

Coherence Theory of Atomic de Broglie Waves and Electromagnetic Near Fields

Carsten Henkel

Habilitation, Potsdam 14. April 2004

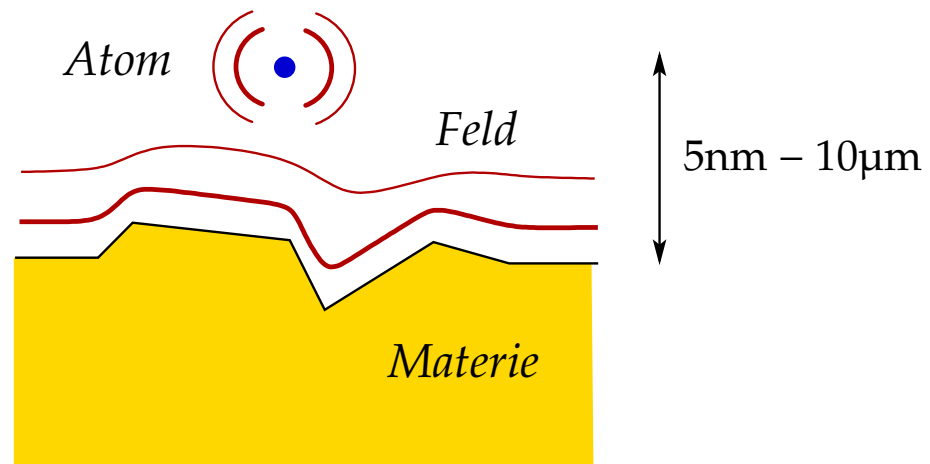
gefördert von:

Deutsche Forschungsgemeinschaft, Europäische Union,
Deutscher Akademischer Austauschdienst



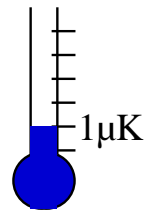
Institut für Physik, Universität Potsdam, Germany
www.quantum.physik.uni-potsdam.de

