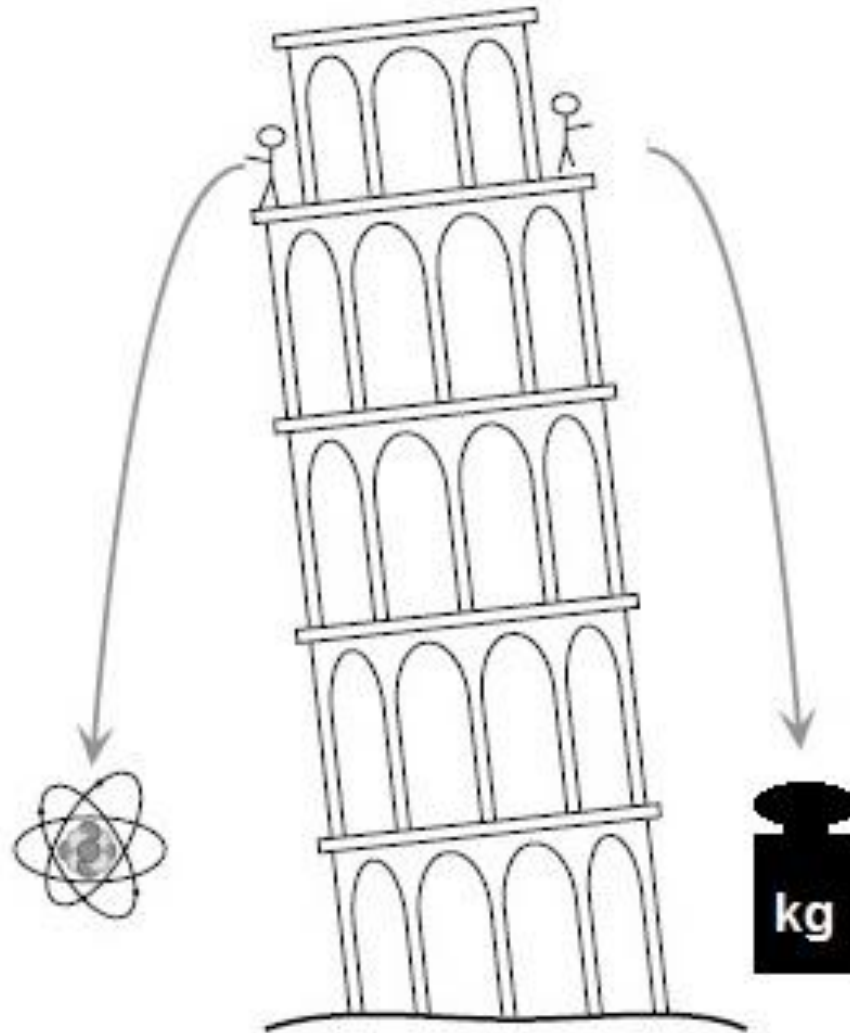


# Atominterferometrie

Kai Lampmann

Berlin, den 23. Mai 2011

# Motivation

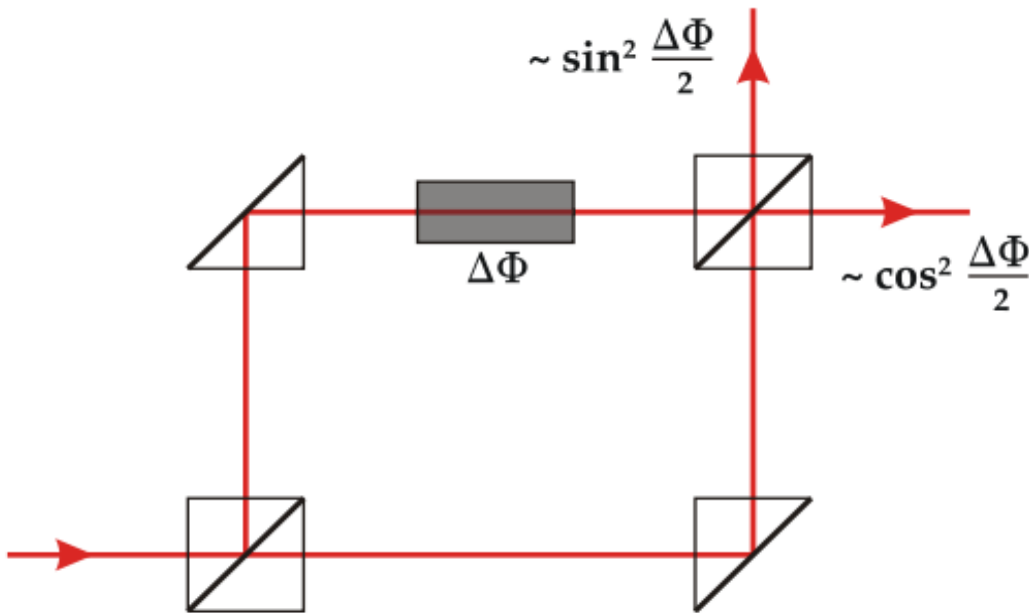


# Gliederung

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

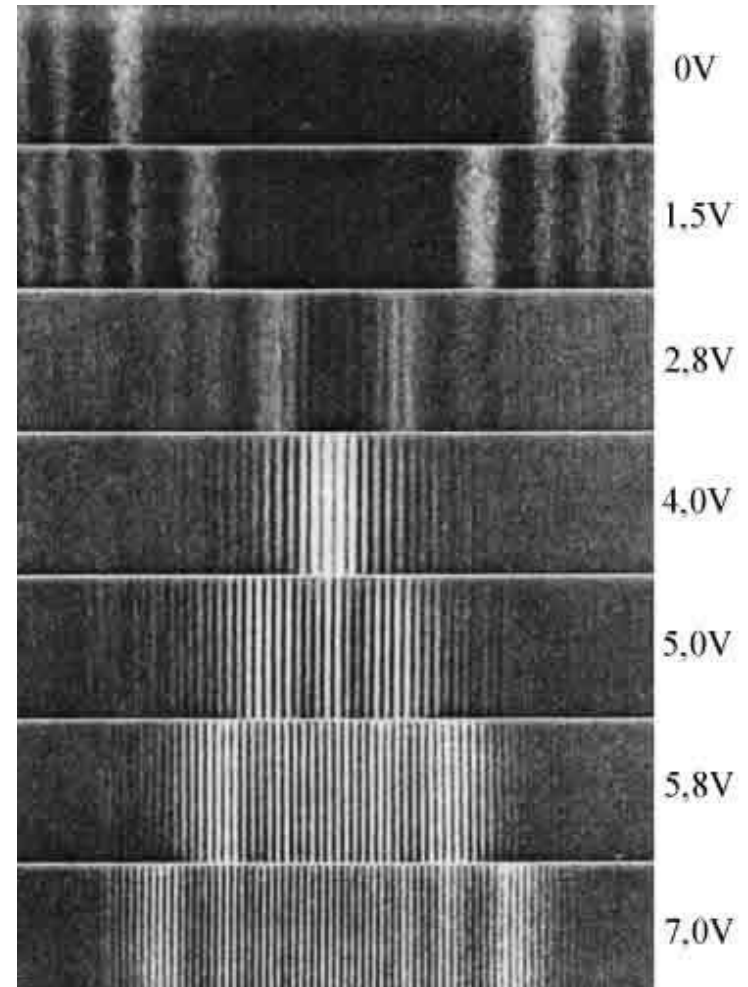
