

Interferenz makroskopischer Objekte

Auf der Suche nach der Grenze zwischen der Quanten- und der klassischen Welt

Erstellt von:

Katja Hagemann
Humboldt-Universität zu Berlin
28.09.2009

Erstellt für:

Seminar
„Grundlagen der Quantenphysik“



I.

Ausgangssituation und Motivation

II.

Experimente

II. 1

Interferenz mit C_{60} Molekülen

II. 2

Dekohärenz durch thermische Emission

IV.

Zusammenfassung und Ausblick

Ausgangssituation



Elektronen, Neutronen, Atomen, kleine Moleküle



Gewehrketeln, Fußballle, Lebewesen etc.

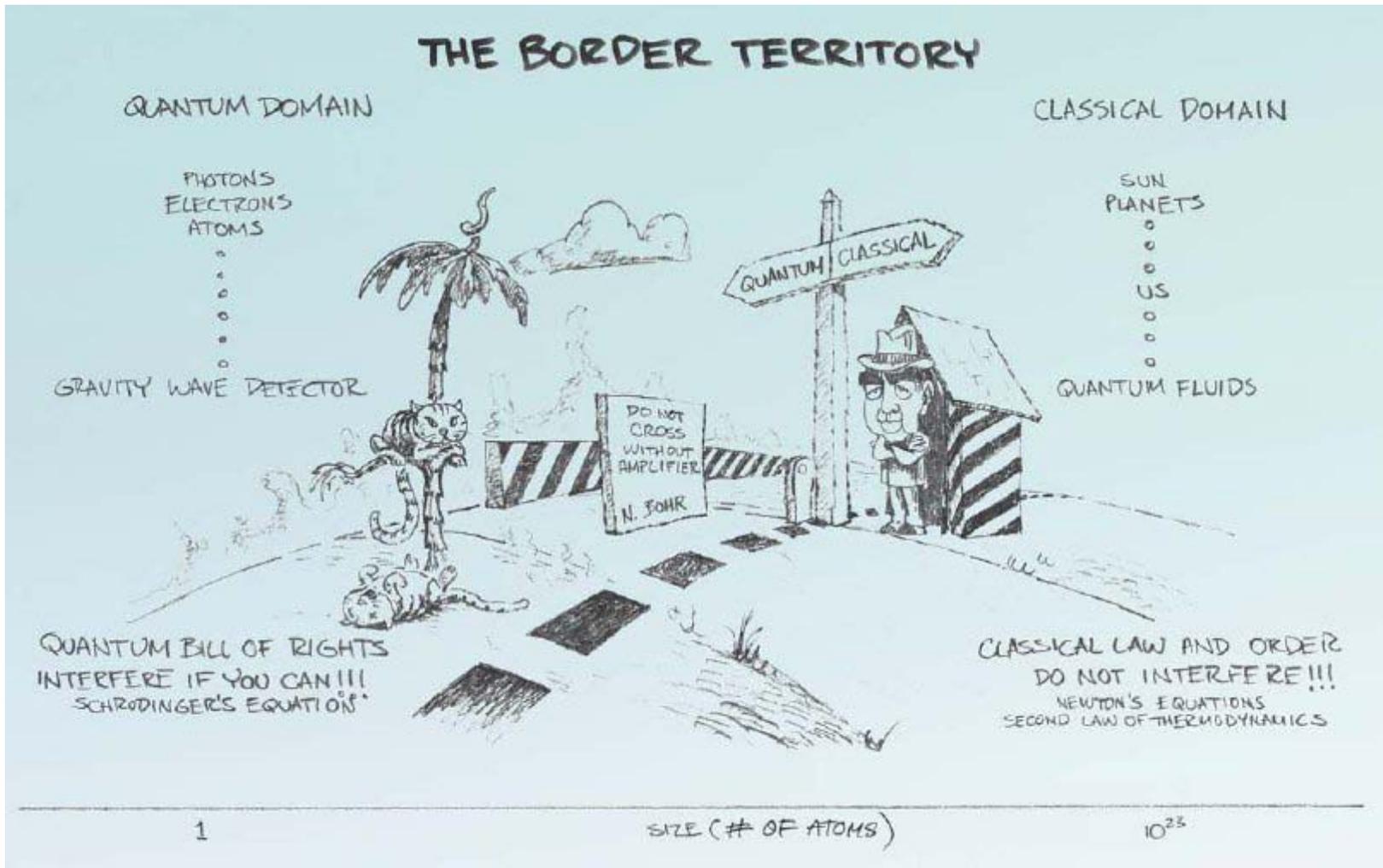
Quelle: M. Arndt, K. Hornberger Summer School: „Quantum interferometry with complex molecules“

Ausgangssituation
und Motivation

Interferenz mit
Fullerenen

Dekohärenz durch
thermische Emission

Zusammenfassung
und Ausblick



Quelle: Zurek, „Decoherence and the transition from quantum to classical – REVISITED“, Phys. Today , 44 (1991) 36.