Typische Situation

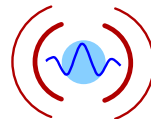


Typische Situation

*integrierte
Atom-Optik*



Atom



Feld

Störung



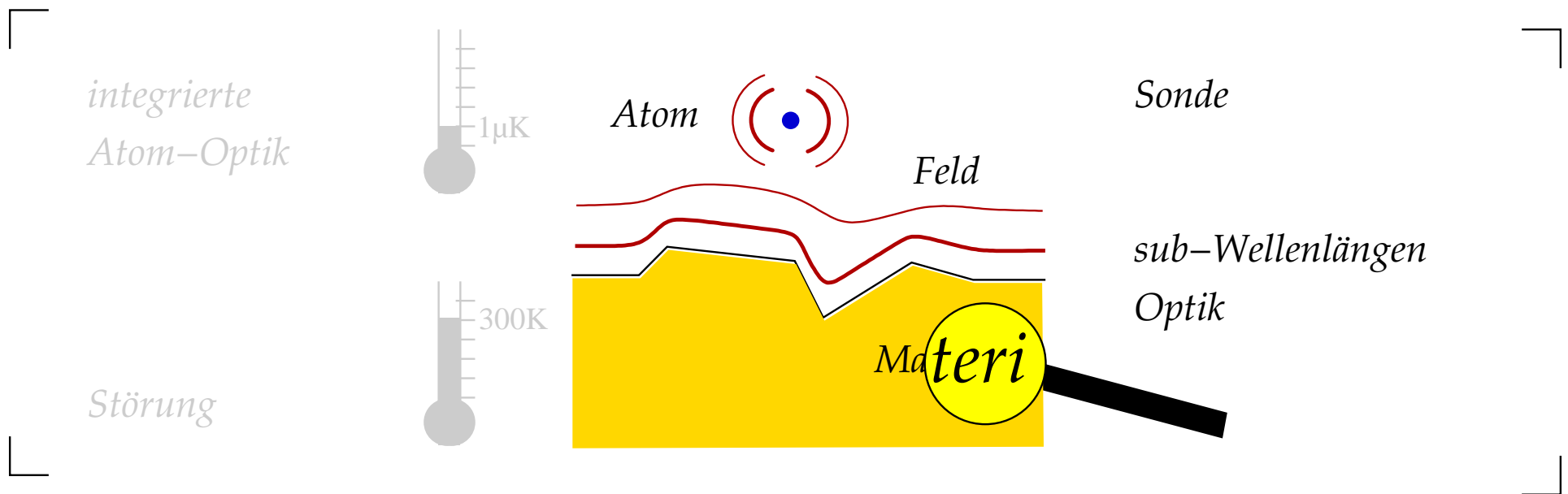
Materie

Herausforderungen

Störung des Atoms durch “heiße” Materie

— Schwarzkörperstrahlung ... im Nahfeld viel zu klein!

Typische Situation



Herausforderungen

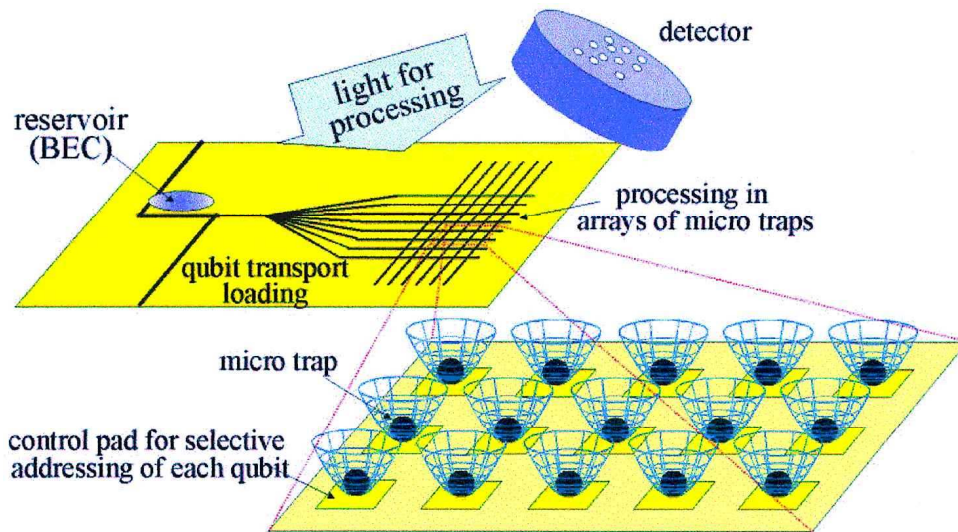
Störung des Atoms durch "heiße" Materie

— Schwarzkörperstrahlung ... im Nahfeld viel zu klein!

optische Vermessung des Substrats mit idealer Punktquelle

— sub- λ Auflösung mit Fernfeld-Fluoreszenz?

Integrierte Atomoptik



Anwendungen:

de Broglie-Wellen-Interferometrie

Quanten-Computer (robust, skalierbar)

- **Ziel:** Atome kohärent manipulieren

Störung durch "heißes" Substrat:

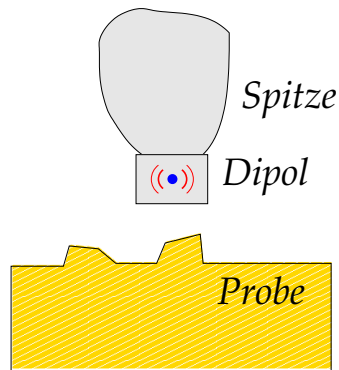
via elektromagnetisches Feld

Vision eines "Atom-Chips":