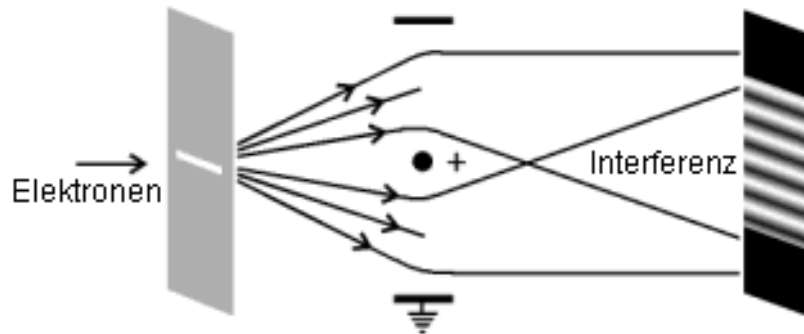
→ Messung durch Interferenz

# Elektronen-Interferenz

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

## Elektronen-Interferenz

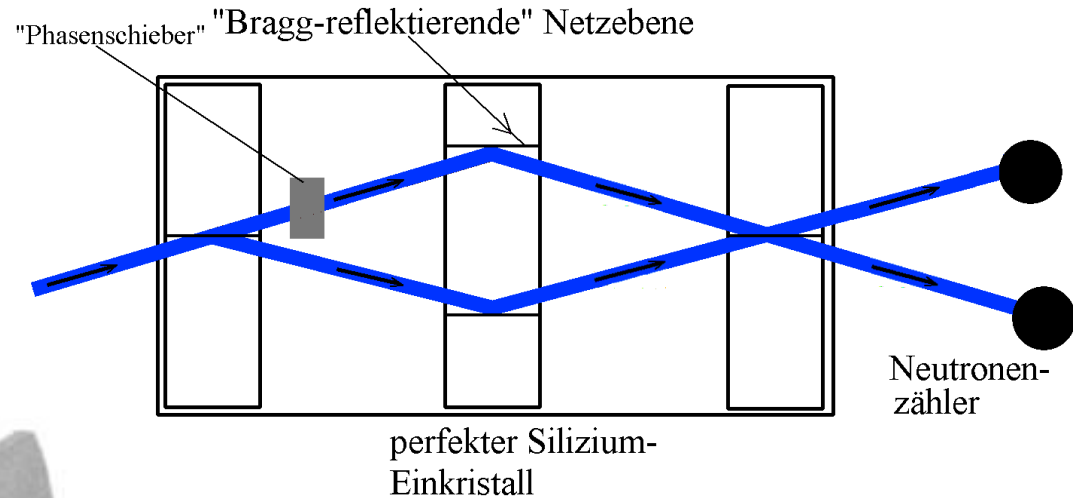
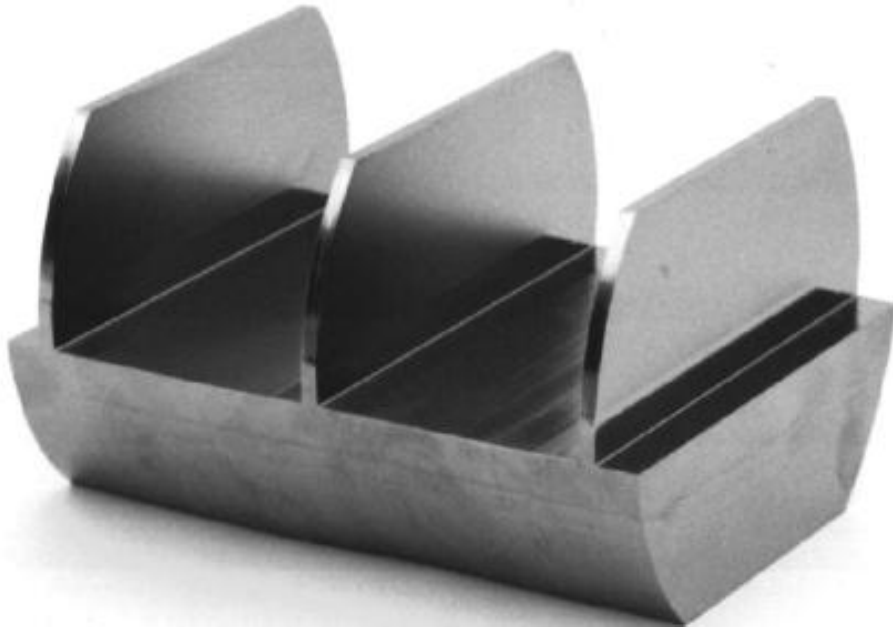
Möllenstedt und Dürker, 1954:



# Neutronen-Interferometrie

Rauch, 1974

Silizium-Perfektkristall-  
Neutronen-Interferometer



Mach-Zehnder-Interferometer

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

# 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

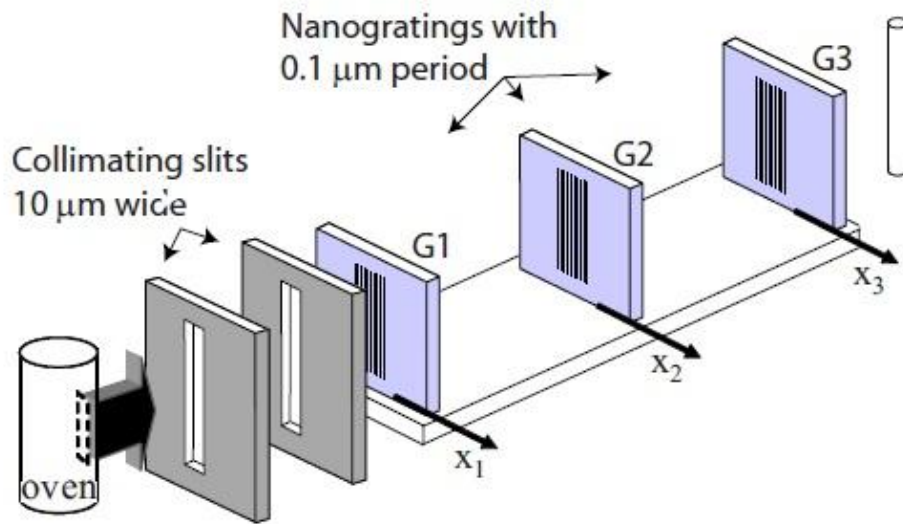
1. Einleitung
- 2. Atominterferometer**
3. Test des Äquivalenzprinzips
4. Fazit



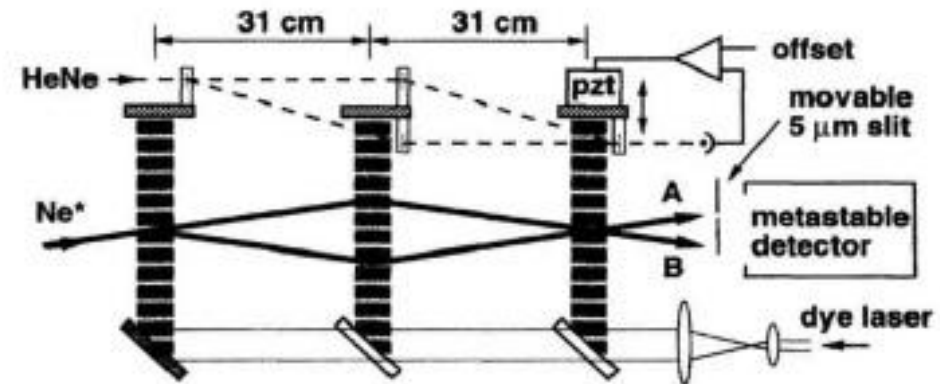
# Atominterferometer

## Atominterferometer mit Gittern

- Transmissionsgitter mit Perioden  $\approx 100$  nm
- Herstellung mittels Nanolithographie



## Atominterferometer mit Lichtwellen

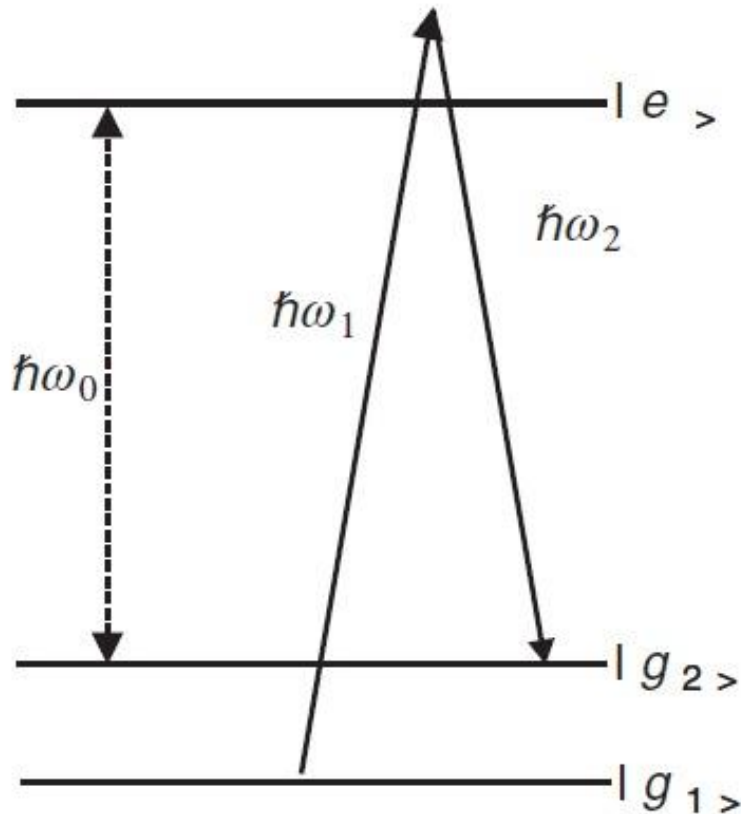


- Realisierung des Gitters durch stehende Lichtwellen
- Brechung der Materiewellen nach der Bragg-Beziehung:

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

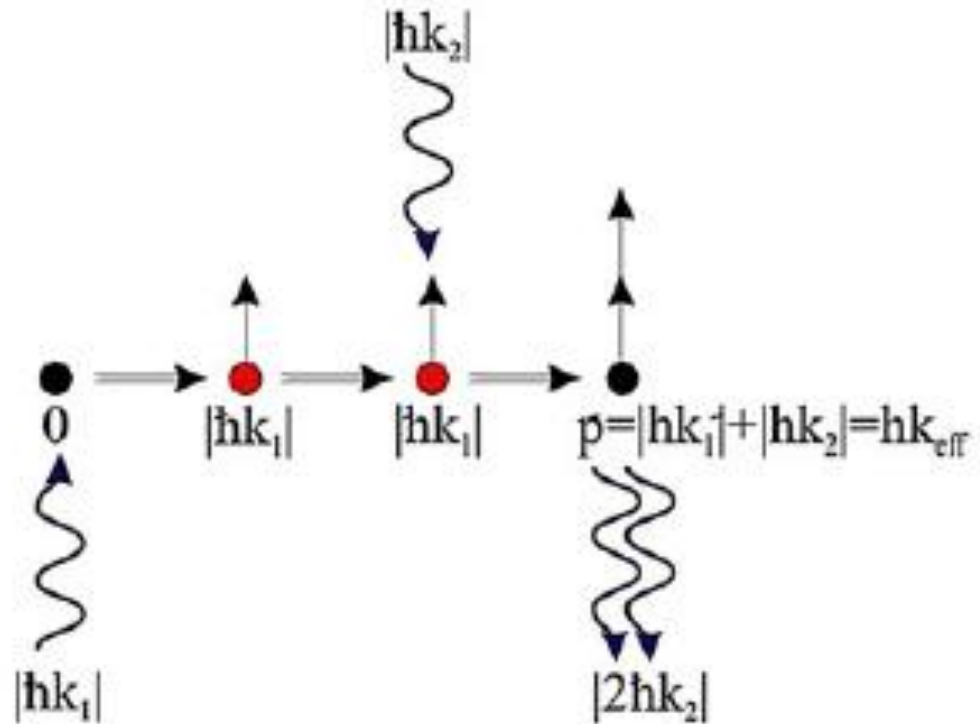
# Atominterferometer mit Lichtpulse

Stimulierte Raman-Übergänge



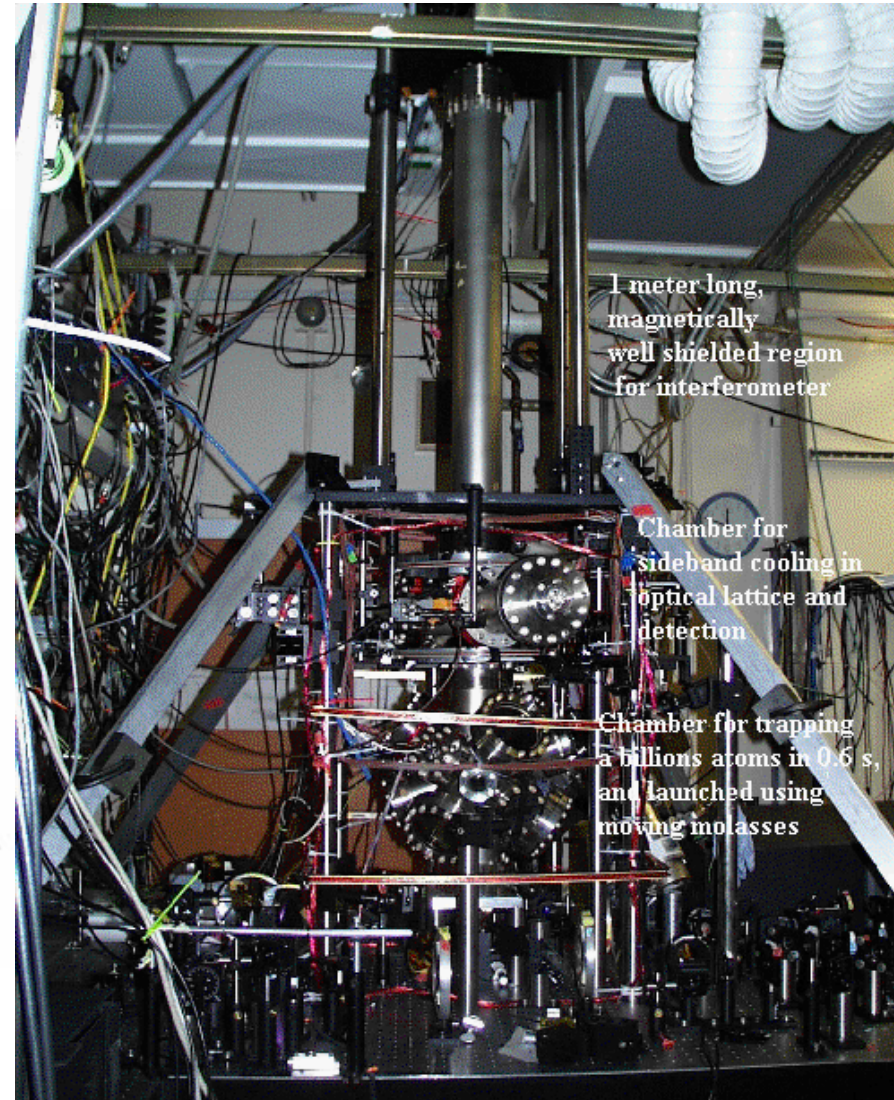
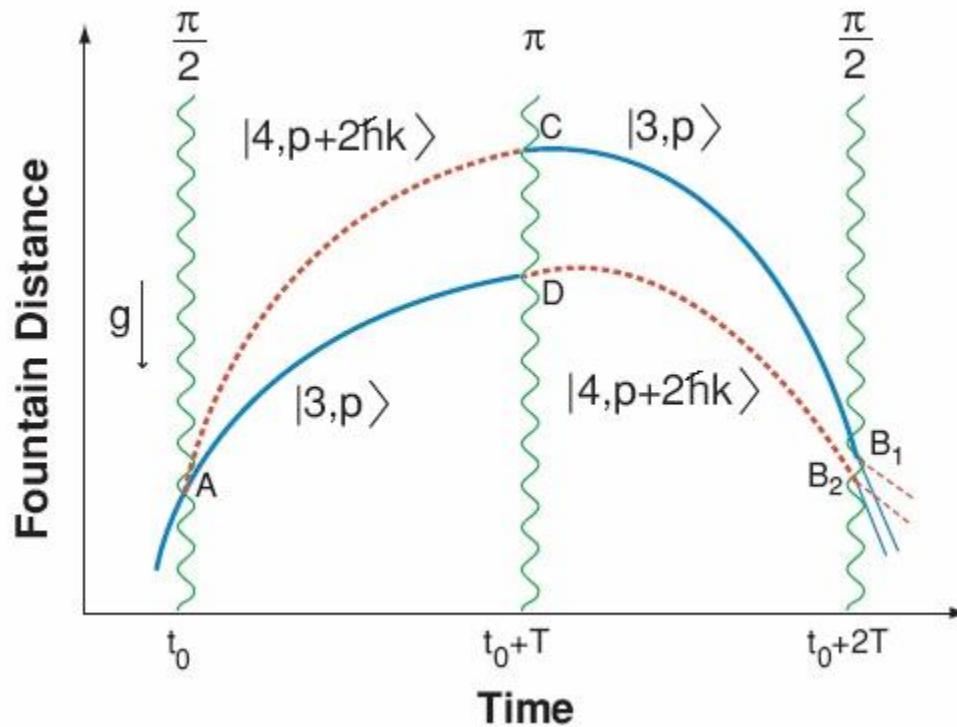
Es gilt:  $k_{1,2} = \frac{\omega_{1,2}}{c}$