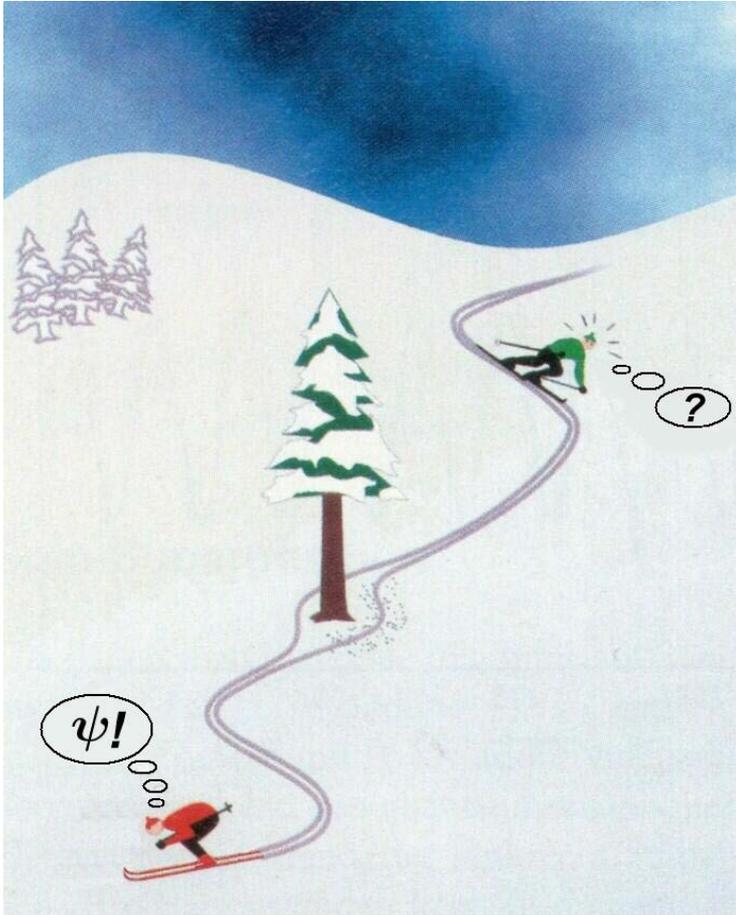
Ausgangssituation
und Motivation

Interferenz mit
Fullerenen

Dekohärenz durch
thermische Emission

Zusammenfassung
und Ausblick

Motivation für weitergehende Experimente



- Gültigkeit der Quantenmechanik für alle Größen-, Massen- und Komplexitätsskalen?
- Kann die Quantenmechanik alle Phänomene beschreiben?
- Objektive Grenze?
- Verlust des Quantenverhaltens durch Wechselwirkung mit Umwelt?

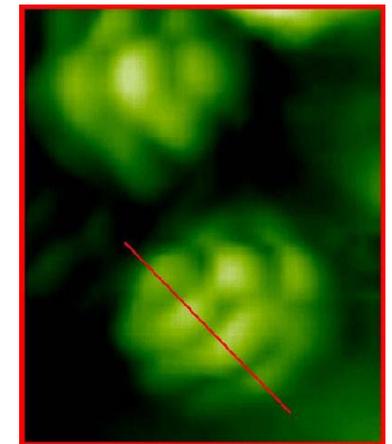
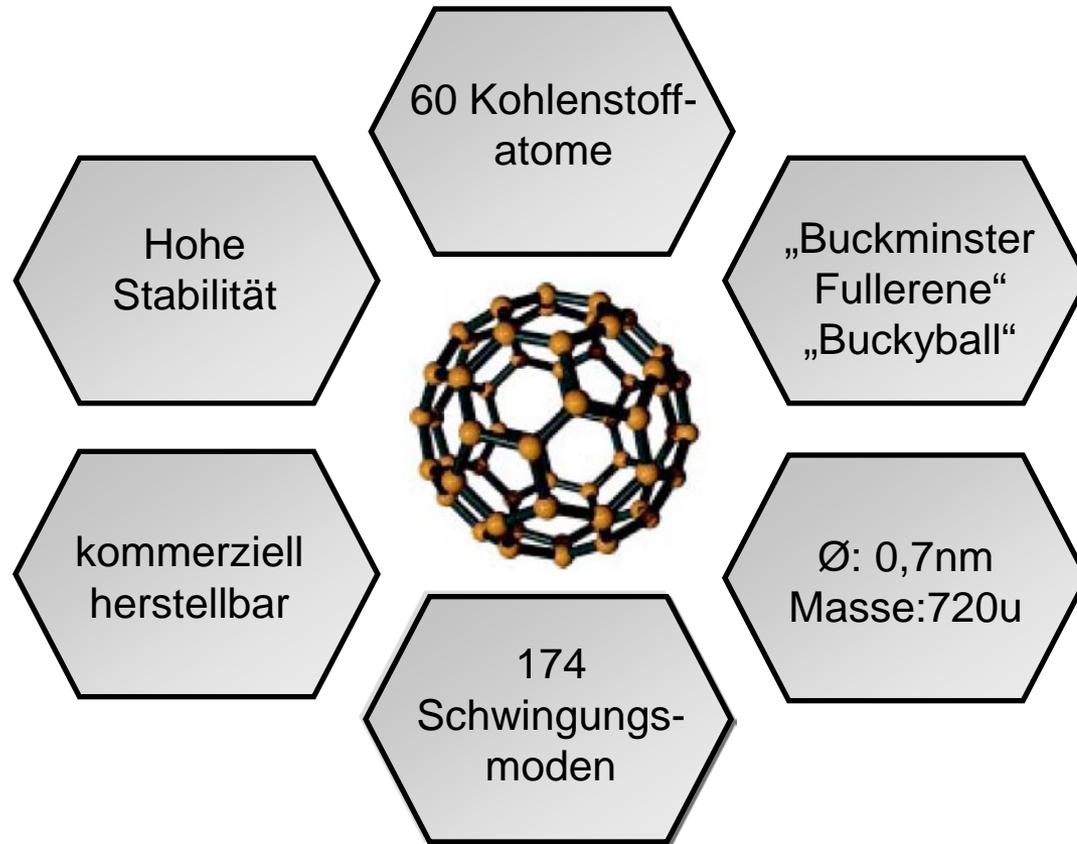
Quelle: M. Arndt, K. Hornberger Summer School: „Quantum interferometry with complex molecules“