Gitter aus miniaturisierten Fallen

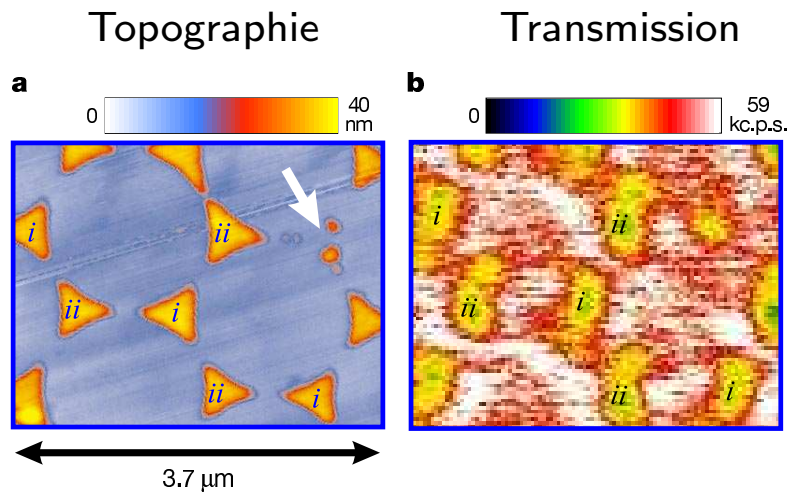
Gruppe J. Schmiedmayer & C.H. (2002).

Höchstauflösende Nahfeld-Optik



Beugungsbegrenzung umgehen:
Atom, Molekül = punktförmige Sonde

optische Eigenschaften: Brechungsindex,
lokales Absorptions-Spektrum



- **Ziel:** nm-Information aus Fluoreszenz-Signal decodieren

Beitrag: Charakterisierung der Abbildung
Substrat-Topographie \mapsto
spontane Zerfallsrate $\Gamma = \Gamma(\mathbf{x})$

Abstand 20 nm, $\lambda = 630$ nm, Al Inseln
Gruppe V. Sandoghdar, *Nature* 405 (2000) 325.

Schlüsselbegriff Kohärenz

Zwei-Niveau-Atom

$$\langle \mathbf{d} \rangle_t = \langle \vec{p} | \mathbf{g} \rangle \langle \mathbf{e} | + \text{h.c.} \rangle_t$$

Superposition

elektromagnetisches Feld

$$\langle E_i(\mathbf{x}, t) E_j(\mathbf{x}', t') \rangle$$

Kohärenz-/Korrelationsfunktion

Materiewelle

$$\langle \psi_g^*(\mathbf{x}, t) \psi_g(\mathbf{x}', t) \rangle$$

Interferenz (Kontrast)

Dynamik: “master equation”

$$\langle \mathbf{d} \rangle_t = \vec{\phi} \rho_{ge}(t) + \text{c.c.}$$

“Dekohärenz”

$$\frac{d\rho_{eg}}{dt} = -\frac{1}{2} (\Gamma_{e \rightarrow g} + \Gamma_{g \rightarrow e}) \rho_{eg} + \dots$$

... = Anregung durch Laserfeld etc.

Übergangs-/Dekohärenzrate

Fermis Goldene Regel

• Kohärenzfunktion

im Nahfeld des Substrats

$$\Gamma_{e \rightarrow g} = \langle e | d_i | g \rangle \langle g | d_j | e \rangle \int_{-\infty}^{+\infty} d\tau \langle E_i(\mathbf{x}, t + \tau) E_j(\mathbf{x}, t) \rangle \exp(i\omega_{eg}\tau)$$

Statistische Beschreibung: "offenes Quantensystem"

$$\langle \mathbf{d} \rangle_t = \vec{\phi} \rho_{ge}(t) + \text{c.c.}$$

$$\langle E_i(\mathbf{x}, t) E_j(\mathbf{x}', t') \rangle$$

quantenmechanisches Mittel

Photonen (Planck-Formel)

Mittelung über Feld-Fluktuationen

Materie: thermische Ladungs-Fluktuationen

- lokale spektrale Dichte, Kohärenzlänge

$$\Gamma_{e \rightarrow g} = \langle e | d_i | g \rangle \langle g | d_j | e \rangle \int_{-\infty}^{+\infty} d\tau \langle E_i(\mathbf{x}, t + \tau) E_j(\mathbf{x}, t) \rangle \exp(i\omega_{eg}\tau)$$