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

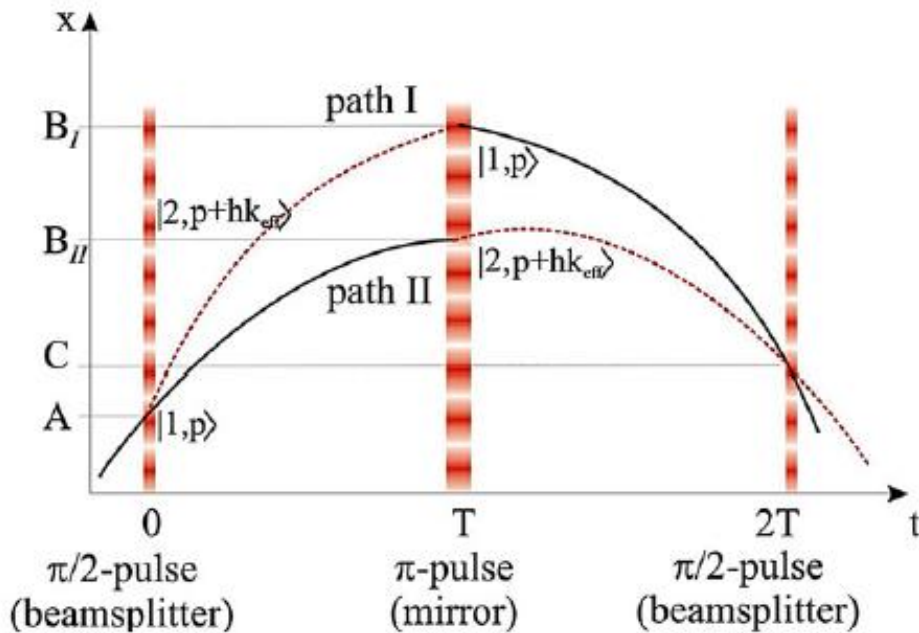


# Atomfontäne

Realisierung des Interferometers:



# Einfluss der Gravitation auf den Phasenunterschied



Berechnung der Phasendifferenz

$$\Phi(x^A, 0) = 0$$

$$\Phi(x_{II}^B, T) = k_{eff} \left[ -\frac{1}{2}gT^2 + v_0T \right]$$

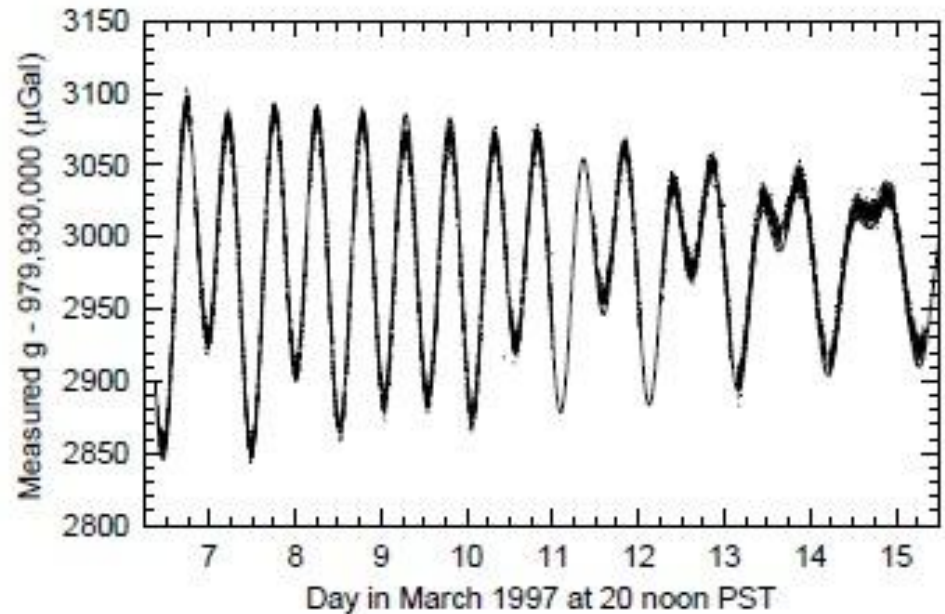
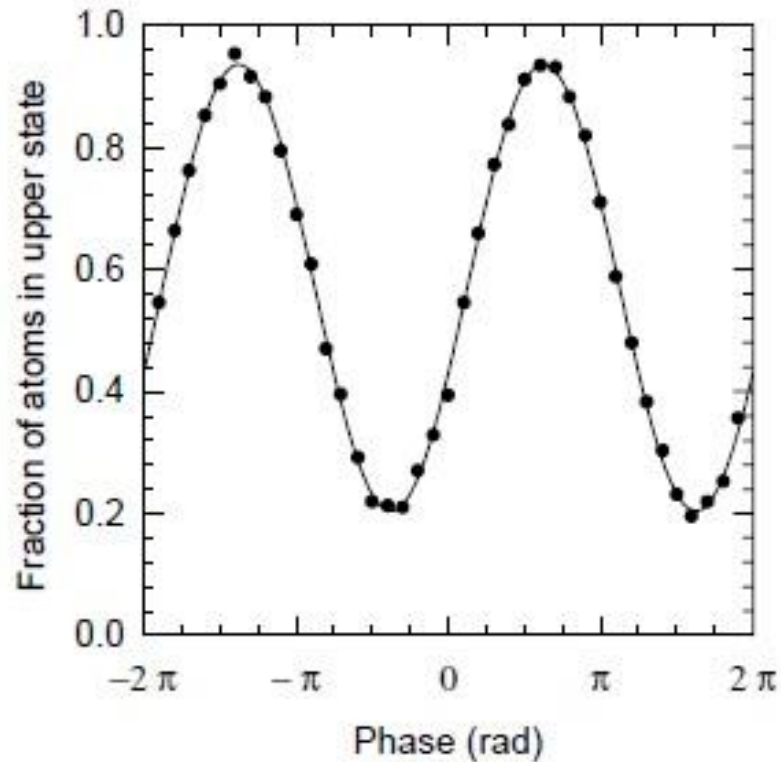
$$\Phi(x_I^B, T) = k_{eff} \left[ -\frac{1}{2}gT^2 + \left( v_0 + \frac{\hbar k_{eff}}{m} \right) T \right]$$

