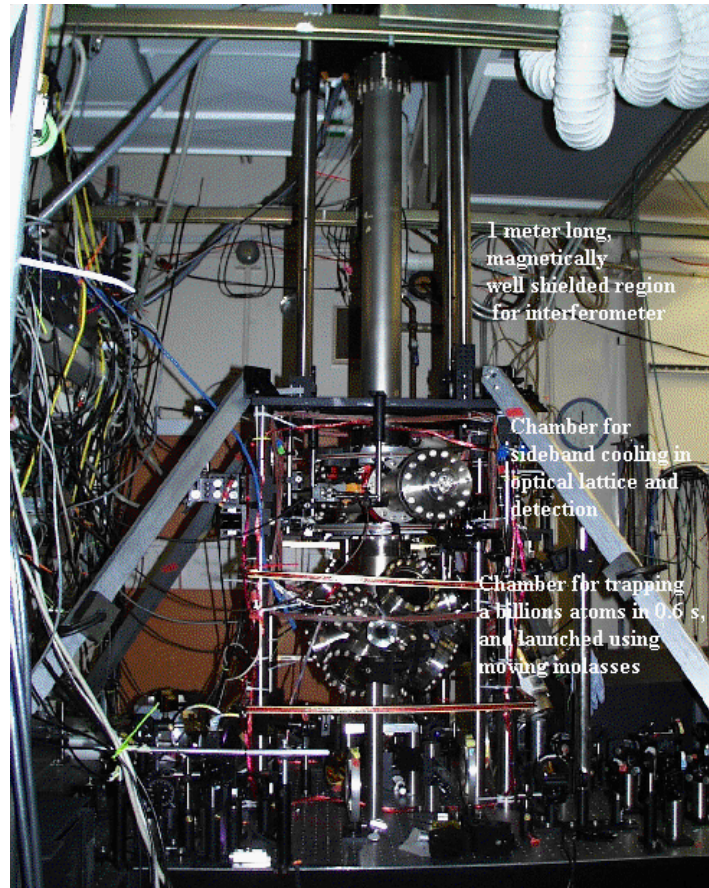


# Atominterferometrie



[www.stanford.edu/group/chugroup/amo/interferometry.html](http://www.stanford.edu/group/chugroup/amo/interferometry.html)

Seminar – Grundlagen der Quantenphysik



## Gliederung

### 1. Allgemeines

### 2. Theorie

#### 2.1 Prinzip

#### 2.2 Atominterferometer

#### 2.3 Phasendifferenz

### 3. Experiment

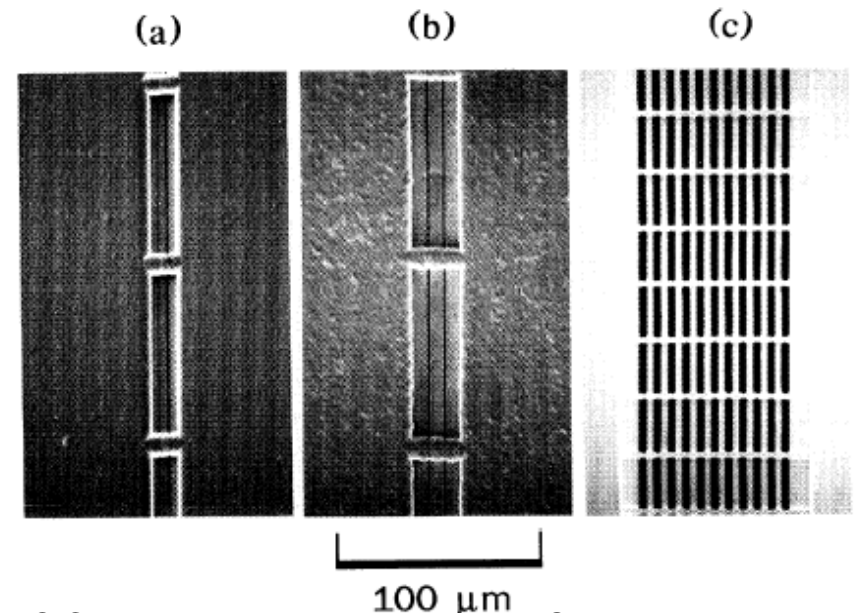
#### 3.1 Aufbau

#### 3.2 Ergebnisse

### 4. Zusammenfassung

## 1. Allgemeines I

- Interferometrie: Elektronen, Neutronen, Atomen, Ionen, Moleküle
- Vorteile Atome:
  - Längere Messzeiten durch laser cooling
  - gegenüber Neutronen: einfachere Bereitstellung der Atome
- 1991: erstes Atom-Interferometer mit mechanischen Spalten bzw. Gittern
- Mögliche Messungen: Gravitations-, Feinstrukturkonstante, Gravitationsbeschleunigung, Rotation



O.Carnal, J.Mlynek, Young's Double-Slit Experiment with Atoms: A simple Atom Interferometer, *Phy.Rev.Let.* 1991, 66, 2689-2692