Beiträge im Überblick

Verlustrate durch Spin-Flip-Prozesse

Appl. Phys. B **69** (1999) 379 → Hinds (2003)
Appl. Phys. B **76** (2003) 173 | Cornell (2003)

— Erwärmung in Ionenfallen

Europhys. Lett. **47** (1999) 414

Spontane Zerfallsrate als lokale Sonde

Opt. Commun. **158** (1998) 250

— in photonischen Kristallen/Nanostrukturen

Opt. Express **11** (2003) 1590

Opt. Lett. **28** (2003) 1736.

(De)kohärenz im fluktuierenden Nahfeld

Opt. Commun. **186** (2000) 57

Appl. Phys. B **72** (2001) 73

— eines Bose-Einstein-Kondensats

Phys. Rev. A **69** (2004) 043602

Las. Phys. **14** (2004) im Druck

Strahlungs-Kräfte als Sonde

Eur. Phys. J. D **3** (1998) 129

J. Opt. A **4** (2002) S109

— Casimir-Kraft

Phys. Rev. A **69** (2004) 023808

Übersichtsartikel — Atom-Beugung am Lichtspiegel: *Appl. Phys. B* **69** (1999) 277

— Atom-Chips: *Adv. At. Mol. Opt. Phys.* **48** (2002) 263

— Quantenoptik in photonischen Strukturen: in *Photonic Crystals* (Wiley-VCH 2004)

— Elektromagnetisches Rauschen auf der nm-Skala: in *Handbook Theor. Comp. Nanotechnology*, eingereicht (2003)

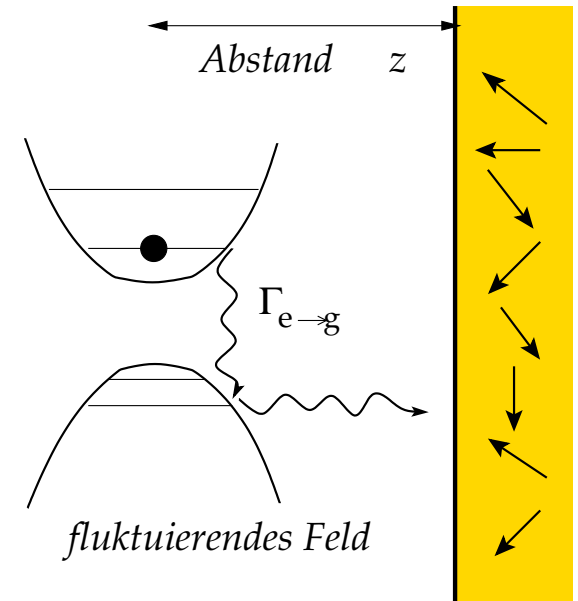
Spin-Flip-Rate im Nahfeld

Spin = Sonde für Korrelations-Spektrum

$$\Gamma_{e \rightarrow g} \propto \int d\tau \langle B_i(\mathbf{x}, t + \tau) B_j(\mathbf{x}, t) \rangle \exp(i\omega_{eg}\tau)$$

$$= \frac{2\hbar}{1 - e^{-\beta\hbar\omega_{eg}}} \text{Im} H_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{x}; \omega_{eg})$$

↑ Fluktuations-Dissipations-Theorem



- Planck-Formel verschwindet gegenüber Oberflächenbeitrag

Materie bei 300 K

Asymptotik des Green-Tensors im Nahfeld

$$\frac{\text{Im} H_{ij}^{(\text{nf})}(\mathbf{x}, \mathbf{x}; \omega)}{\text{Im} H_{ij}^{(\text{vac})}(\omega)} \approx \frac{3\pi}{16} \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} \frac{\delta_{ij} + \hat{n}_i \hat{n}_j}{\delta_{ij}} \begin{cases} \frac{\lambda}{z} & z \ll \delta(\omega) \\ \frac{3\delta^3 \lambda}{2z^4} & \delta(\omega) \ll z \ll \lambda \end{cases}$$

metallische Oberfläche $\sigma \gg \varepsilon_0 \omega$, Abstand $z \ll \lambda$, Normale \mathbf{n} , Skintiefe $\delta/\lambda = (\varepsilon_0 \omega / 2\pi^2 \sigma)^{1/2}$

konsistent mit Varpula & Poutanen (1984)