$$\Phi(x^C, 2T) = k_{eff} \left[ -2gT^2 + \left( 2v_0 + \frac{\hbar k_{eff}}{m} \right) T \right]$$

Phasenunterschied:

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

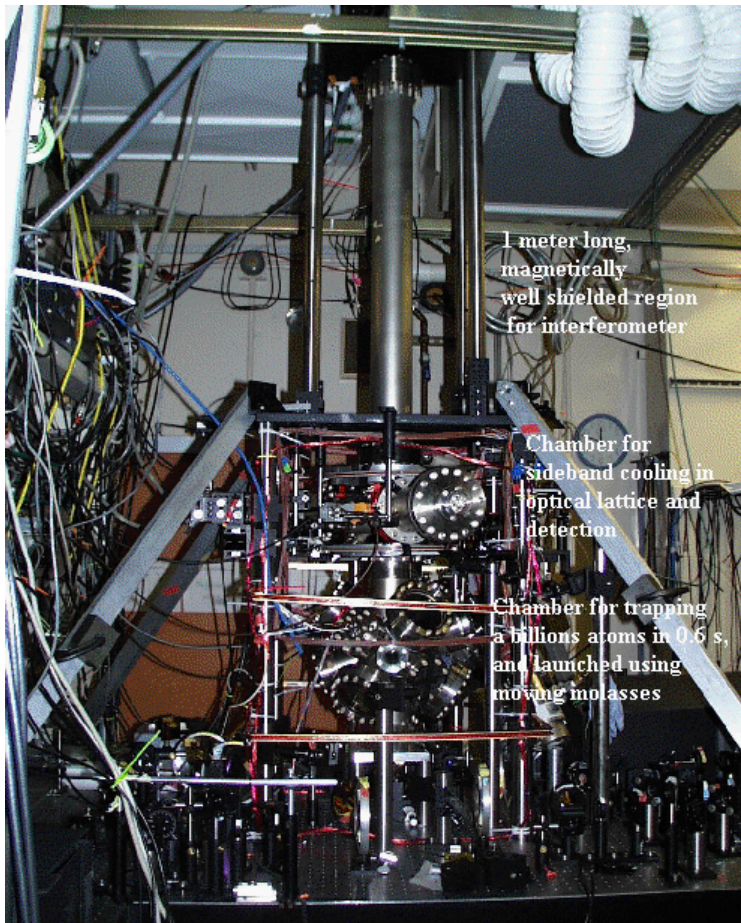
# Messergebnis



$$g = 979\,933\,160 \pm 4 \text{ Gal}$$

$$\text{mit } 1 \text{ Gal} = 0,01 \text{ m/s}^2$$

# Vergleich mit Standard



VS.

Gravimeter FG5



Beschleunigung zusammen messen:

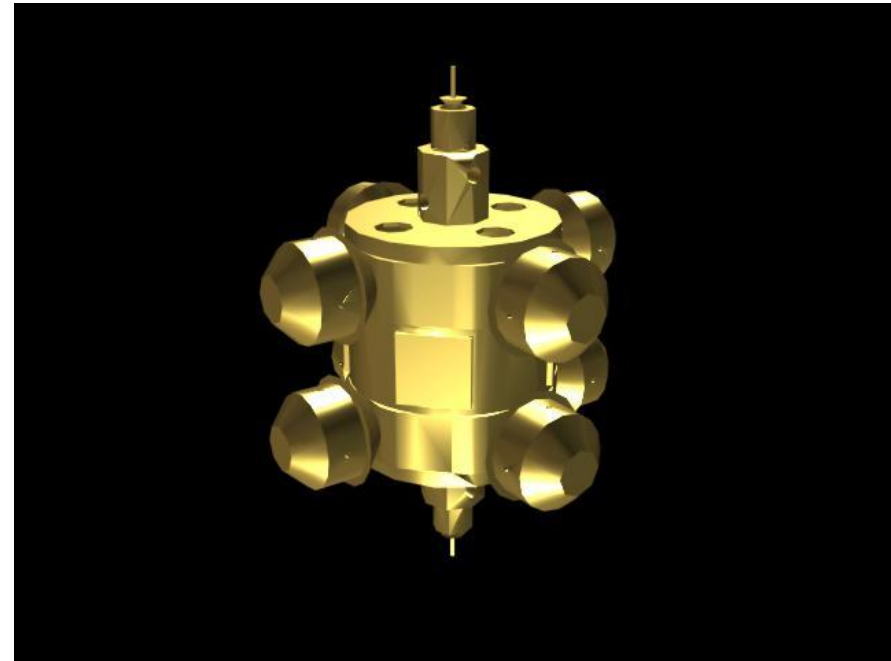
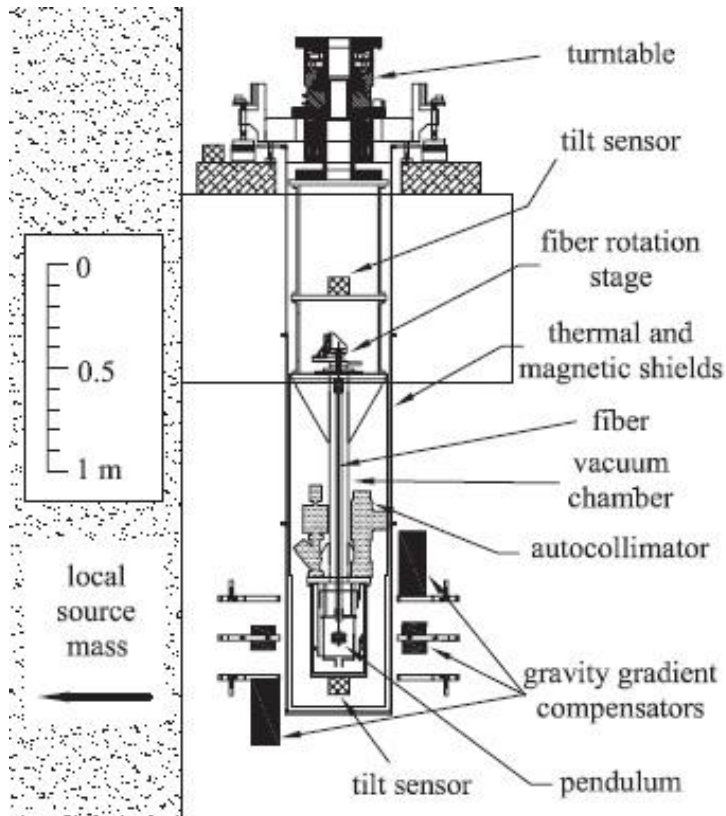
$$\delta g \approx 7 \times 10^{-9}$$

