



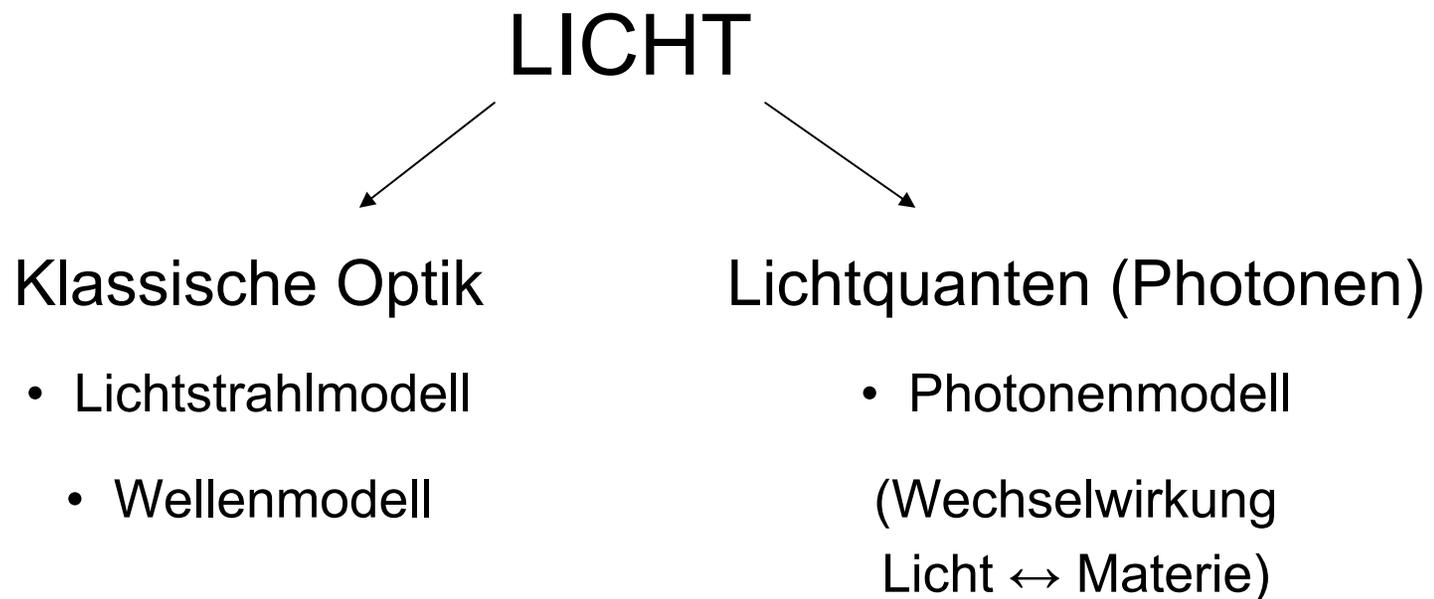
Schlüsselexperimente der Quantenphysik

Das Zeigermodell

Inhalt

- Optik
 - Problemstellung
 - Zeiger
- Quantenmechanik
 - Problemstellung
 - Zeiger
- Interferenz von C_{60} -Molekülen
- Interferenz von Bose-Einstein-Kondensaten

Optik – Eine Übersicht

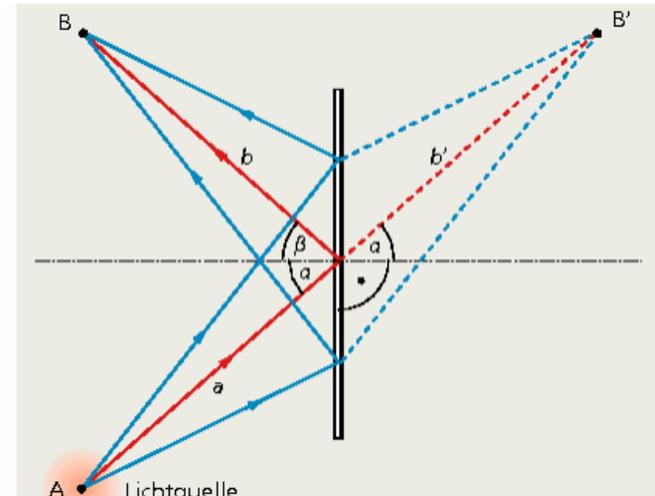


⇒ „Konkurrierende“ Modelle

Verschiedene Modelle des Lichts

Lichtstrahlmodell

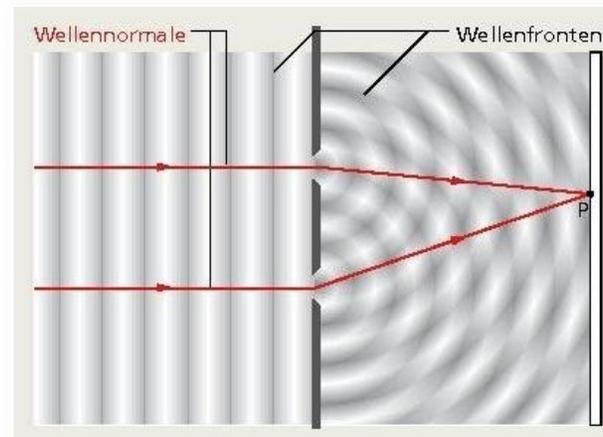
- Fermat'sches Prinzip
- Reflexion
- Brechung



Reflexion [1]

Wellenmodell

- Interferenz
- Beugung



Wellenfronten [1]