Ausgangssituation
und Motivation

Interferenz mit
Fullerenen

Dekohärenz durch
thermische Emission

Zusammenfassung
und Ausblick



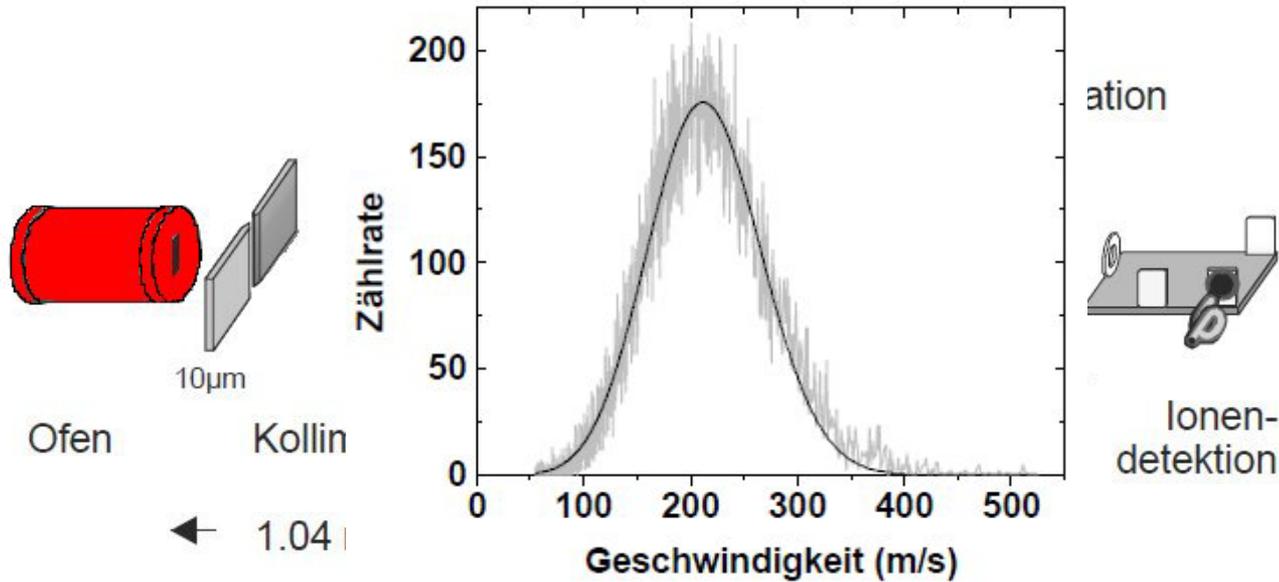
Quelle: M. Arndt et al. „Wave-particle duality of C₆₀ molecules“ Nature 401, 680-682(1999)