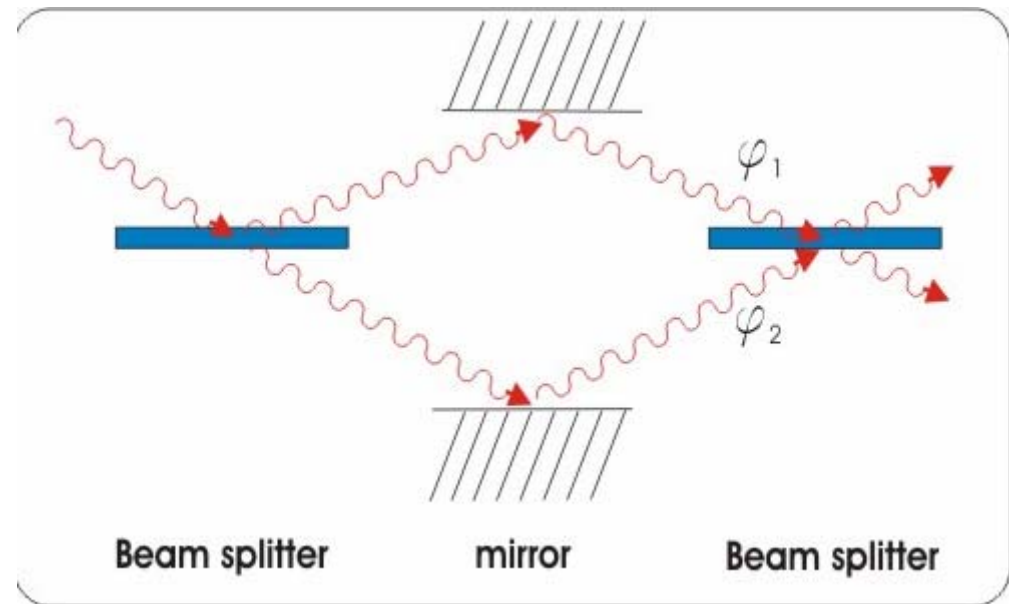
## 1. Allgemeines II

- Messung der Gravitationsbeschleunigung anhand der Phasenänderung
- Wichtig für vielfältige Anwendungen:
  - Geophysik und Metrologie
  - Aufspüren von Öl- und Wasservorkommen
- Messgenauigkeit von  $10^{-6}$  bis  $10^{-10}$  nötig
- klassische Bestimmung: Pendelversuche

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

## 2. Theorie - Prinzip

- Superposition von zwei oder mehr räumlich getrennten Atomzuständen eines Atoms
- Zustände: Beschreibung durch ein quantenmechanischen Phasenterm  
→ Interferenz



[http://www.iqo.uni-hannover.de/ertmer/casiindex/px/Mach\\_Zehnder\\_optischE4F.jpg](http://www.iqo.uni-hannover.de/ertmer/casiindex/px/Mach_Zehnder_optischE4F.jpg)

- Strahlteiler und Spiegel mit Hilfe von Licht-Pulsen
- nötig: stabile Atome und optische Anregung

## 2. Theorie - Atominterferometer

- Voraussetzung des Atoms:
  - Stabilität der angeregten Zustände
- Hyperfeinstrukturübergang

$$|F = 3, m_F = 0\rangle \longleftrightarrow |F = 4, m_F = 0\rangle$$

der Cs-Atome erfüllt Stabilitätskriterium

### • Mach-Zehnder-Typ

- Erhöhung Empfindlichkeit eines Atominterferometers durch Verwendung von Puls-Sequenzen
  - große Impulsunterschiede zwischen Interferometerwegen
- Impulsübertrag durch stimulierte Raman-Übergänge

Paul R. Berman, Atom Interferometry, Academic Press 1997

A. Peters, K. Y. Chung, S. Chu, High-precision gravity measurements using atom interferometry, Metrologia 38, 25-61 (2001)

## 2. Theorie - Stimulierte Raman-Übergänge

- Atom: Bestrahlung zwei entgegengesetzt gerichteter Laser

$$\vec{k}_{eff} = \vec{k}_1 - \vec{k}_2$$

$$k_{eff} = |\vec{k}_1| + |\vec{k}_2|$$

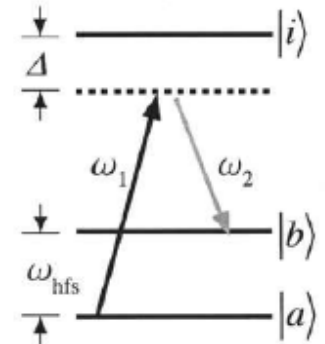
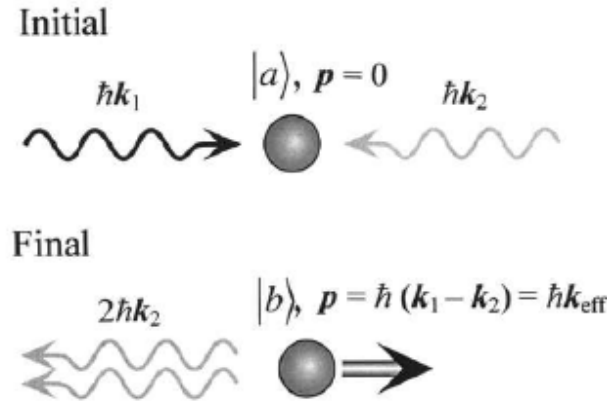
$$\omega_{eff} = \omega_{hfs} = \omega_1 - \omega_2$$

- Atom: Absorption und Emission von Photonen

- Impulserhaltung: Atom bekommt Rückstoß  $\hbar\vec{k}_{eff}$

- Phasenänderung der quantenmechanischen Phase  $\longleftrightarrow$  Raman-Phase

