3}{2\, m}$	7.05401×10^{-1}	2.47749×10^{-9}
$k_{eff}\, T_{zz}\, v_{z0}\, T^3$	7.05401×10^{-1}	2.47749×10^{-9}
$k_{eff}\, T_{zz}\, T^2\, z_0$	8.92817×10^{-2}	3.13573×10^{-10}
$-\frac{7}{4}\, k_{eff}\, R_E\, \Omega_y{}^4\, T^4$	-6.57069×10^{-3}	2.30774×10^{-11}
$-\frac{7}{4}\, k_{eff}\, R_E\, \Omega_y{}^2\, \Omega_z{}^2\, T^4$	-3.84744×10^{-3}	1.35129×10^{-11}
$-\frac{3\, k_{eff}{}^2\, \Omega_y{}^2\, \hbar\, T^3}{2\, m}$	-2.30795×10^{-3}	8.10592×10^{-12}
$-3\, k_{eff}\, v_{z0}\, \Omega_y{}^2\, T^3$	-2.30795×10^{-3}	8.10592×10^{-12}
$\frac{1}{4}\, k_{eff}\, T_{zz}{}^2\, V_L\, T^5$	2.18739×10^{-3}	7.68251×10^{-12}
$3\, k_{eff}\, v_{y0}\, \Omega_y\, \Omega_z\, T^3$	1.76607×10^{-3}	6.20273×10^{-12}
$-\frac{31}{360}\, k_{eff}\, T_{zz}{}^2\, g\, T^6$	-7.53436×10^{-4}	2.6462×10^{-12}
$4\, B_0\, V_L\, T^2\, \alpha\, b_{z1}$	5.14655×10^{-4}	1.80756×10^{-12}
$-4\, B_0\, g\, T^3\, \alpha\, b_{z1}$	-5.14655×10^{-4}	1.80756×10^{-12}
$k_{eff}\, \Omega_y{}^2\, T^2\, z_0$	9.73714×10^{-5}	3.41985×10^{-13}
$-k_{eff}\, \Omega_y\, \Omega_z\, T^2\, y_0$	-7.45096×10^{-5}	2.61691×10^{-13}
$\frac{7}{6}\, k_{eff}\, T_{zz}\, v_{x0}\, \Omega_y\, T^4$	6.39894×10^{-5}	2.24742×10^{-13}
$-7\, V_L\, g\, T^4\, \alpha\, b_{z1}^2$	-4.7766×10^{-5}	1.67762×10^{-13}
$\frac{7}{6}\, k_{eff}\, T_{xx}\, v_{x0}\, \Omega_y\, T^4$	-3.19947×10^{-5}	1.12371×10^{-13}
$4\, V_L{}^2\, T^3\, \alpha\, b_{z1}^2$	2.72948×10^{-5}	9.58642×10^{-14}
$3\, g^2\, T^5\, \alpha\, b_{z1}^2$	2.04711×10^{-5}	7.18982×10^{-14}

Systematische Sensitivität:
$\delta g \approx 10^{-16}$

Aus Talk von M. Kasevich, Stanford University

Atominterferometrie in China

„High-Precision Atom Interferometer for the Test of the Equivalence Principle“:

Prof. Wang Jin, Wuhan University

12,6 m Höhe des Systems
10 m Atom-Fontäne

Wuhan Branch of Chinese Academy of Sciences

Gliederung

1. Einleitung
2. Atominterferometer
3. Test des Äquivalenzprinzips
4. Fazit

Zusammenfassung

- Interferometrie ermöglicht extrem empfindliche Messungen

- Atominterferometrie mach neue Messungen möglich
  → neue Messgrößen zugänglich
  → Sensitivität auf extrem schwache Effekte

- Atominterferometer bieten bessere Genauigkeit als makroskopische Experimente

Ausblick

→ Äquivalenzprinzip

• Atominterferomertemessungen werden die bisherige Genauigkeit weiter verbessern

• Satellitengestützte Experimente (z.B. STEP, µSCOPE) sollen Genauigkeit weiter verbessern