Ausgangssituation
und Motivation

Interferenz mit
Fullerenen

Dekohärenz durch
thermische Emission

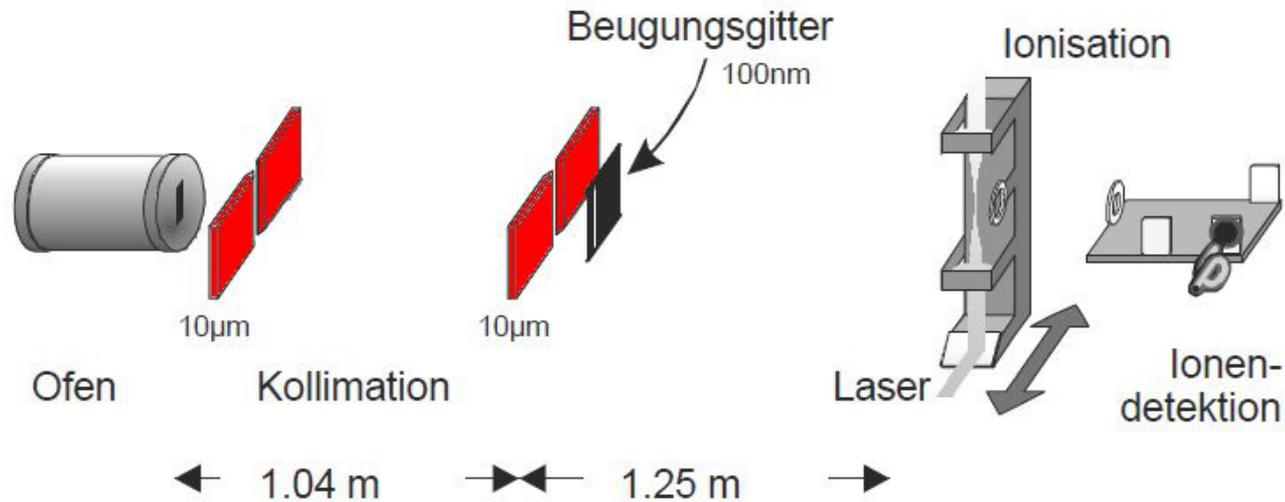
Zusammenfassung
und Ausblick



Ofen

- 900 – 1000 K heiß
- sublimiert Fullerene, statistisch verteilter Ausstoß („one-by-one“)
- wahrscheinlichste Geschwindigkeit: $v = 220 \frac{m}{s} \Rightarrow \lambda_{dB} = \frac{h}{mv} = 2,5 \text{ pm}$

Quelle: M. Arndt et al. „Wave-particle duality of C60 molecules“ Nature 401, 680-682(1999)



Kollimation

- Räumliche Kohärenz erhöhen
- ABER: Verlust von Intensität

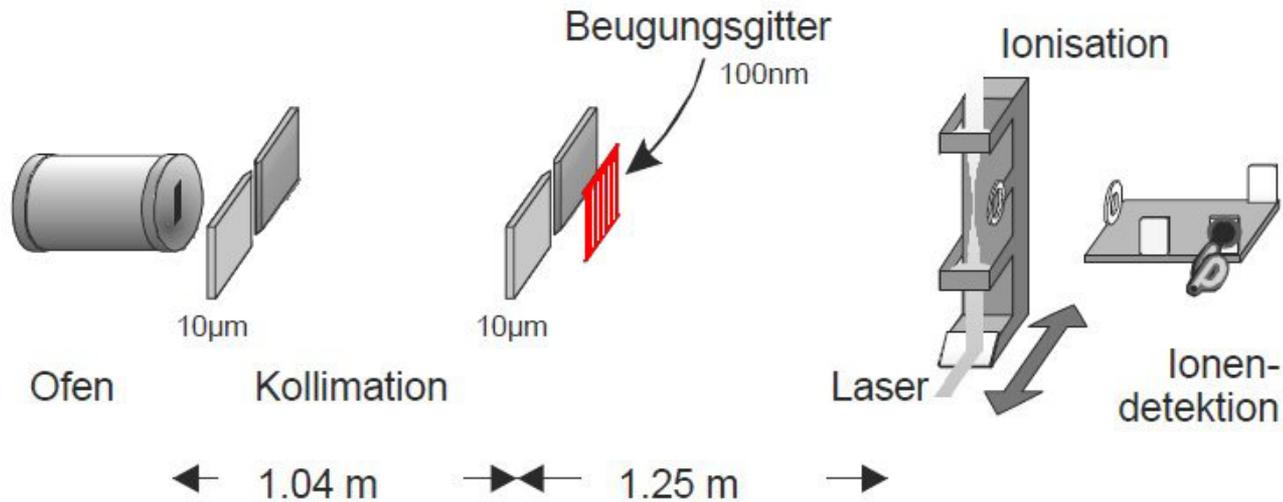
Quelle: M. Arndt et al. „Wave-particle duality of C₆₀ molecules“ Nature 401, 680-682(1999)

Ausgangssituation
und Motivation

Interferenz mit
Fullerenen

Dekohärenz durch
thermische Emission

Zusammenfassung
und Ausblick



Beugungsgitter

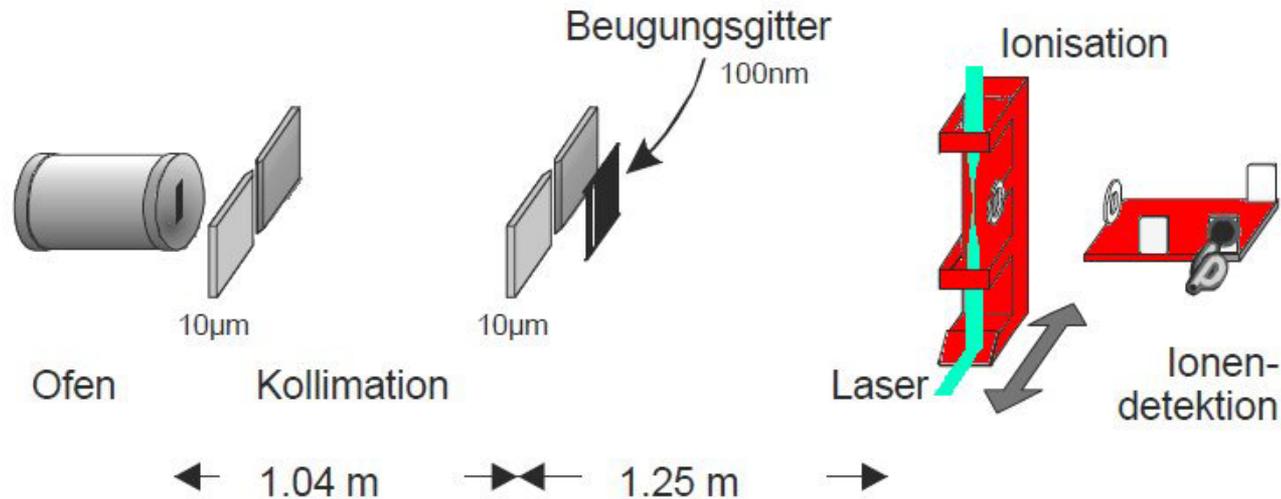
- SiN Gitter
- Spaltbreite: $55 \pm 5 \text{ nm}$
- Gitterkonstante: 100 nm
- Dicke: 200 nm