Photonenmodell

- Photo-Effekt

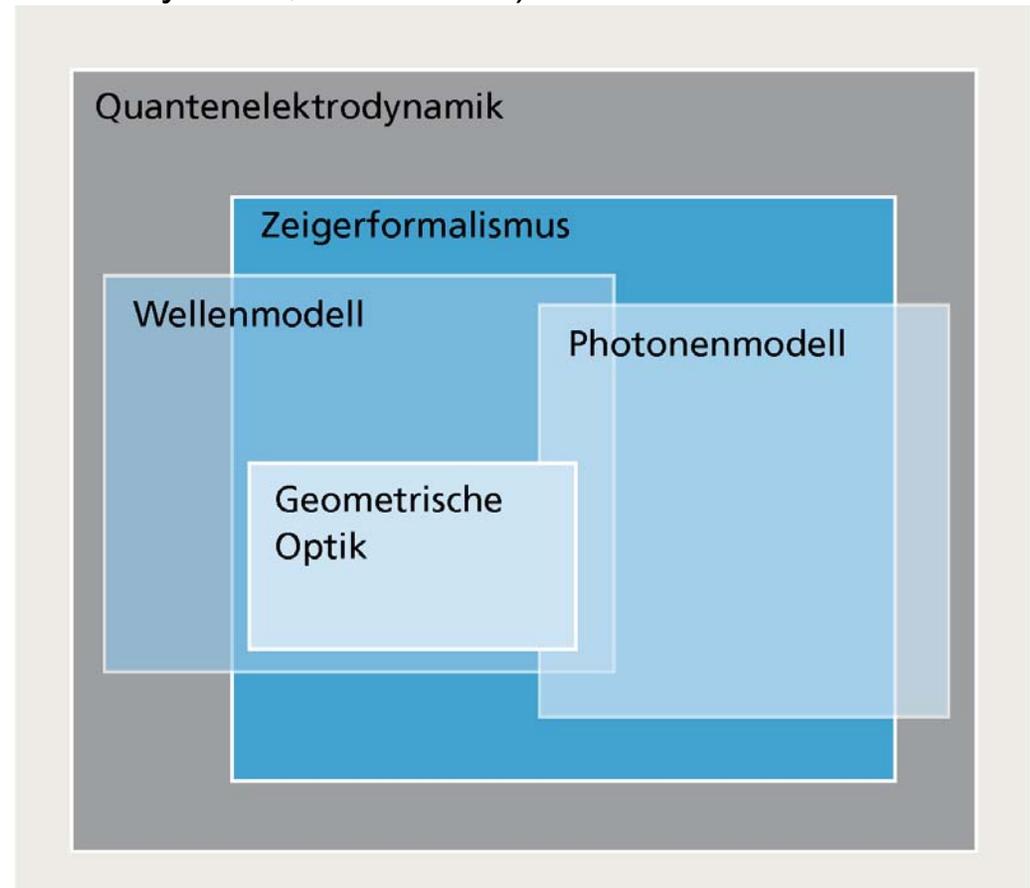
Modelle in der Übersicht

- Abstraktes Modell:

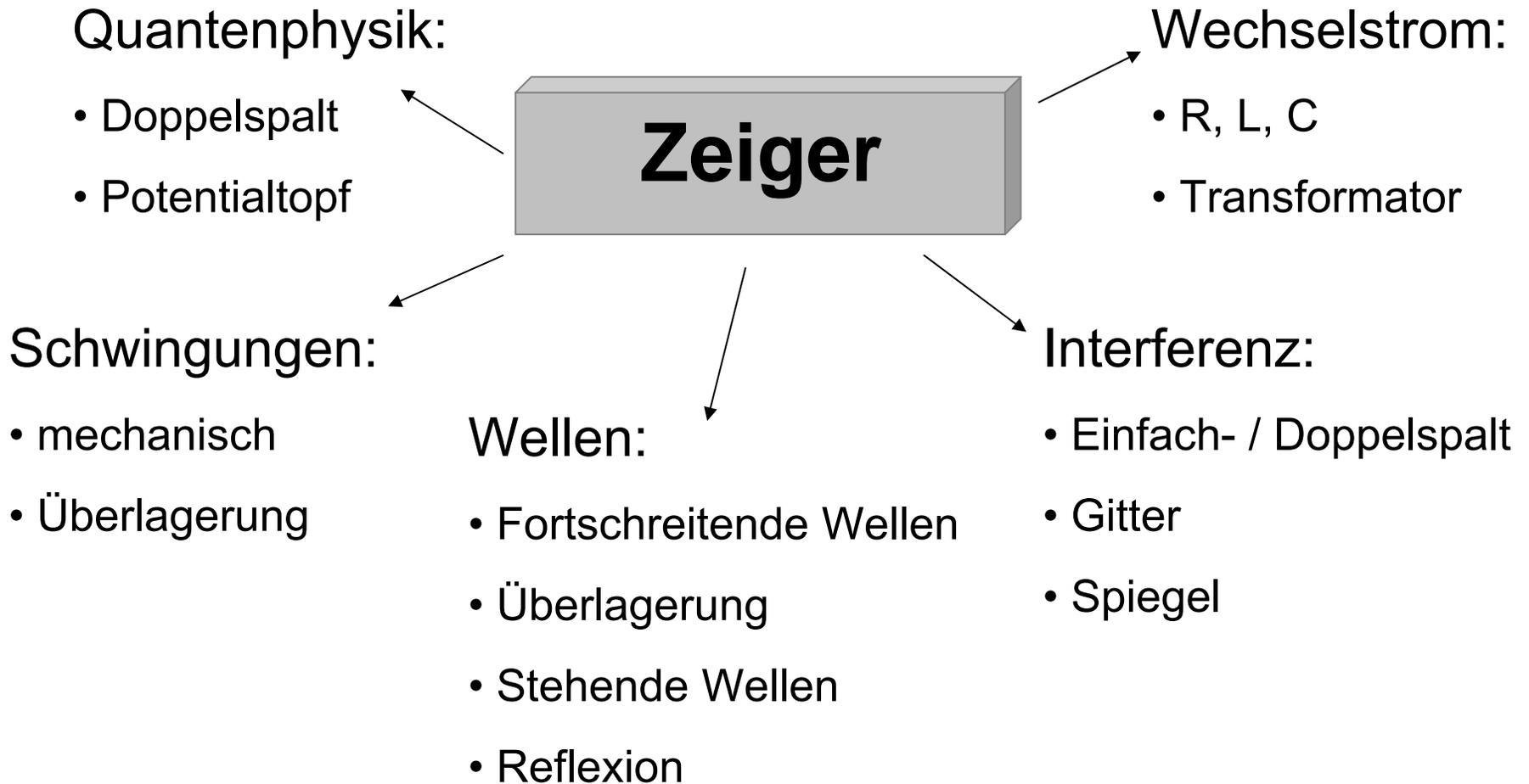
Zeigerformalismus (Richard P. Feynman, 1918-1988)

- Schlüssige Theorie:

Quantenelektrodynamik

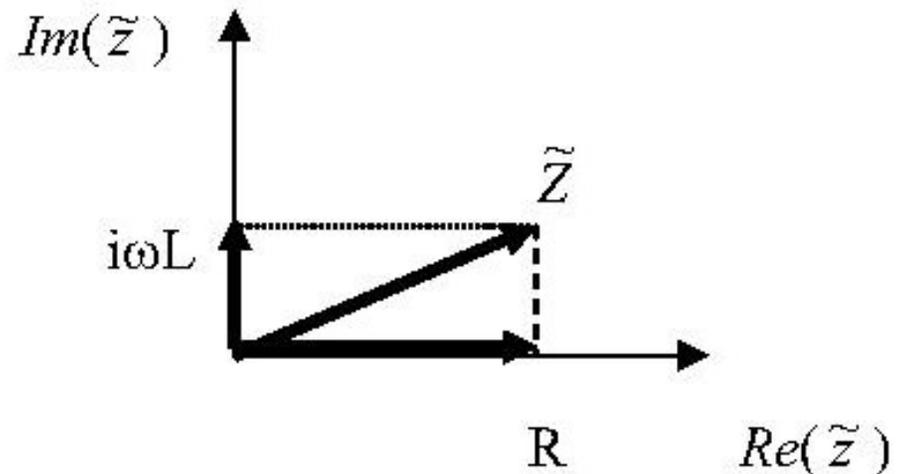


Das Zeigermodell



Das Zeigermodell in der Schule

- Komplexe Zahlen (Bsp. reale Spule)