→Atominterferometrie

• Interferometer mit BECs

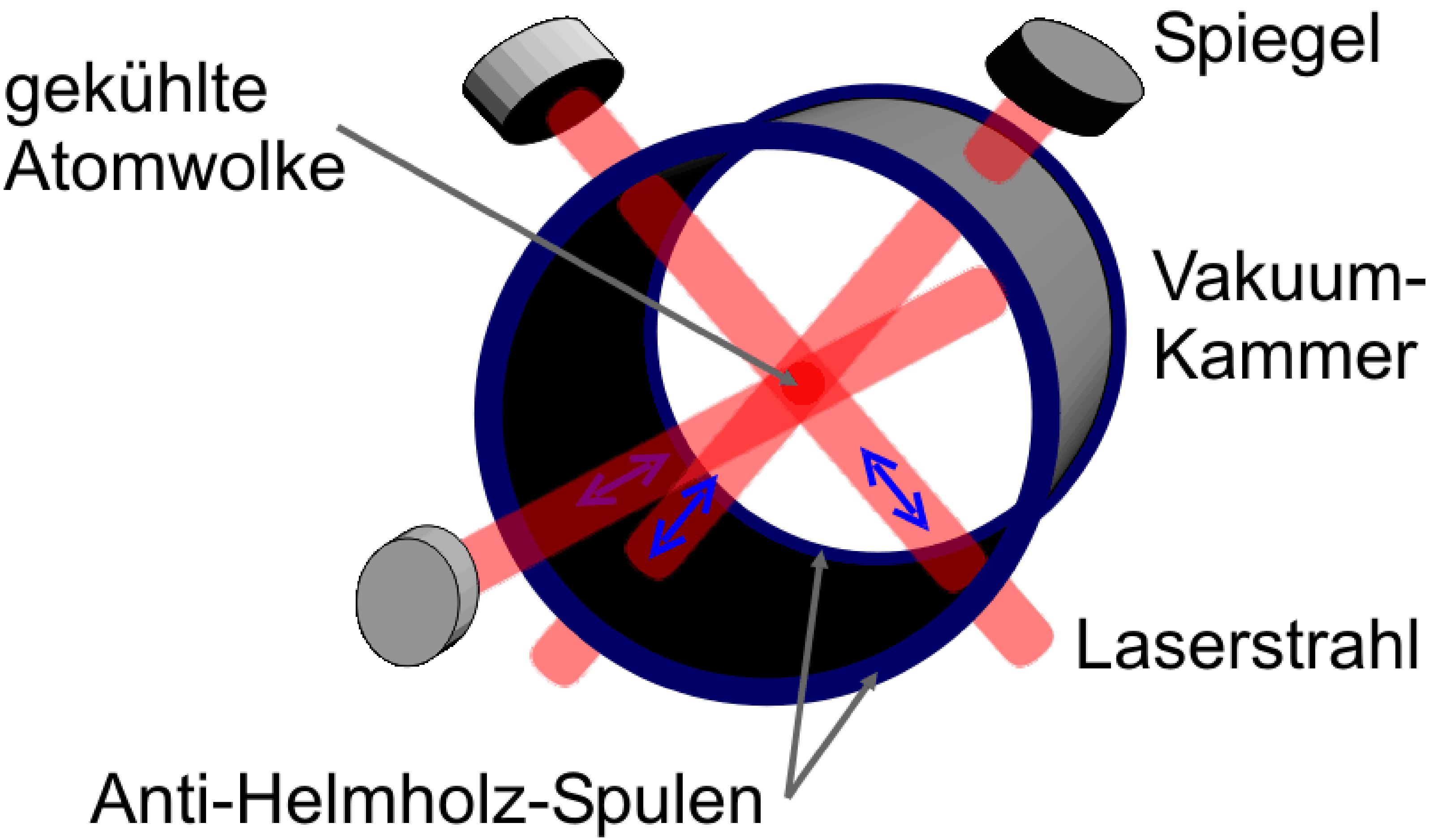
• Interferometer unter Schwerelosigkeit

• Interferenz makroskopischer Objekte

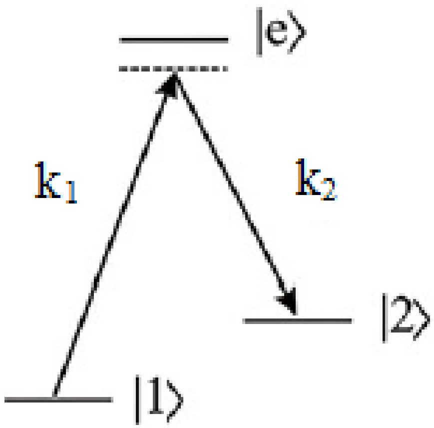
Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Fragen?