Schwierig
herstellbar

1. Beugungsordnung: $\theta \approx \frac{\lambda}{d} = 25 \mu\text{rad}$

Abstand der Peaks: $L \cdot \theta = 31 \mu\text{m}$

Quelle: M. Arndt et al. „Wave-particle duality of C60 molecules“ Nature 401, 680-682(1999)

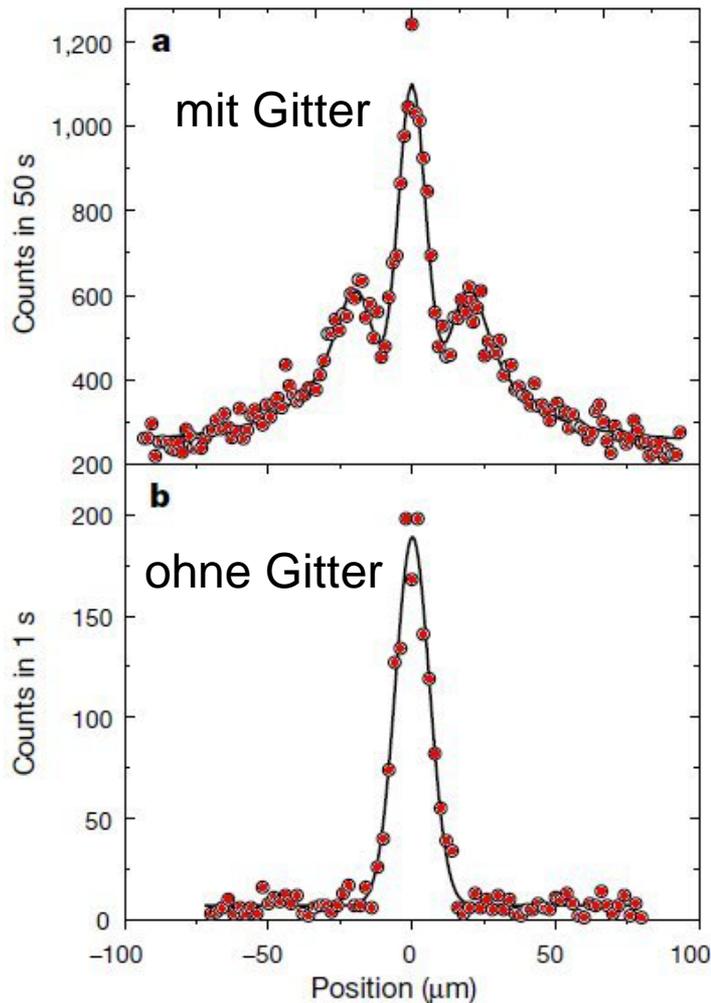


Detektion

- Argon-Ionen-Laser, fokussiert auf 8µm Strahltaile
- C_{60} auf 3000K aufgeheizt durch absorbiertes Licht \Rightarrow Emission eines Elektrons
- Nachbeschleunigung bis Konverterplatte \Rightarrow Elektronen herausgelöst
- 10% Effizienz + keine Detektion des Restgases

Quelle: M. Arndt et al. „Wave-particle duality of C60 molecules“ Nature 401, 680-682(1999)

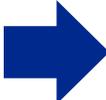
Resultate



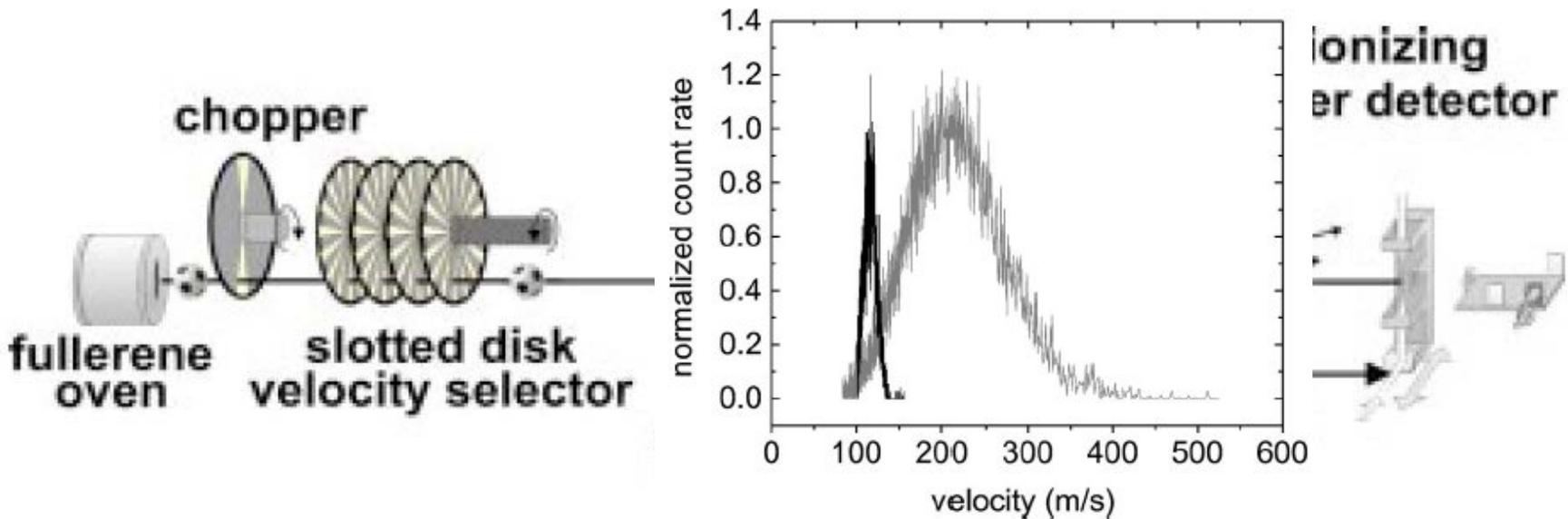
- erkennbar: zentrales Maximum und 1. Beugungsordnung
- Fit liefert Spaltbreite von 38nm
Interpretation: Van-der-Waals-Kräfte
- Jedes C_{60} Molekül interferiert mit sich selbst