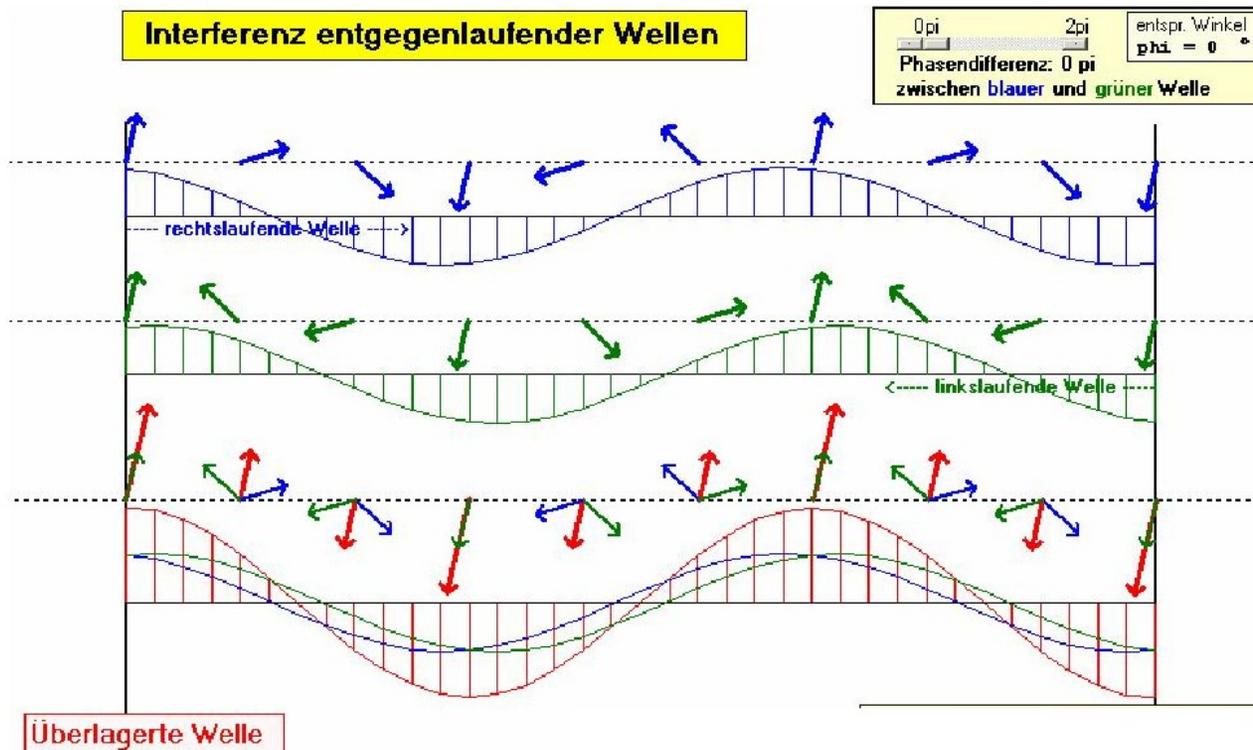


Zeigerdarstellung
Reale Spule [3]

- Addition von Schaubildern
- Differentiation / Integration
- Informationen über die Sinuslinie

Konkrete Anwendungsbeispiele

- Überlagerung von Schwingungen
- Interferenz von Wellen

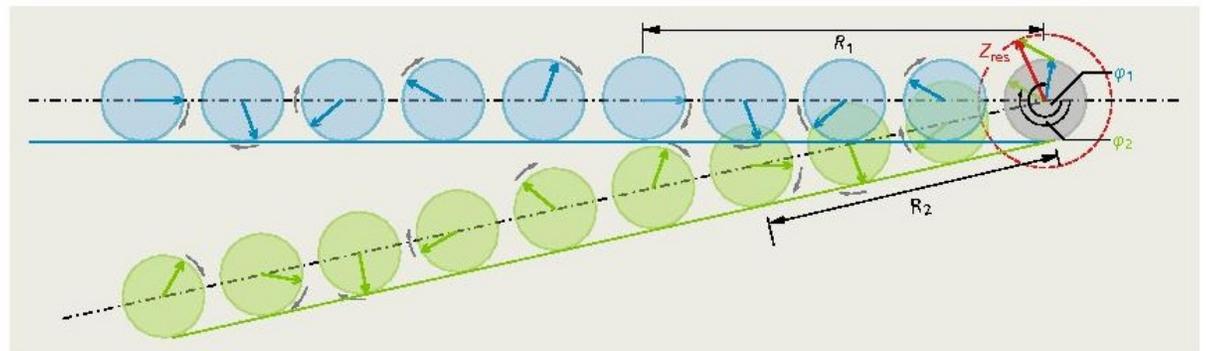


Der Zeigerformalismus

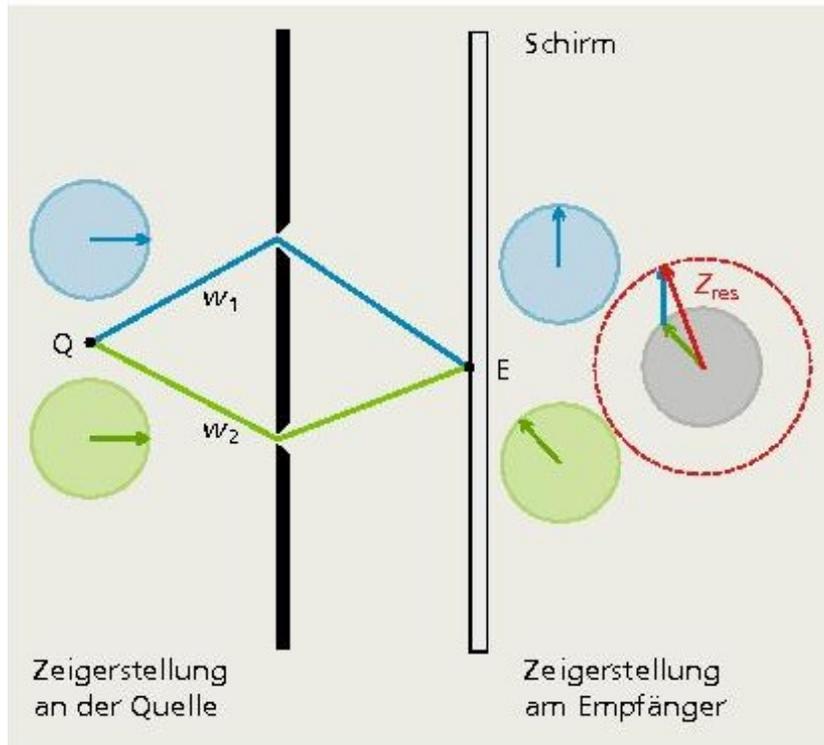
Berechnung der Lichtintensität:

- Für alle Lichtwege werden Zeiger gleicher Länge gezeichnet.
- Drehung entsprechend der Länge des Weges (Vielfache von λ)
- Addition aller Zeiger

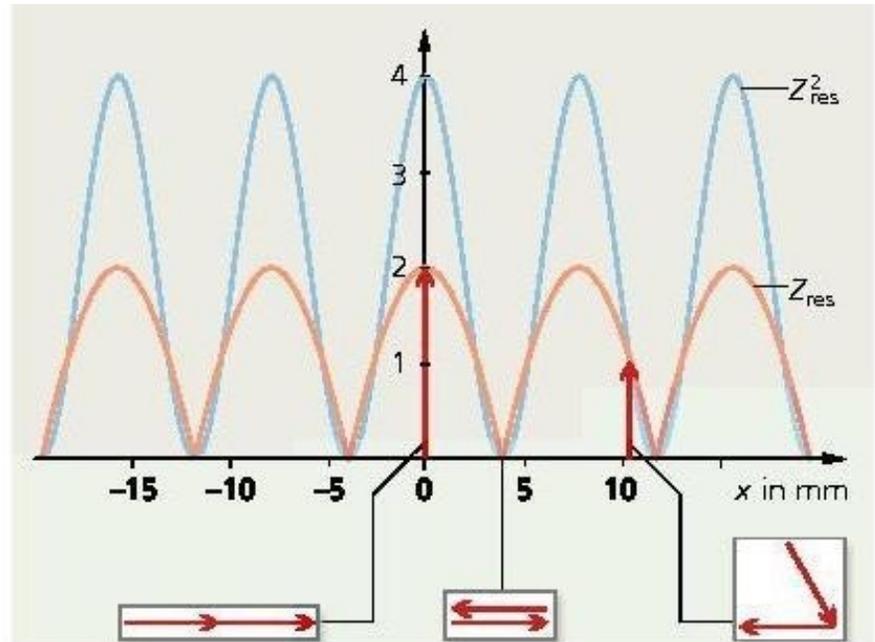
⇒ Das Quadrat der resultierenden Zeigerlänge ergibt die Wahrscheinlichkeit, ein Photon zu erhalten.



Interferenz am Doppelspalt



Zeigeraddition beim Doppelspalt [1]

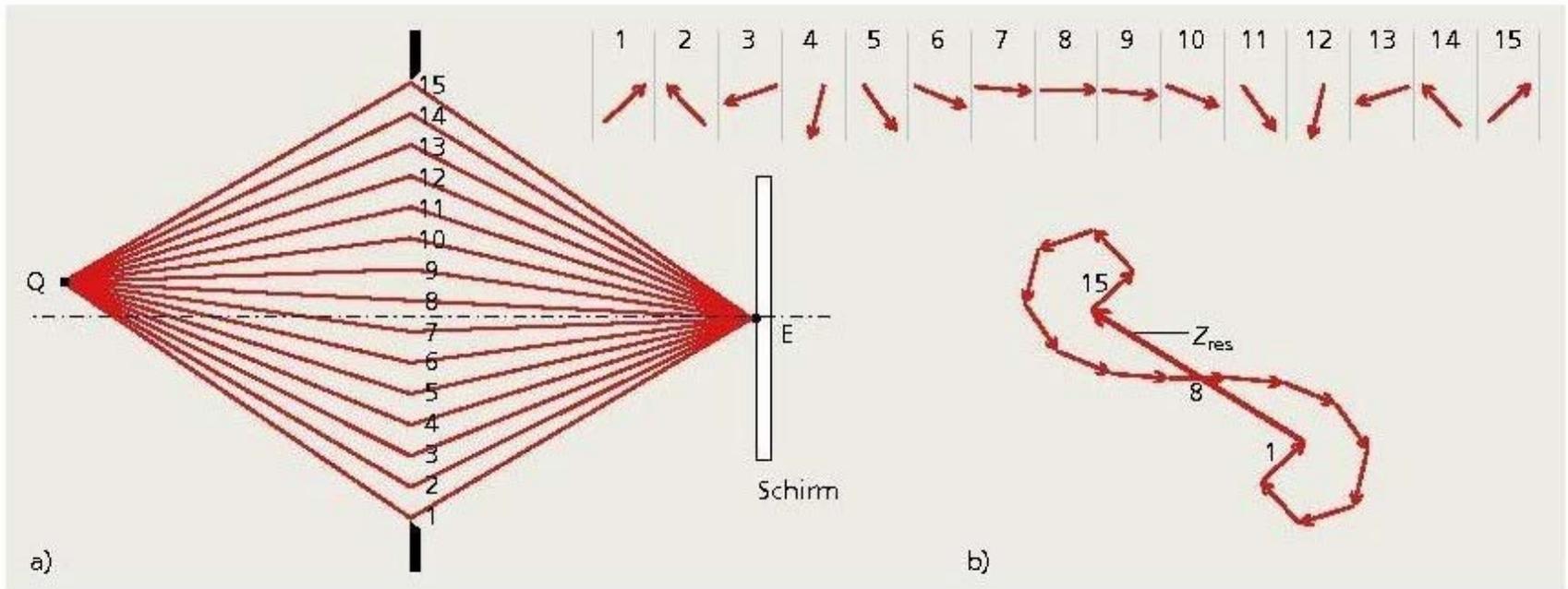


Berechnung für viele Punkte

Resultierende Zeiger und Intensität [1]