Experiment: Verluste in Magnetfalle

selektiver Einschluss für $\mu \uparrow \downarrow \mathbf{B}$

Spin Flip \rightarrow nicht gefangener Zustand

transversale Fluktuationen an der Larmorfrequenz

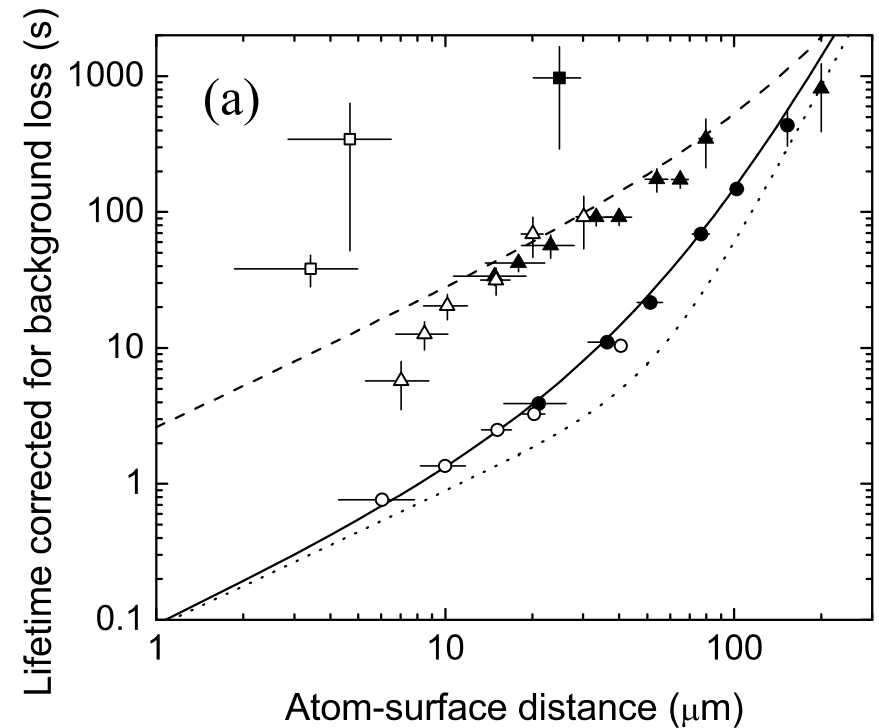
- Vorhersage bestätigt

Appl. Phys. B 69 (1999) 379; 76 (2003) 173

Erwärmung: *Europhys. Lett.* 47 (1999) 414

review: *Adv. At. Mol. Opt. Phys.* 48 (2002) 263

Stromrauschen: Gruppe Chr. Bruder (2003)



Lebensdauer in Mikrofalle vs. Abstand

Linien: *ab initio* Theorie (Cu, Ti Oberfläche)

Datenpunkte: Gruppe E. Cornell (2003)

Spontaner Zerfall im Nahfeld

$\Gamma_{e \rightarrow g}(\mathbf{x})$: Abbildung von Topographie und Brechungsindex