Quelle: M. Arndt et al. „Wave-particle duality of C60 molecules“ Nature 401, 680-682(1999)

Schwierigkeiten

- $m \uparrow \Rightarrow \lambda_{dB} \downarrow \Leftrightarrow$ Beugungswinkel sehr klein (Auflösungsprobleme)
- Ausrichtung des Teilchenstrahls  Blendenöffnungen beweglich
- Stöße mit Umgebung  Hochvakuum : $5 \cdot 10^{-7}$ mbar
- Räumlicher Drift  Vakuumkammer fest montiert auf optischer Bank
- Geschwindigkeitsverteilung liefert  Verbesserung 2003
mit $\frac{\Delta v}{v} = 0,6$ longitudinale Kohärenz von 5pm

Quelle: M. Arndt et al. „Wave-particle duality of C60 molecules“ Nature 401, 680-682(1999)

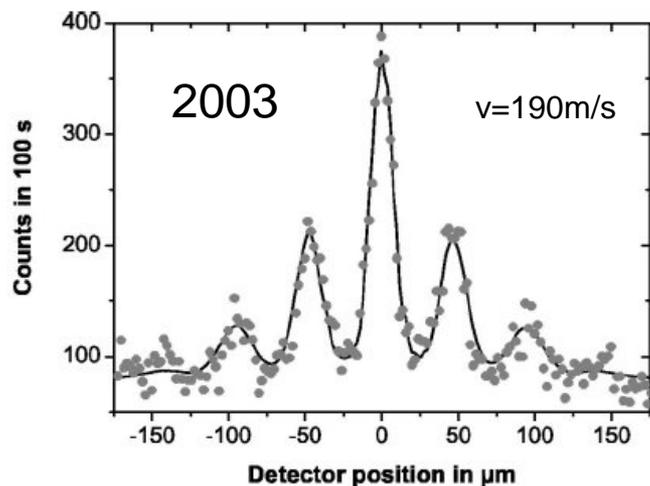
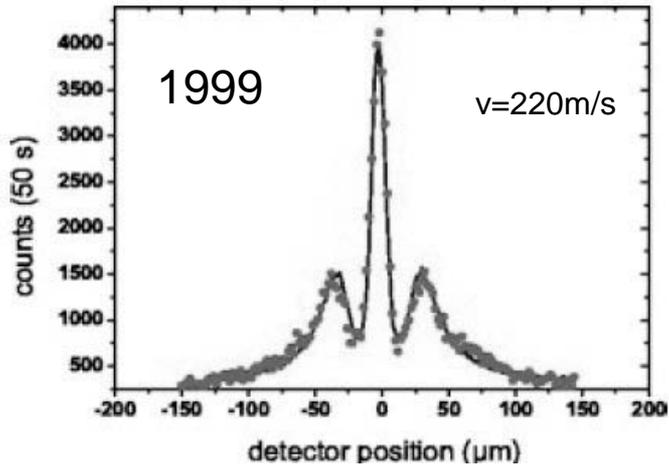


Geschwindigkeitsselektion

- 4 geschlitzte, rotierende Scheiben (gemeinsame Achse)
- Halbwertsbreite: $\frac{\Delta v}{v} = 0,17 \Rightarrow$ Erhöhung der longitudinalen Kohärenz \Rightarrow mehr Beugungsordnungen
- Geringe Geschwindigkeit selektierbar \Rightarrow größerer Abstand zw. Ordnungen

Quelle: M. Arndt et al. „Quantum interference experiments with large molecules“ Am. J. Phys. A, 319 (2003)