# Gliederung

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

# Äquivalenzprinzip

= Universalität des freien Falls

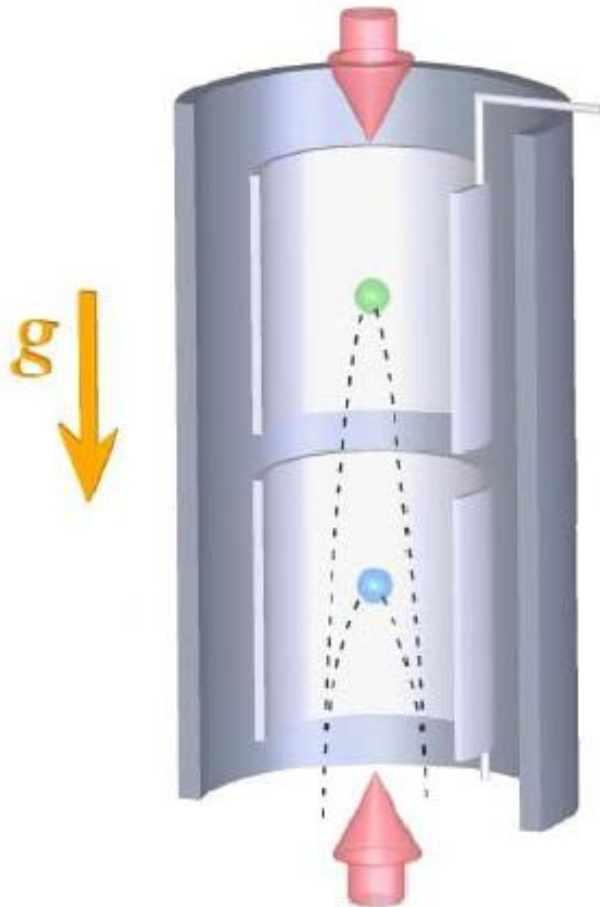


Sensitivität:  $\delta g \approx 10^{-13}$

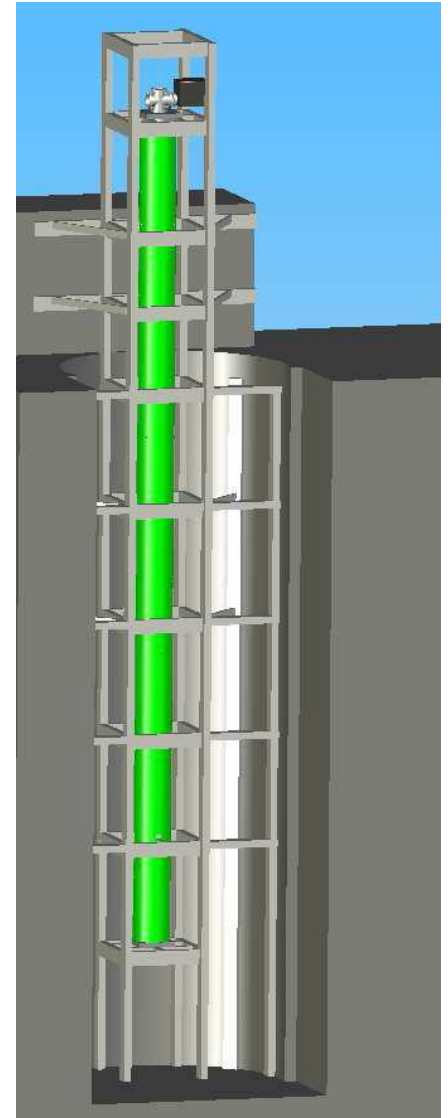


# Äquivalenzprinzip auf Quantenebene

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



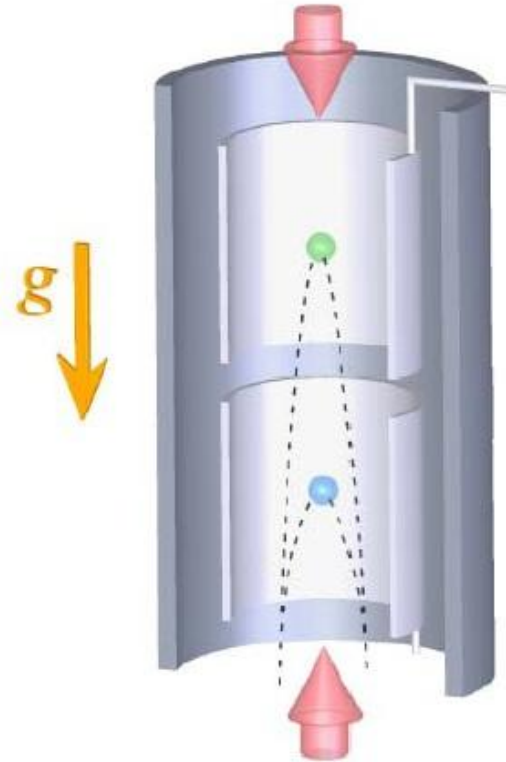
# 10-Meter-Fontäne in Stanford



# Verbesserung der Sensitivität

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

10m Fontäne → Faktor 100



Common-Mode-Rejection → ca. Faktor 100

Statistische Sensitivität:

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

# Systematische Einflüsse

$-k_{\text{eff}} g T^2$

$-2.84724 \times 10^8$

1.