Frequenzverschiebung (---),
Dipol-Orientierung

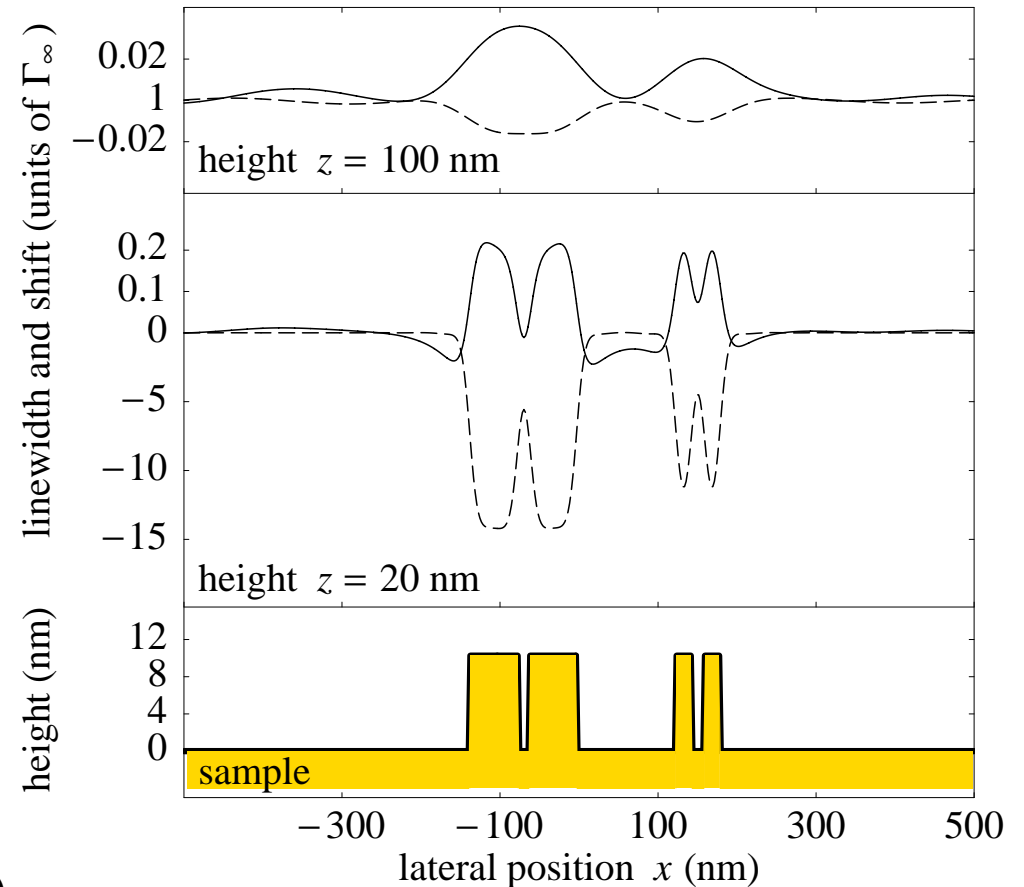
- analytische Transferfunktion \Rightarrow
laterale Auflösung = Abstand

Opt. Commun. 158 (1998) 250

ähnliches Modell: Gruppe D. Van Labeke (1999)

Numerik (Dipol in sub- λ Teilchen):

Opt. Lett. 28 (2003) 1736



Zerfallsrate $\Gamma_{e \rightarrow g} = \Gamma_{\text{flach}}(z) + \Gamma(x, z)$