Beugung am schmalen Spalt

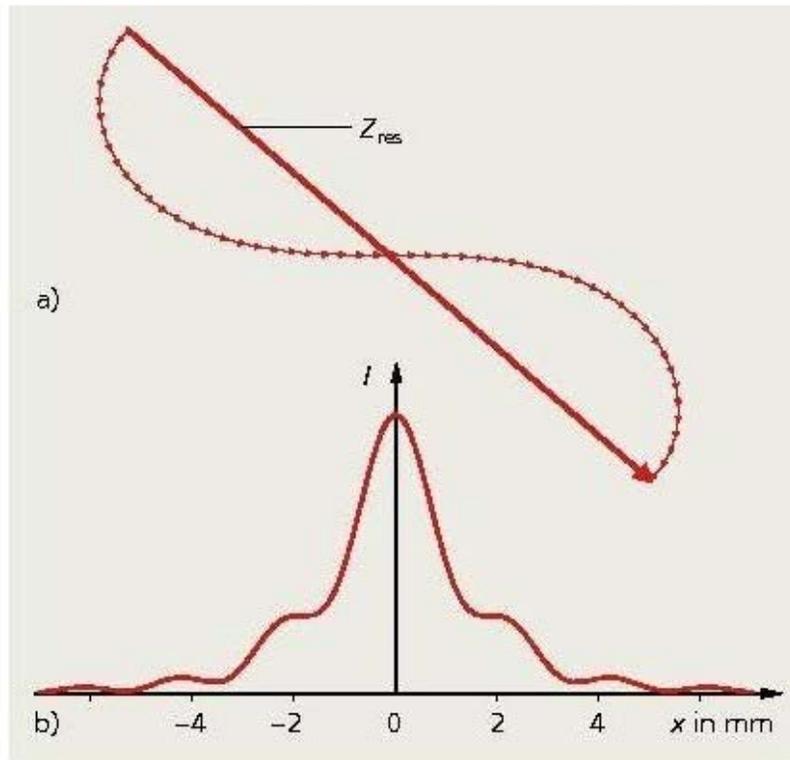
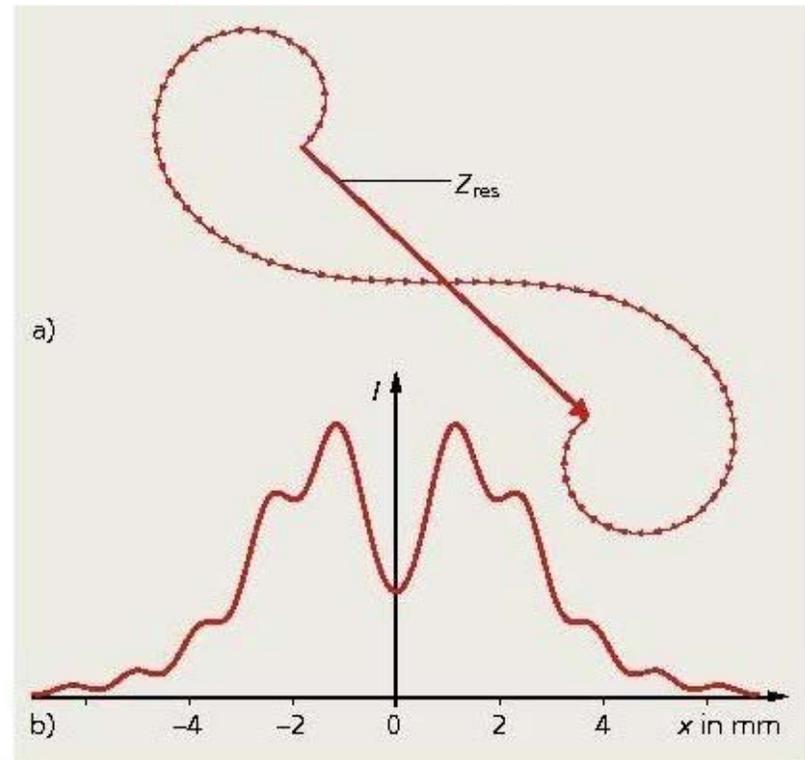
(Fraunhofer-Beugung)



Beugung am Einzelspalt [1]

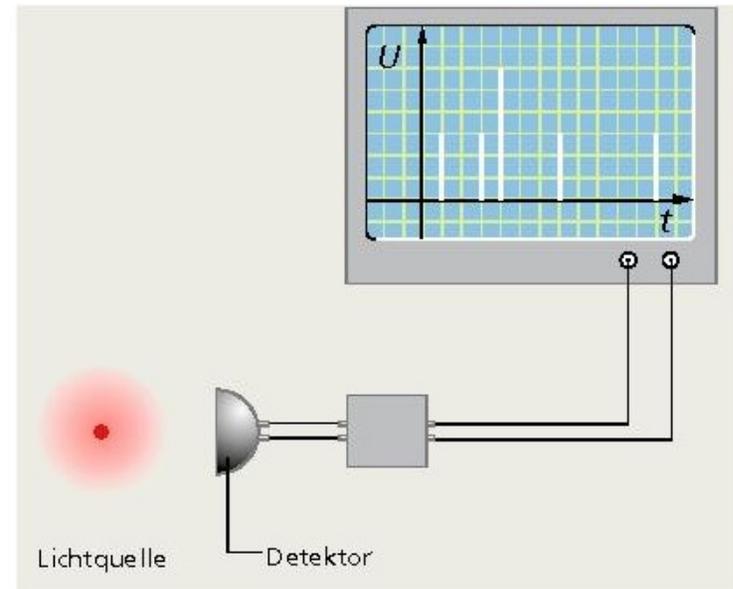
Beugung am breiten Spalt

(Fresnel-Beugung)

Beugung an Einzelspalt, $b=0,8\text{mm}$ [1]Beugung an Einzelspalt, $b=1,4\text{mm}$ [1]

Quantenphysik

- Auftreffwahrscheinlichkeit
- Quantisierte Energie
- Keine Möglichkeit, das Verhalten eines einzelnen Quantenobjekts vorherzusehen



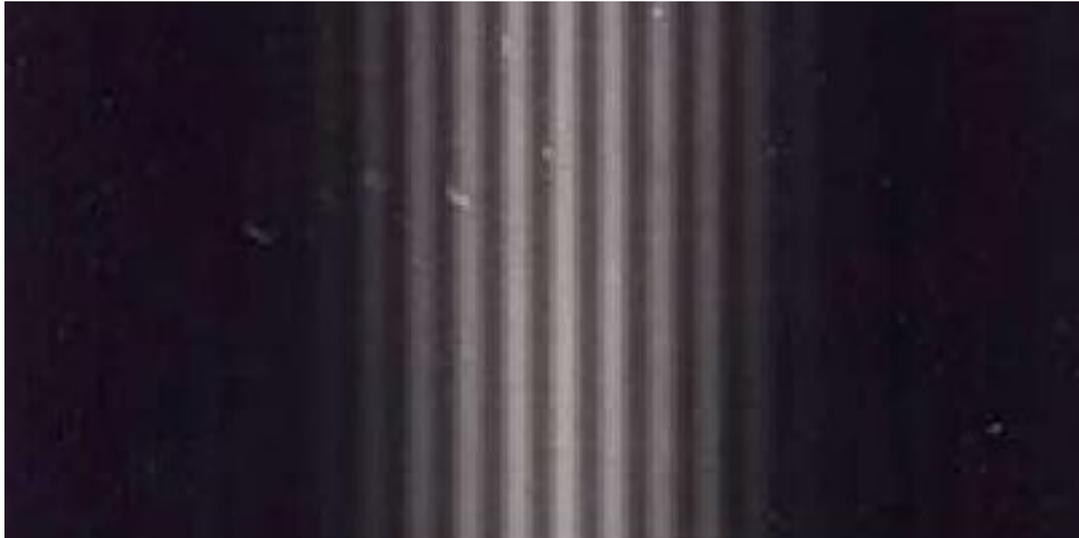
Registrieren von Photonen [2]