$$\phi_i = k_{eff} z_i - \omega_{eff} t_i$$



2. Theorie - Pfade im Interferometer I

$$\psi = |a, p\rangle$$

$\pi/2$  -Puls

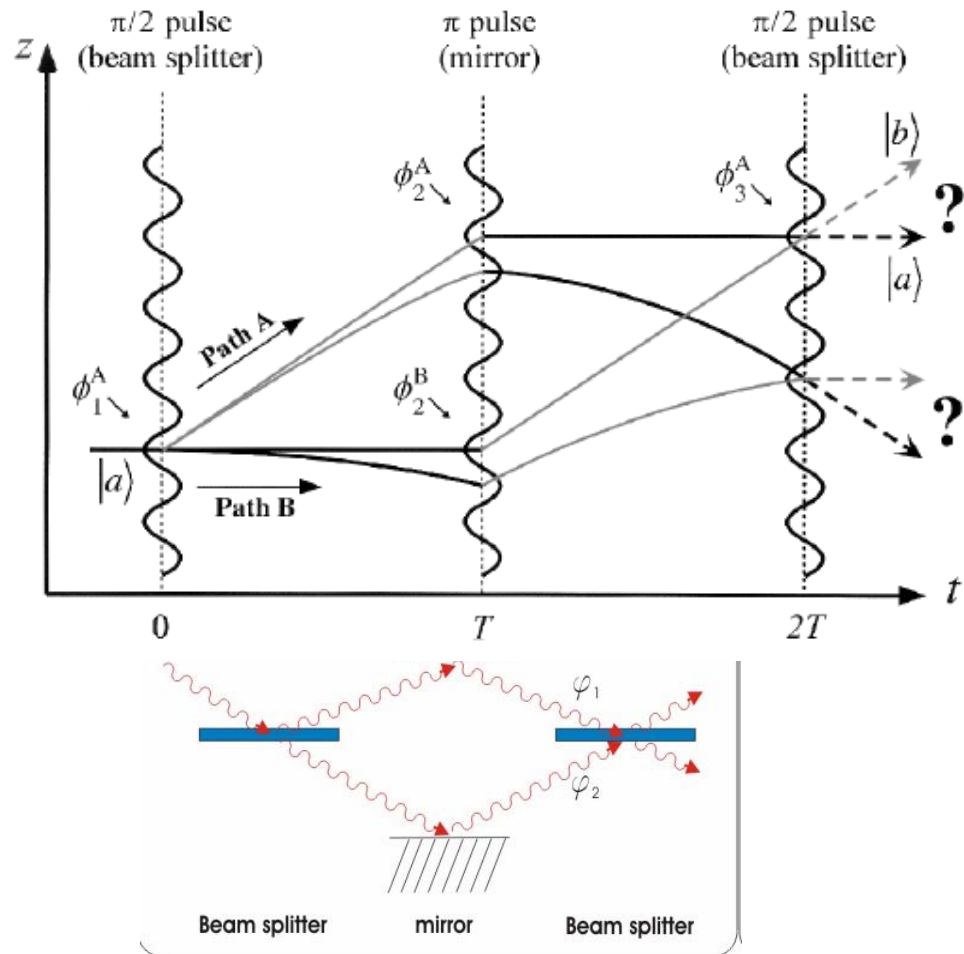
$$\psi = \alpha_1 |a, p\rangle + \alpha_2 |b, p + \hbar k_{eff}\rangle$$

$\pi$  -Puls

$$\psi = \alpha_1 |b, p + \hbar k_{eff}\rangle + \alpha_2 |a, p\rangle$$

$\pi/2$  -Puls

Detektion der Zustandspopulation



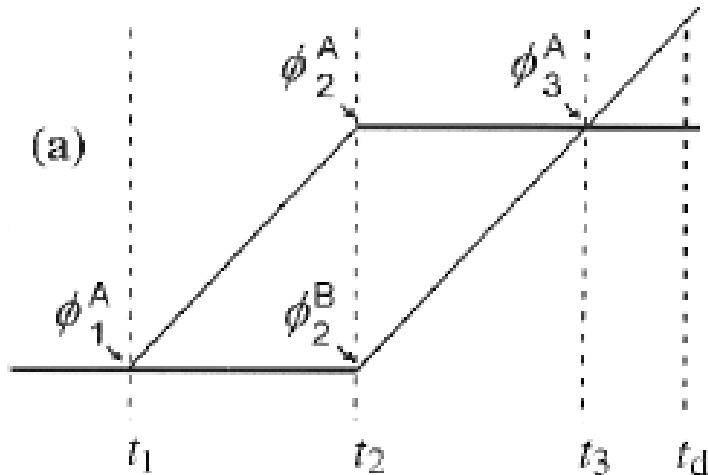
A.Peters, K. Y. Chung, S. Chu, Measurement of gravitational acceleration by dropping atoms, Nature **400**, 849-852 (1999)

A.Peters, K. Y. Chung, S. Chu, High-precision gravity measurements using atom interferometry, Metrologia **38**, 25-61 (2001)

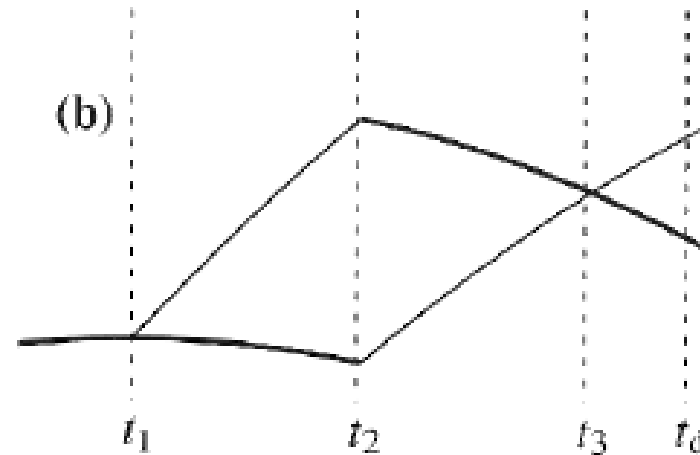


2. Theorie - Phasendifferenz

(a) Pfad ohne Gravitationsfeld



(b) Pfad mit Gravitationsfeld



$$\Delta\phi_{total} = \cancel{\Delta\phi_{Pfad}} + \Delta\phi_{Licht}$$

$$\Delta\phi_{Licht} = (\phi_1^A - \phi_1^A) - (\phi_2^B - \phi_3^A)$$

Zustandsänderung  $\rightarrow$  Phasenänderung um  $\phi_i = k_{eff} z_i - \omega_{eff} t_i$

$$(a) \boxed{\Delta\phi = 0}$$

$$(b) \boxed{\Delta\phi = k_{eff} g T^2}$$

A.Peters, K. Y. Chung, S. Chu, High-precision gravity measurements using atom interferometry, Metrologia 38, 25-61 (2001)