$\lambda = 628$ nm, Dipolmoment \uparrow

Optische Kräfte in thermischen Feldern

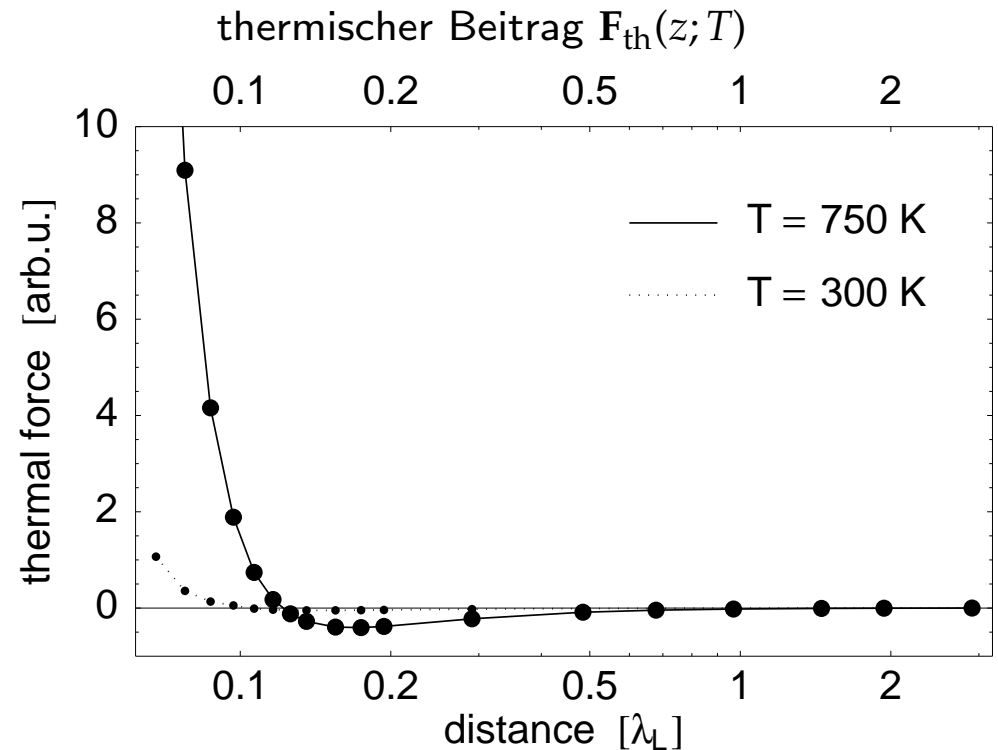
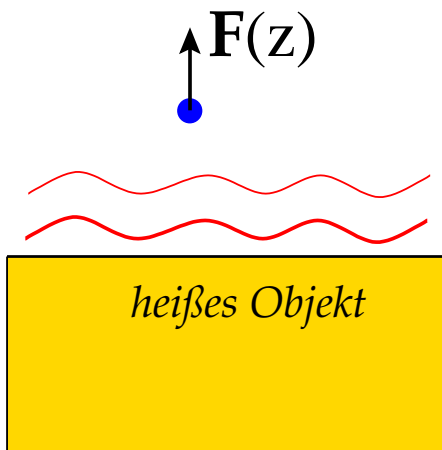
Dipol vor "heißer" Oberfläche

$$\begin{aligned} \mathbf{F}(\mathbf{x}) &= \langle d_i \nabla E_i(\mathbf{x}) \rangle_T \\ &= \mathbf{F}_{\text{vdW}}(\mathbf{x}) + \mathbf{F}_{\text{th}}(\mathbf{x}; T) \end{aligned}$$

Absorption & Dispersion,
Polariton-Resonanzen

Vorzeichenwechsel

μm -Abstand: \sim Schwerkraft



$\lambda_L = 10.3 \mu\text{m}$, SiC Nanoteilchen + Substrat

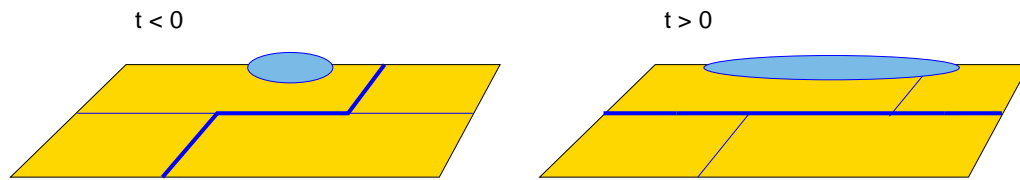
J. Opt. A 4 (2002) S109

Casimirkraft =

Anziehung zwischen Oberflächen-Polaritonen:

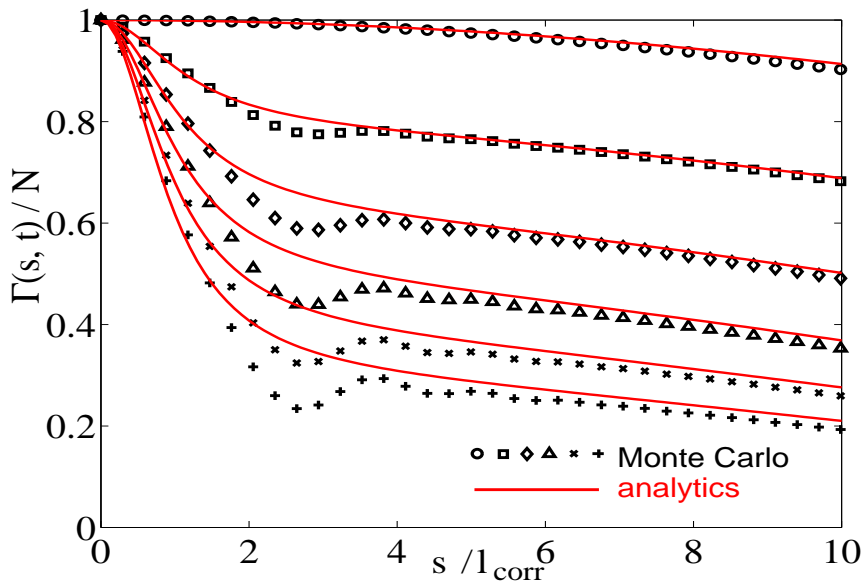
Phys. Rev. A 69 (2003) 023808.

Dekohärenz in fluktuierenden Feldern



räumliche Kohärenzfunktion

$$\Gamma(s, t) = \langle \langle \psi^*(x, t) \psi(x + s, t) \rangle \rangle_V \rangle_x$$



$$i\hbar\partial_t\psi = -\frac{\hbar^2}{2m}\partial_x^2\psi + V(x, t)\psi + g|\psi(x, t)|^2\psi$$

zeitabhängiges Zufallspotential

Bose-Kondensat: Wechselwirkung

analytische Lösung vs. Simulation

- Nichtlinearität reduziert Dekohärenz

Appl. Phys. B **76** (2003) 173

Phys. Rev. A **69** (2004) 043602

ideales Gas: *Appl. Phys. B* **72** (2001) 73

konsistent mit Jayannavar & Kumar (1982)

Schlussfolgerungen

Auflösung in Nahfeld-Optik:

geometrisch, nicht von Beugung begrenzt

— dto. räumliche Kohärenz

magnetische Fluktuationen in integrierter Atom-Optik:

Spin-Flip-Verluste quantitativ nachgewiesen

— metallisches Material vermeiden!

Quanten-/thermische Fluktuationen im Nahfeld:

Atome sind empfindliche Sonden

weitgehende Charakterisierung

— auch für lokales thermodyn. Gleichgewicht

Herzlichen Dank an ...

Studenten

S. Pötting, L. Rogobete, G. Boedecker, A. Negretti, Bo Zhang,
S. Clodong, A. Jacob, D. Blischke, A. Friedenauer

Lehrer und Kollegen

A. Aspect (Orsay), C. Cohen-Tannoudji (Paris), J. Eisert (Potsdam),
R. Folman (Beer Sheva), J.-J. Greffet (Paris), R. Kaiser (Nice),
P. Meystre (Tucson), K. Mølmer (Aarhus), L. Novotny (Rochester),
V. Sandoghdar (Zürich), J. Schmiedmayer (Heidelberg),
R. Spreeuw (Amsterdam), F. Sols (Madrid), P. Tombesi (Camerino),
J. Weiner (Toulouse), D.-G. Welsch (Jena), M. Wilkens (Potsdam)

Laufende Projekte

DFG Schwerpunktprogramm “Photonische Kristalle”

— “Photonic Crystal Quantum Optics”

EU Programm IST “Future & Emerging Technologies”

— “Atom Chip Quantum Processor” (ACQP)

EU Programm HPRN

— “Field Atom Surface Interactions Training Network” (FASTNet)

EU Programm STREP

— “Quantum Computation with Trapped Electrons” (QUELE)

DAAD dt.-frz. Programm “Procope”

— “Thermische Strahlung, Van der Waals-Kräfte und Molekülfluoreszenz”