Interferenz von Teilchen (1)

(De Broglie)

Interferenz auch für Teilchen mit Masse:

$$\lambda_{dB} = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$



Interferenz von Elektronen [2]

Interferenz von Teilchen (2)

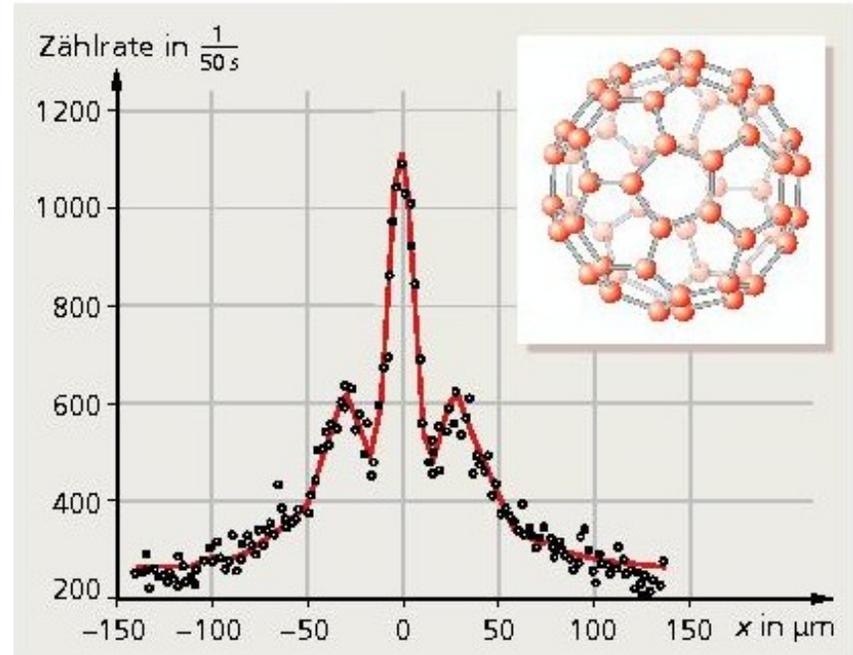
(De Broglie)

Interferenz für Elektronen beobachtbar!

→ Auch für Neutronen, Atome, Moleküle?

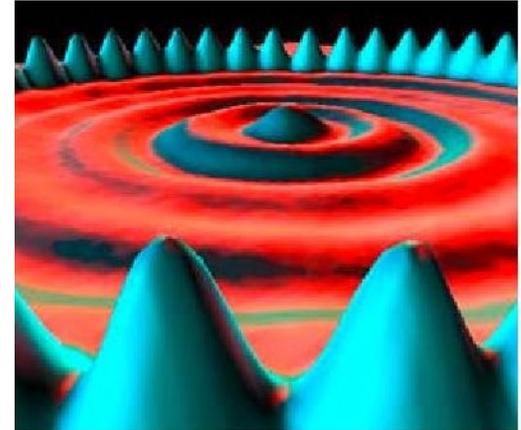
Bsp. C₆₀-Moleküle am Gitter
($g = 100 \text{ nm}$)

Beugung von C60 am Gitter [2]



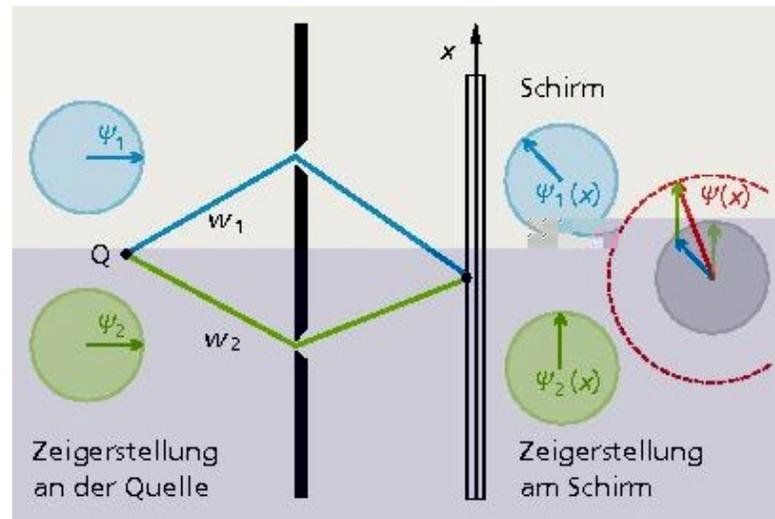
Auftreffwahrscheinlichkeit

- Wellenfunktion $\psi(x,t)$
- Auftreffwahrscheinlichkeit $|\psi(x,t)|^2$
- Wegen Interferenz: $P_{ges}(x) \neq P_1(x) + P_2(x)$



Raster-Tunnelmikroskop-Aufnahme eines Quantenperchs [2]

⇒ Zeigermodell



Zeigeraddition und Auftreffwahrscheinlichkeit für Elektronen [2]