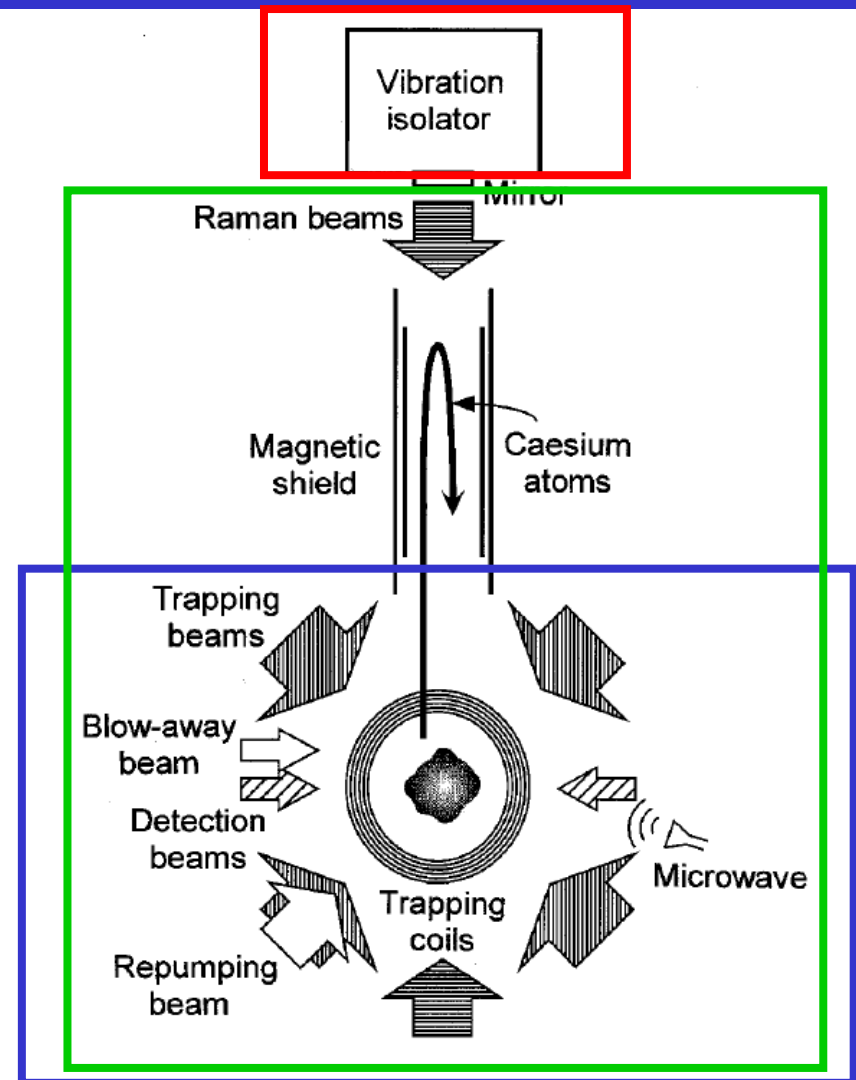
### 3. Experiment – Aufbau I

1. Atomquelle und Detektion

2. Licht-Puls Interferometer

3. Anti-Vibrations-System

A.Peters, K. Y. Chung, S. Chu, High-precision gravity measurements using atom interferometry, Metrologia 38, 25-61 (2001)