# Systematische Einflüsse

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

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

# 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



# Gliederung

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

# Zusammenfassung

- Interferometrie ermöglicht extrem empfindliche Messungen
- Atominterferometrie macht neue Messungen möglich
  - neue Messgrößen zugänglich
  - Sensitivität auf extrem schwache Effekte
- Atominterferometer bieten bessere Genauigkeit als makroskopische Experimente



# Ausblick

## → Äquivalenzprinzip

- Atominterferometremessungen werden die bisherige Genauigkeit weiter verbessern
- Satellitengestützte Experimente (z.B. STEP,  $\mu$ SCOPE) sollen Genauigkeit weiter verbessern

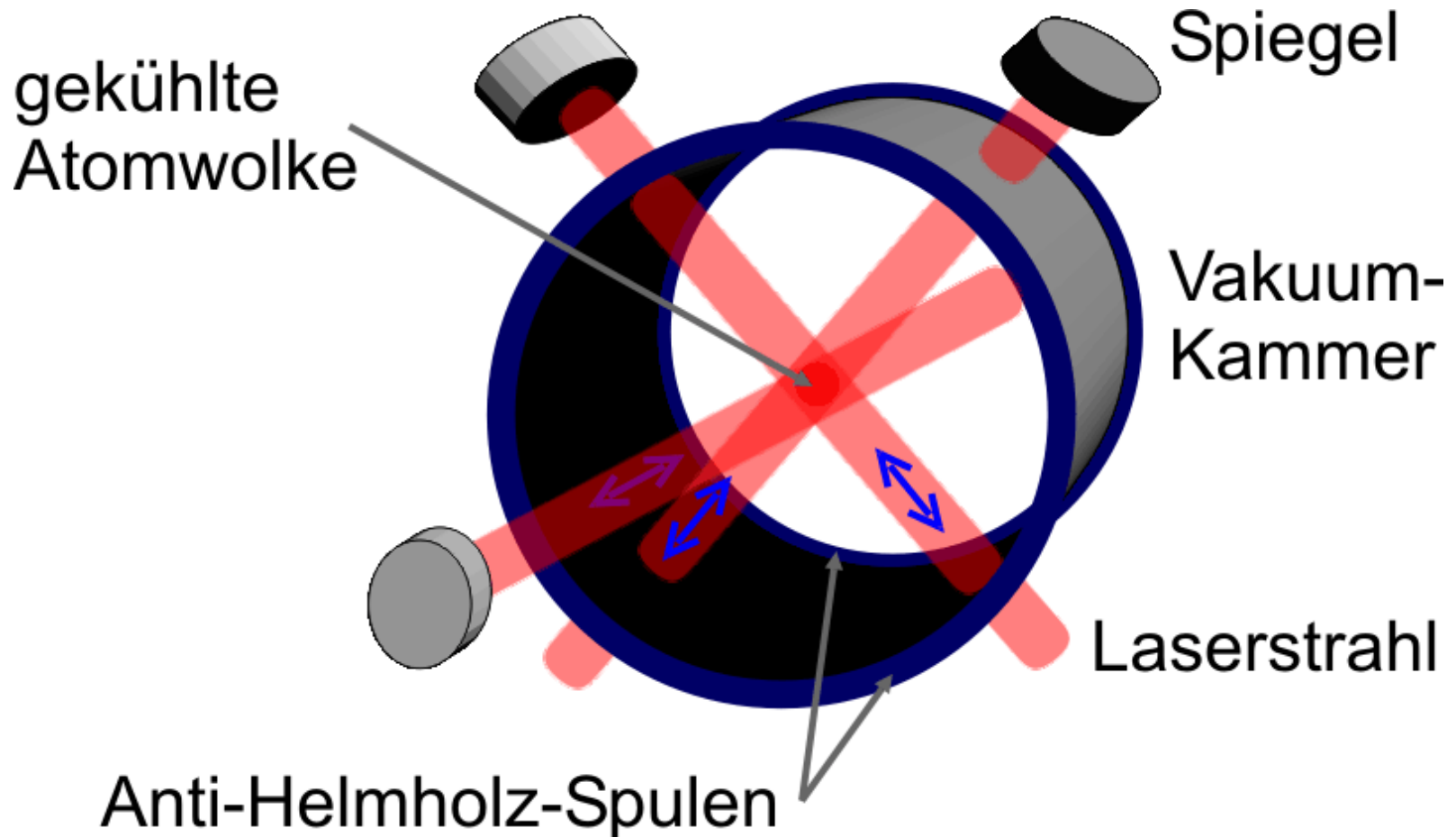
## → Atominterferometrie

- Interferometer mit BECs
- Interferometer unter Schwerelosigkeit
- Interferenz makroskopischer Objekte

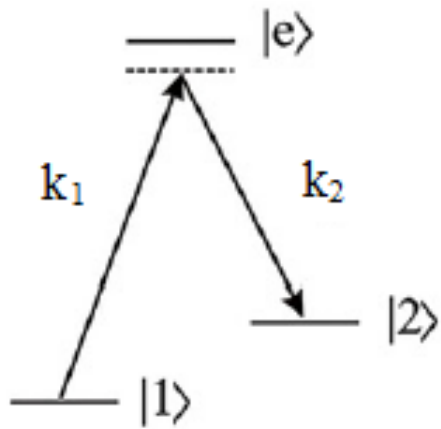
Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Fragen?

# Magneto-optische Falle



# Rabi-Oszillation



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

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