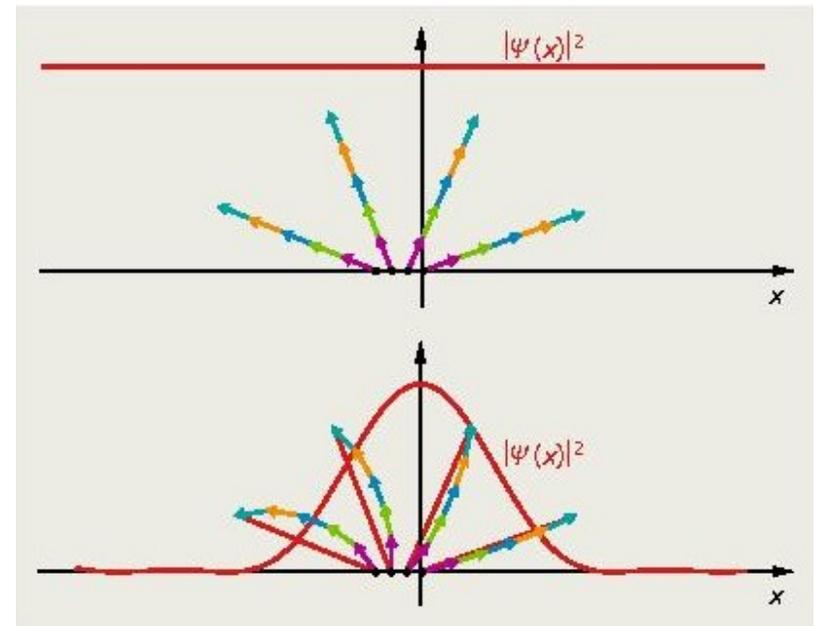
Zeigermodell in der Quantenphysik

Wellenoptik	Quantenphysik
Alle tatsächlichen Bahnen der Wellenerregung	Alle möglichen Rechenpfade des Quantenobjekts
E-Zeiger als λ -Zähler für jeden Wellenweg	ψ -Zeiger als λ -Zähler für jeden möglichen Rechenpfad
E-Zeiger entspricht elektrischer Feldstärke	ψ -Zeiger entspricht Wahrscheinlichkeitsamplitude
Superposition	Superposition bei mehreren ununterscheidbaren Möglichkeiten
Gemessene Intensität	Antreffwahrscheinlichkeitsdichte

Zeigerregeln

Ziel: Wahrscheinlichkeit P für ein Versuchsergebnis

- Bestimme alle Rechenpfade
 - Bestimme für jeden Pfad den Zeiger
 - Ununterscheidbare Möglichkeiten vektoriell addieren (Superpositionsprinzip)
 - Summenzeiger quadrieren und Quadrate addieren
- ⇒ Ergebnis ist P (unnormiert)



Aufenthaltswahrscheinlichkeit bei Überlagerung von 4 Wellen
a) gleicher, b) verschiedener Wellenlänge [2]

Mögliche Probleme / Nachteile

- Keine „spektakulären“ Versuche
- Mangelhafte Ausstattung der Schulen
- Quantentheorie schwer vorstellbar

Interferenz von Molekülen

Materiewellen-Interferometrie:

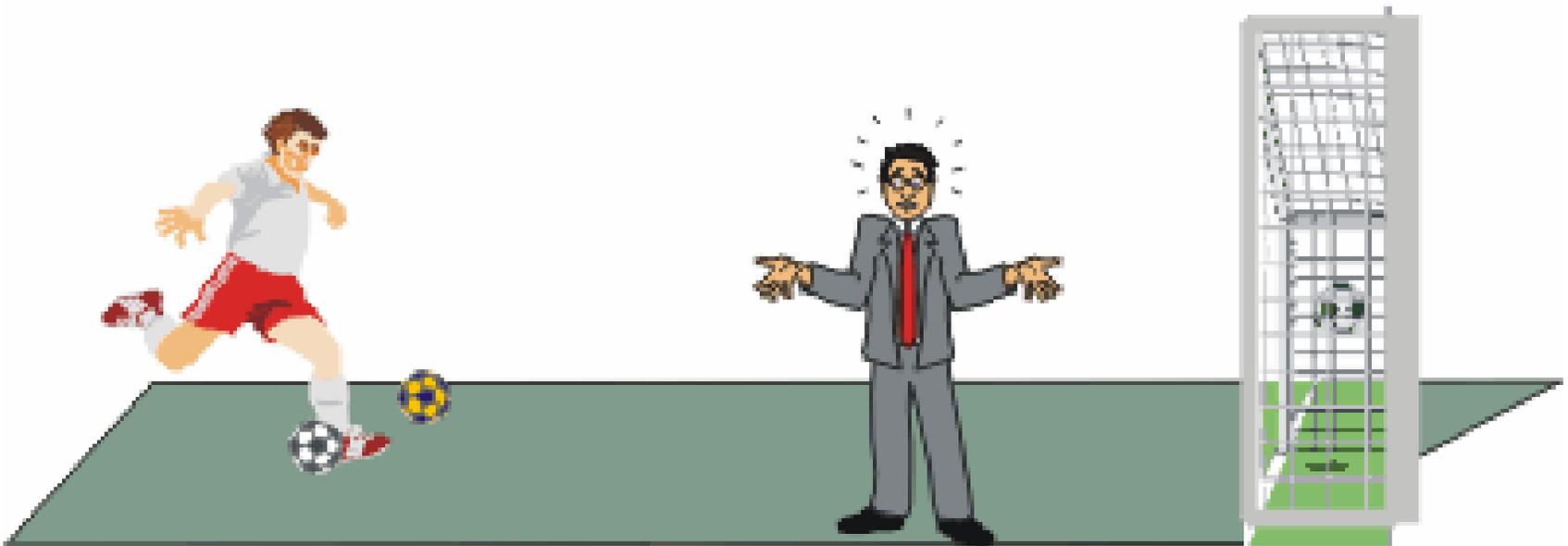
- Oberflächenanalyse und Holographie
- Strukturanalyse von Festkörpern
- Präzisionsmetrologie

Motivation für Forschung:

- Größtes Teilchen mit $\lambda_{dB} = \frac{h}{p}$?
- Gleichzeitige Realisierung von sich ausschließenden Zuständen?
- Neue, genauere Messungen
- Erzeugung molekularer Nanostrukturen
- Verbindung von Quantenphysik und Gravitation?
- Technische und fundamentale Grenzen der Quantenphysik?

Beugung und Interferenz von Fullerenen

Welle-Teilchen-Dualismus von C_{60}

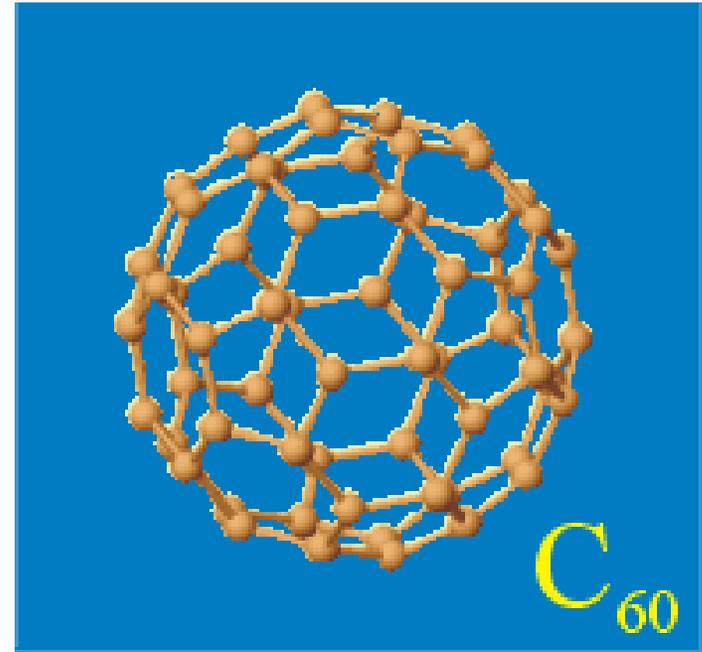


„The art of hitting the goal with every shot“ [11]