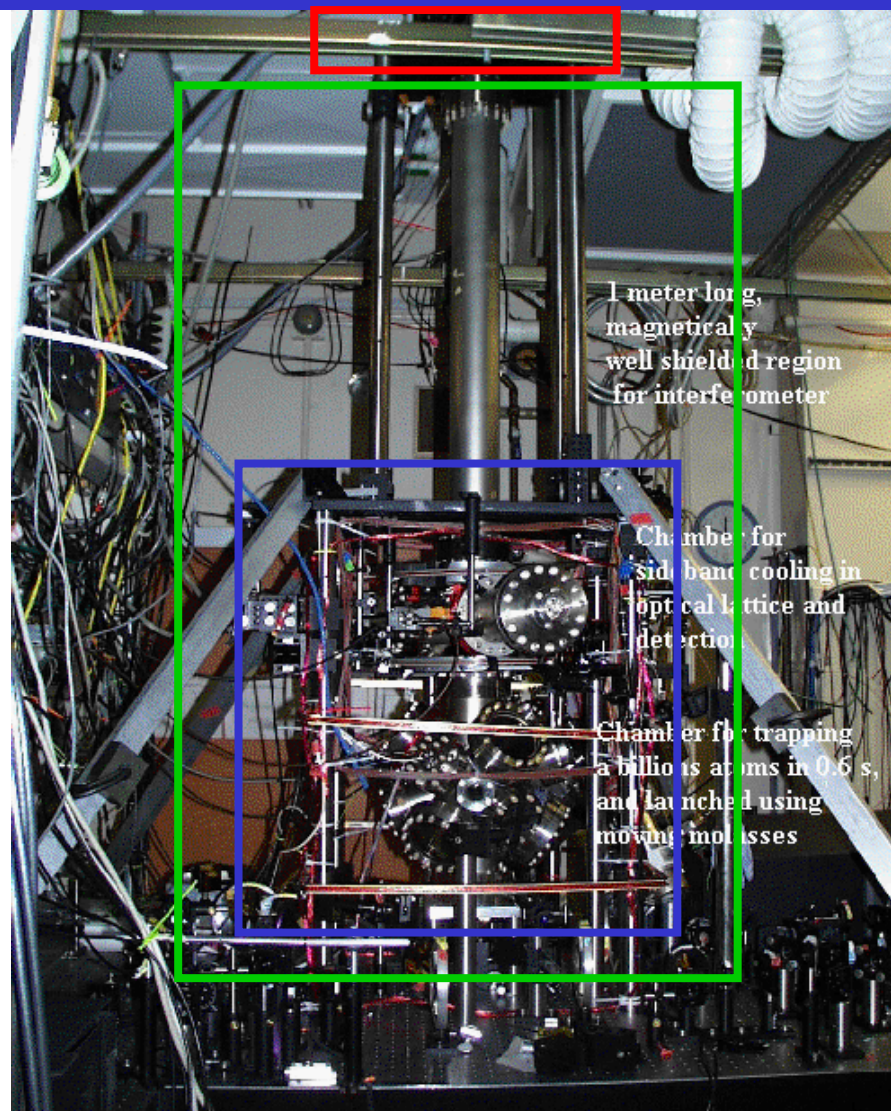


### 3. Experiment – Aufbau II

1. Atomquelle und Detektion

2. Licht-Puls Interferometer

3. Anti-Vibrations-System



### 3. Experiment – Aufbau III

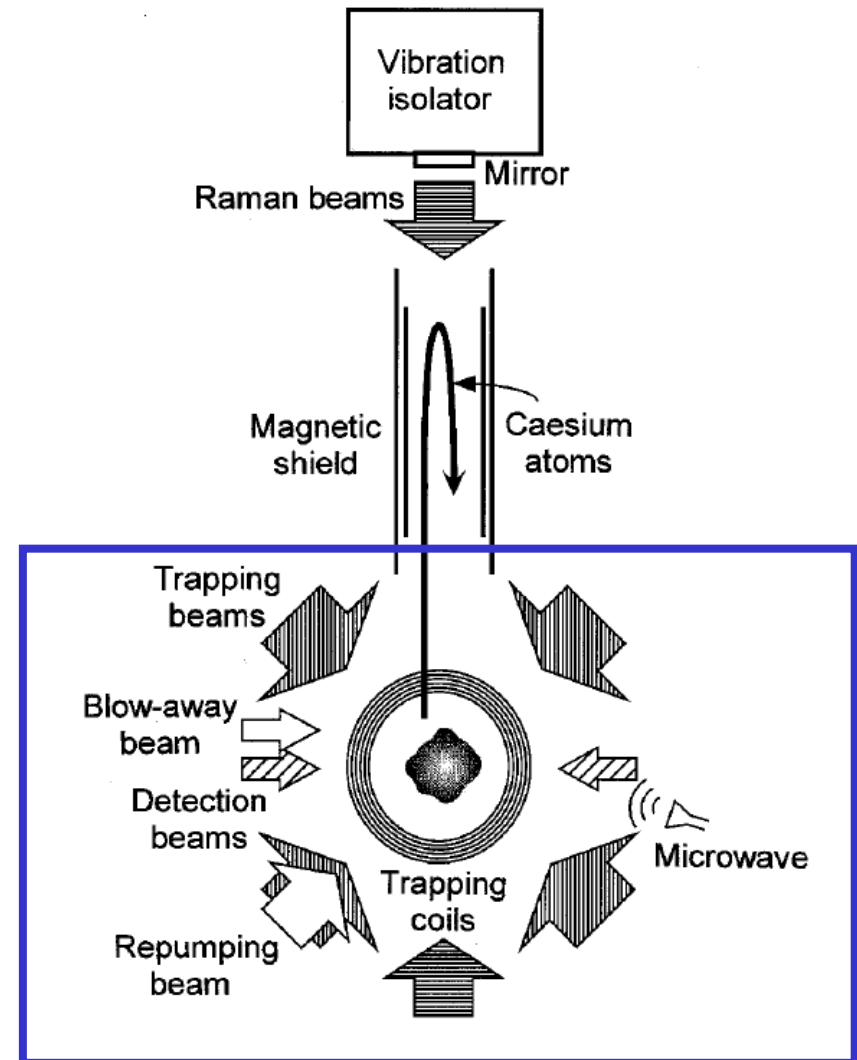
#### 1. Atomquelle

- $10^8$  Atome in Magneto-Optische-Falle  $\rightarrow$  werden abgebremst

- Präparierung der Atome in

$$|F = 3, m_F = 0\rangle$$

Zustand



### 3. Experiment – Aufbau IV

#### 2. Licht-Puls Interferometer

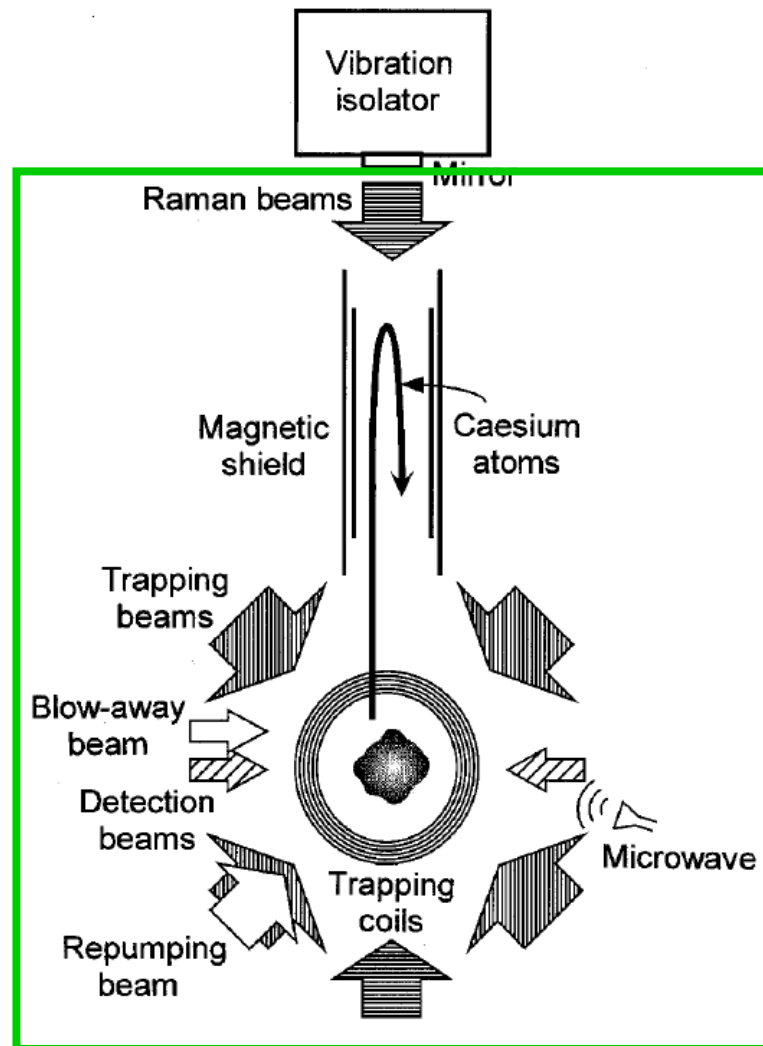
- Stimulierte Raman-Übergänge durch Anregung zweier Diodenlaser