Verbesserte Resultate

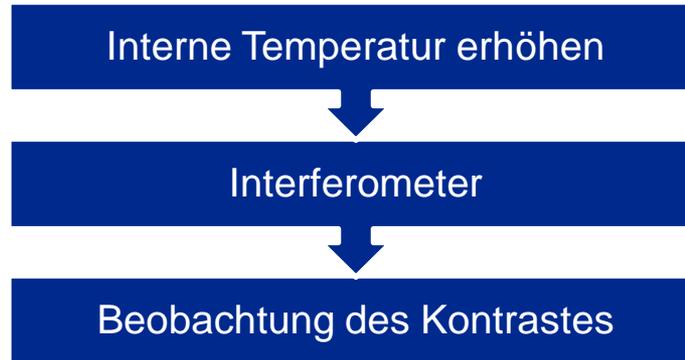


- mehr Beugungsordnungen
 - größere Separation
 - Reduzierung der Spaltbreite:
 - 20nm für nicht selektierte Moleküle
 - 30nm für langsamere Moleküle
- ➔ längerer Aufenthalt und damit größerer Einfluss der Van-der-Waals-Kräfte

Quelle: M. Arndt et al. „Quantum interference experiments with large molecules“ Am. J. Phys. A, 319 (2003)

Dekohärenz durch thermische Strahlung

▪ Grundidee:

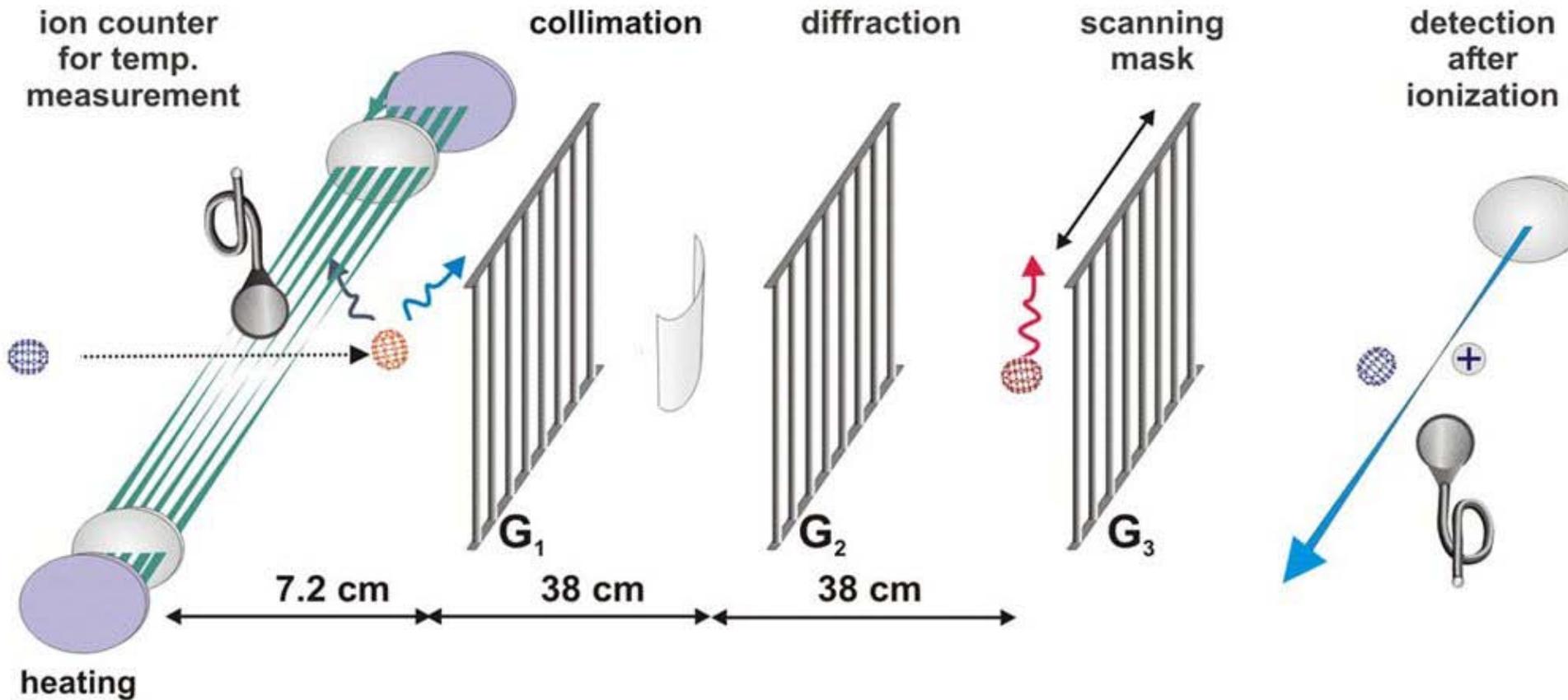


$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

- Ziel: Darstellung des Kontrastes in Abhängigkeit der inneren Temperatur
- Hintergrund: Aufzeigen eines fundamentalen Dekohärenzprozesses
- Ausnutzen des Talbot-Effektes
 - Selbstabbildungsphänomen einer periodische Struktur
 - Bild des Gitters in diskreten Abständen rekonstruiert (Talbot-Länge)