Magneto-optische Falle

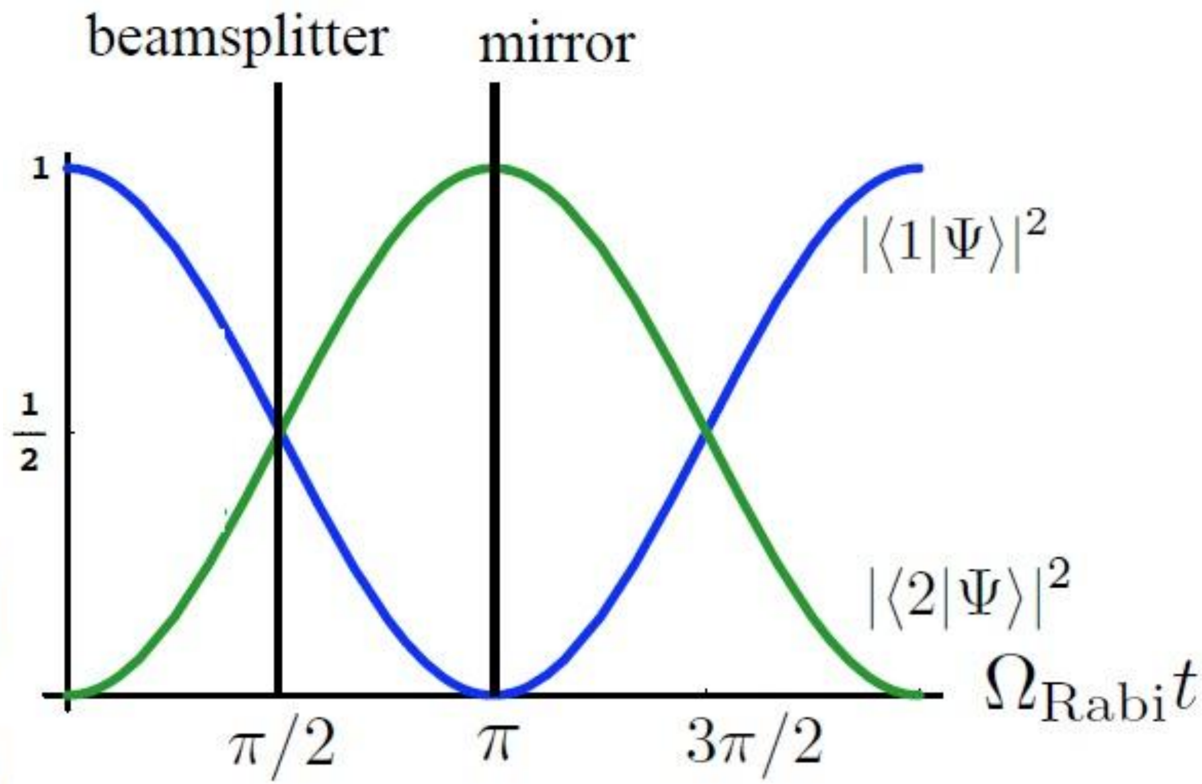


Rabi-Oszillation



$$p_1(t) = cos^2\left(\frac{\Omega \cdot t}{2}\right)$$

$$p_2(t) = sin^2\left(\frac{\Omega \cdot t}{2}\right)$$



Aus Talk von Jay Wacker, SLAC