- Bewegung der Atome → Frequenzveränderung durch Dopplereffekt → Ständige Kontrolle

- Detektion durch Fluoreszenz

→ Bestimmung der Anzahl der Atome in

$$|F = 4, m_F = 0\rangle$$



### 3. Experiment – Ergebnisse

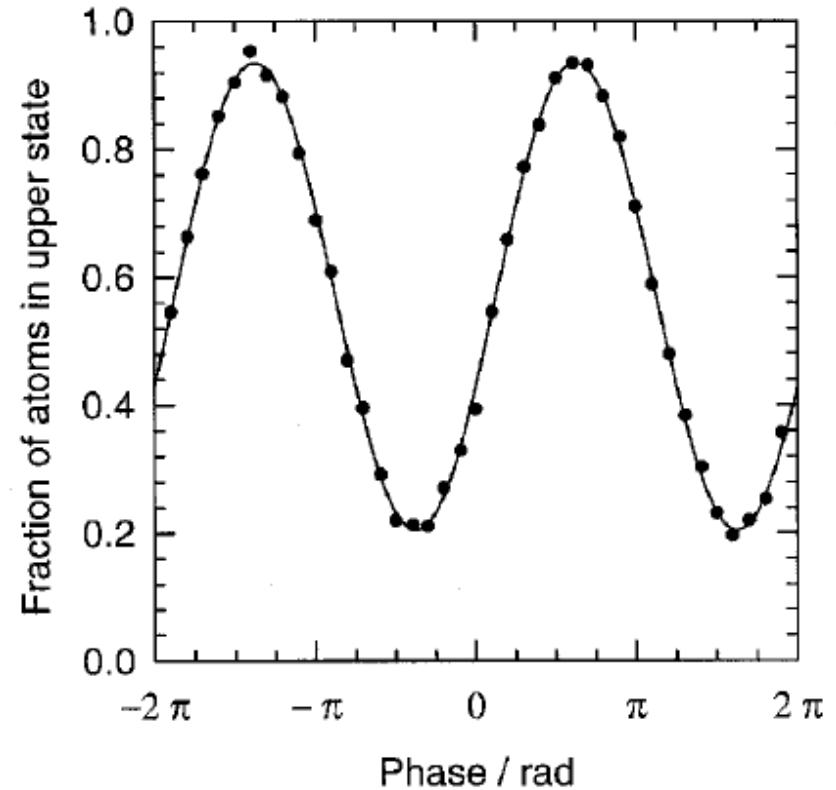
Erinnerung

:

$$\Delta\varphi = k_{\text{eff}} g T^2$$

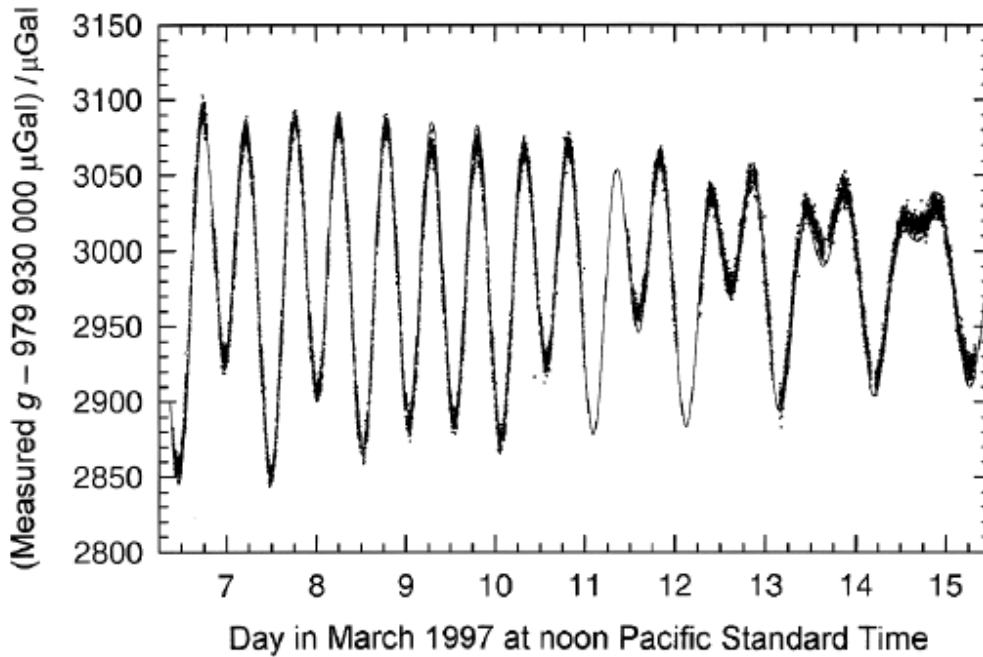
Ergebnisse:

Messzeit $t$	$\Delta g / g$
1.3s	$2 \times 10^{-8}$
1min	$3 \times 10^{-9}$
2d	$1 \times 10^{-10}$