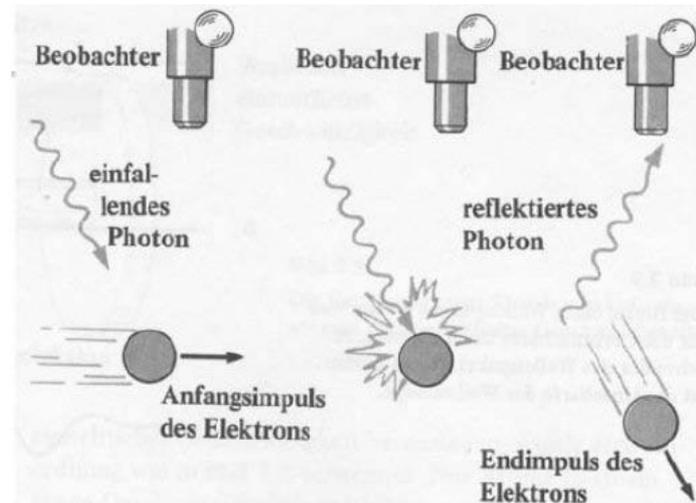
$$L_T = \frac{d^2}{\lambda_{dB}}$$

Quelle: Hackermüller et al. „Decoherence of matter waves by thermal emission of radiation“, Nature 427,711-714 (2004)



Quelle: Hackermüller et al. „Decoherence of matter waves by thermal emission of radiation“, Nature 427,711-714 (2004)

Feynmans "Elektronenbeleuchtung" – kurzer Einschub



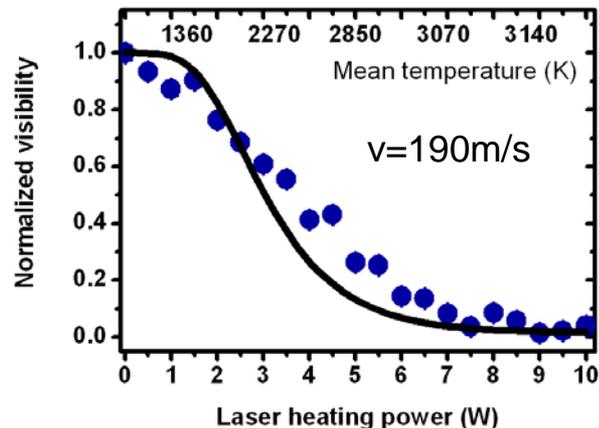
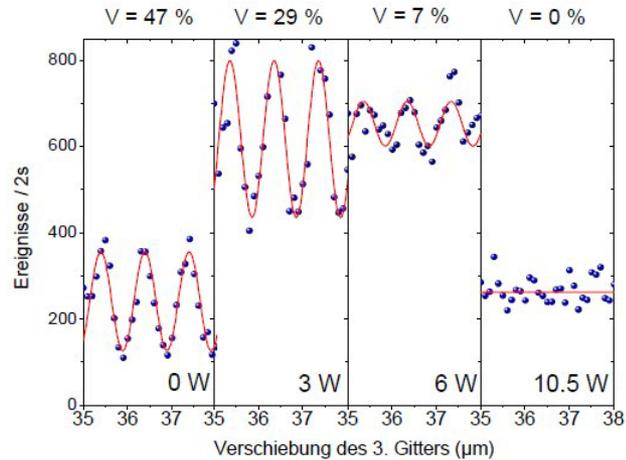
- Um Interferenz noch beobachten zu können, muss die Wellenlänge des Photons größer sein, als der Spaltabstand:

$$\Rightarrow \lambda_{\text{Photon}} > d$$

- Allerdings: Keine Weg-Information

Quelle: Prof. Andreas Wallraff http://www.qudev.ethz.ch/phys4/phys4_fs08/phys4_L08_v1.pdf

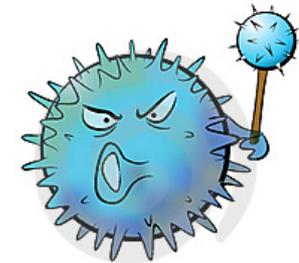
Resultate



- Kontrast nimmt monoton mit Laserleistung ab
 - Erhöhte Wahrscheinlichkeit für die Emission von Photonen mit Weginformation

Quelle: Hackermüller et al. „Decoherence of matter waves by thermal emission of radiation“, Nature 427,711-714 (2004)

- Fundamentale Fragen bis heute nicht geklärt
- Interferenz mit komplexen Molekülen möglich, wenn auch technisch aufwendig
- Ironie der Natur: Wärmestrahlung
 1. Anlass für Erfindung der Quantenhypothese vor fast 100 Jahren
 2. Möglicher Grund für das Verschwinden des Quantenverhalten bei größeren Molekülen
- Ausblick:
 - Interferenz mit kleinen Viren technisch möglich



Quelle: Pressemitteilung: http://www.quantum.at/uploads/media/presseinformation_matter_waves.pdf



Vielen Dank für eure Aufmerksamkeit !

Gibt es Fragen?

- Titelfolie: 1. Bild: <http://www.iop.org/EJ/mmedia/1367-2630/7/1/224/animation.gif>
3. Bild: http://home.arcor.de/m_enning/leben/graphik/dspalt.jpg
- 4.Folie: Skifahrer: ww.hmi.de/bereiche/SF/SF7/PANS/images/dual/Ski_Interferenz.jpg
- 5.Folie: Gebäude: <http://www.arqhys.com/contenidos/Richard-Buckminster-Fuller.jpg>
Rasteraufnahme: <http://www.quantenphysik-schule.de/fullerene.htm>
- 18.Folie: Virus: thumbs.dreamstime.com/thumb_173/1186472032Q9jqgV.jpg