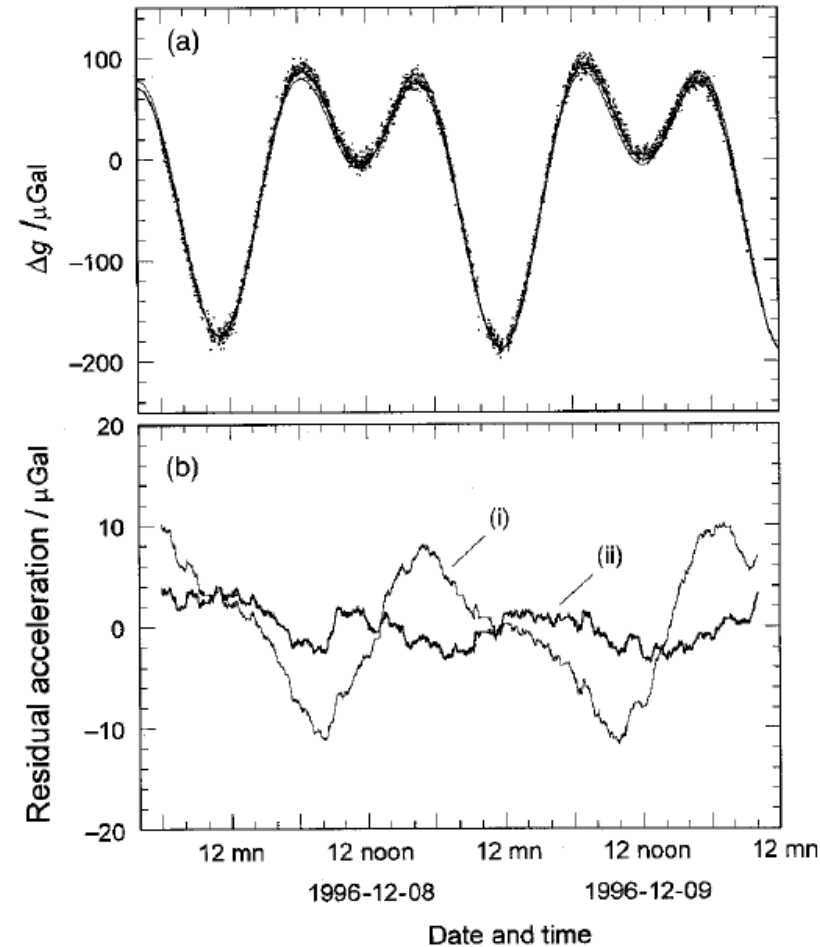
$$T = 140 \text{ms}$$

### 3. Experiment – Langzeitmessungen

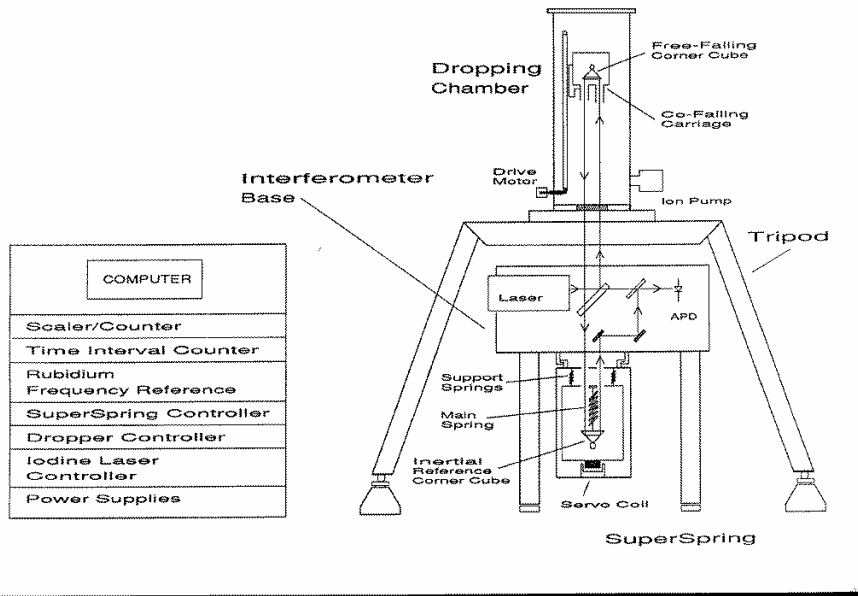


→ Einfluss der Gezeiten → Modell

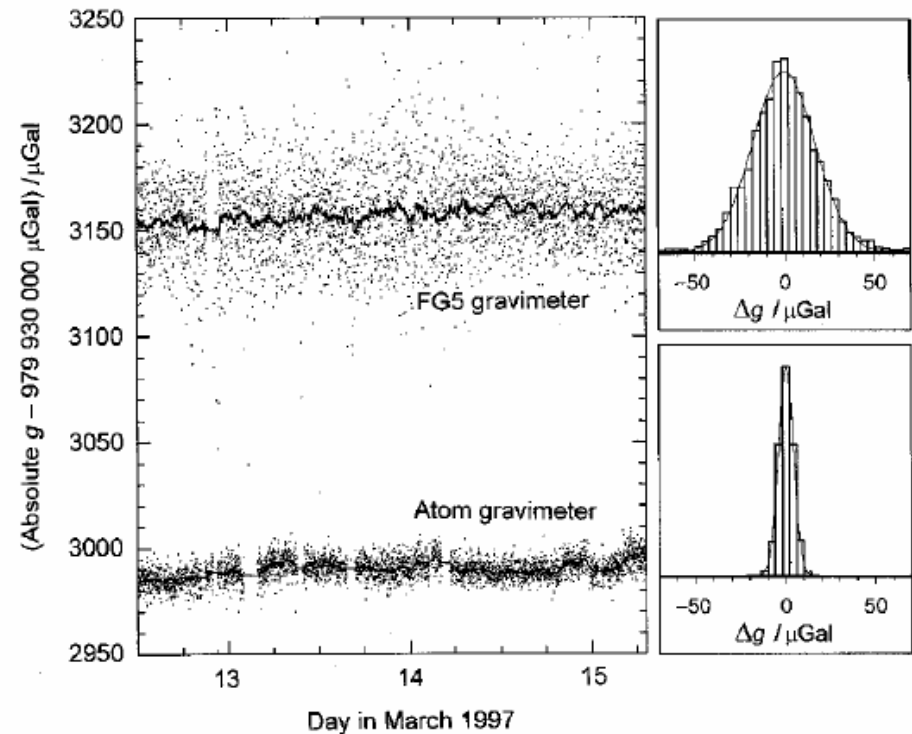
→ Berücksichtigung von “ocean loading”



### 3. Experiment – Vergleich mit Gravimeter



[http://ngs.woc.noaa.gov/GRD/GRAVITY/eos\\_paper/fig\\_2.gif](http://ngs.woc.noaa.gov/GRD/GRAVITY/eos_paper/fig_2.gif)



•unter Berücksichtigung der systematischen Fehler wie

-Corioliskraft

→ Abweichung  $(7 \pm 7) \cdot 10^{-9} g$

-rf Elektronik

A.Peters, K. Y. Chung, S. Chu, High-precision gravity measurements using atom interferometry, Metrologia 38, 25-61 (2001)



**3. Experiment – Äußere Einflüsse auf die Messung**

Object	mass (kg)	distance (m)	gravity ( $\mu\text{Gal}$ )	gradient ( $\mu\text{Gal/m}$ )	angle (deg)	gravity change ( $\mu\text{Gal}$ )
Earth	$6.0 \times 10^{24}$	$6.4 \times 10^6$	$9.8 \times 10^8$	308	0	$9.8 \times 10^8$
Optical table	1000	1.5	3.0	4	0	3.0
Aluminum spacers	1	0.1	0.7	13	0	0.7
Experimental physicist	90	1.0	0.7	1.2	45	0.5
Theoretical physicist	120	3.0	0.1	0.06	0	0.1
Loaded truck	10000	10	2.7	0.5	45	2.0
Physics lecture hall (demolished)	$2.0 \times 10^6$	50	5.0	0.2	90	0.0
Hole (excavated)	$2.0 \times 10^7$	100	13.3	0.3	85	1.3

A.Peters, High-precision gravity measurements using atom interferometry, Ph.D. thesis, Stanford University, 1998



## 4. Zusammenfassung

- Atominterferometer eignet sich zur präzisen Messung von Gravitationsbeschleunigung und Naturkonstanten

- Gravitationsbeschleunigung<sup>1</sup>:  $\Delta g / g = 3 \times 10^{-9}$

- Feinstrukturkonstante<sup>2</sup>:  $\alpha^{-1} = 137.03599945$      $\Delta \alpha / \alpha = 4.5 \times 10^{-9}$

- 4mal kleineres Rauschen gegenüber Gravimeter

<sup>1</sup>A.Peters, K. Y. Chung, S. Chu, High-precision gravity measurements using atom interferometry, Metrologia 38, 25-61 (2001)

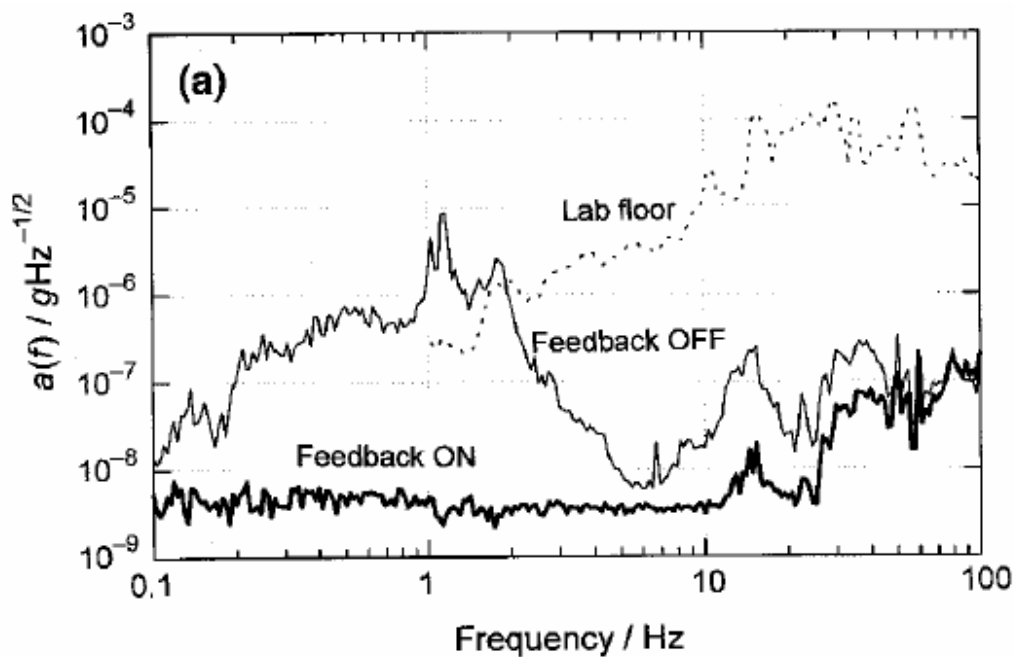
<sup>2</sup>Cadoret et al. , American Physical Society, 39th Annual Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular, and Optical Physics, May 27-31, 2008, abstract #OPQ.50



Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit

### 3. Experiment – Anti-Vibrations-System

#### 3. Anti-Vibrations-System



A.Peters, K. Y. Chung, S. Chu, High-precision gravity measurements using atom interferometry, Metrologia 38, 25-61 (2001)