Interferenz von C_{60} -Molekülen (1)

C_{60} -Molekül:

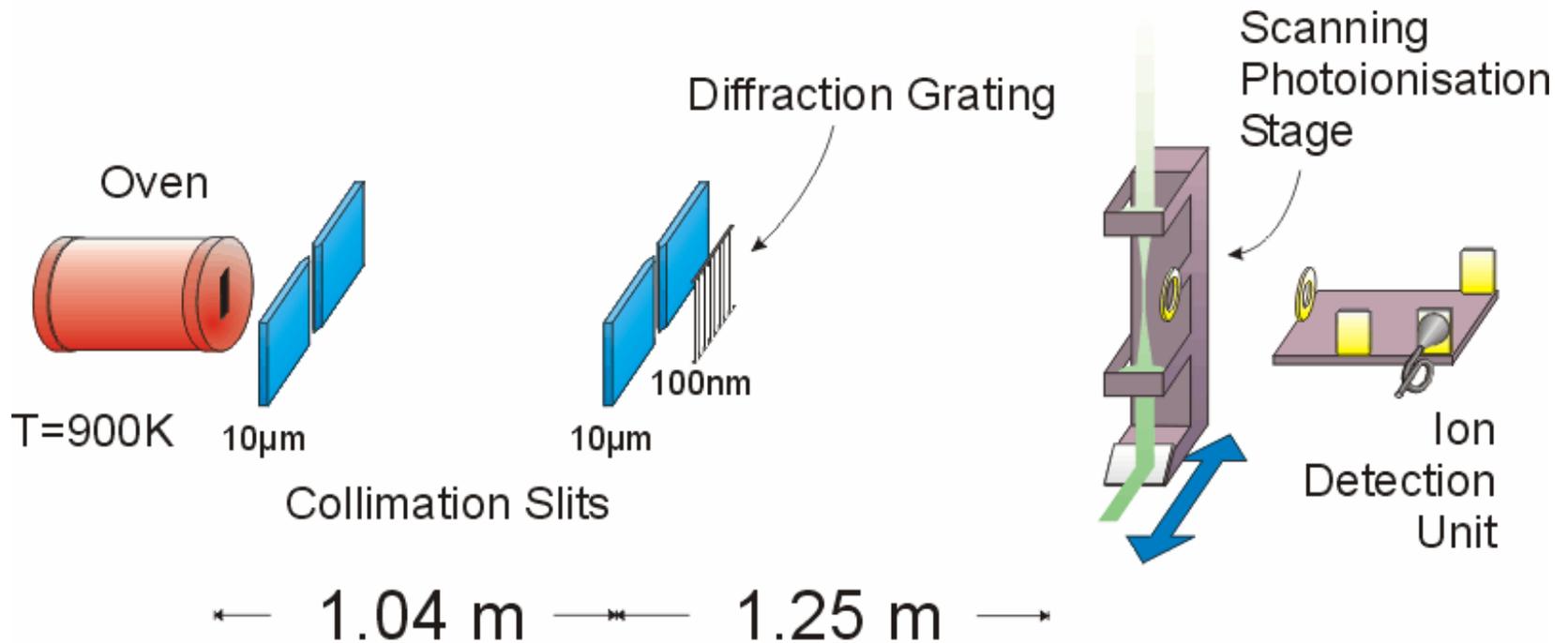
- Sphärisches Molekül
- 60 C-Atome (=Fulleren)
- 12 Fünf-, 20 Sechsecke
- „Buckminster-Fulleren“ / „Bucky-Ball“ / „Fußball-Molekül“
- Durchmesser: 0,7 nm
- Hohe Stabilität
- Emittiert Schwarzkörperstrahlung
- Thermische Ionisation
- Bei 900K: 174 angeregte Schwingungsmoden, 7 eV gespeichert



C60- Molekül [11]

Interferenz von C_{60} -Molekülen (2)

Versuchsaufbau:



Pressure $\sim 5 \cdot 10^{-7}$ mbar

Interferenz von C_{60} -Molekülen (3)

Versuchsaufbau:

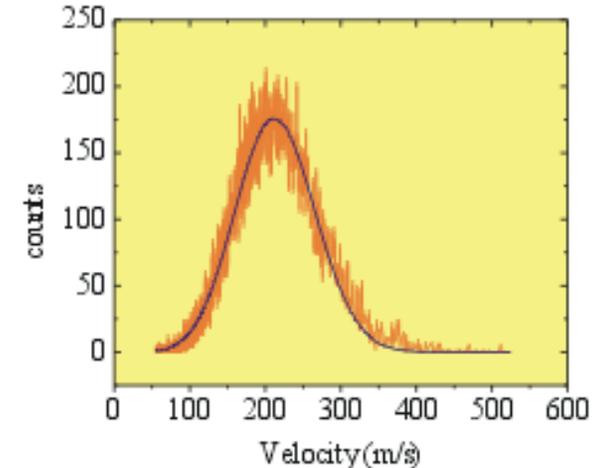
- Ofen: 900 K

Geschwindigkeitsverteilung:

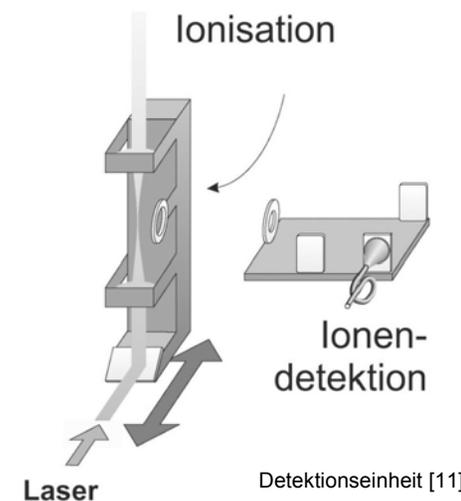
$$\langle v \rangle = 220 \text{ m/s} \quad (\pm 60\%)$$

$$\Rightarrow \langle \lambda_{dB} \rangle = 2,5 \text{ pm}$$

- Kollimationsspalte für transversale Kohärenz
- Gitter aus SiN ($g=100\text{nm}$)
- Detektor: Grüner Argon-Ionen-Laser (25 W)

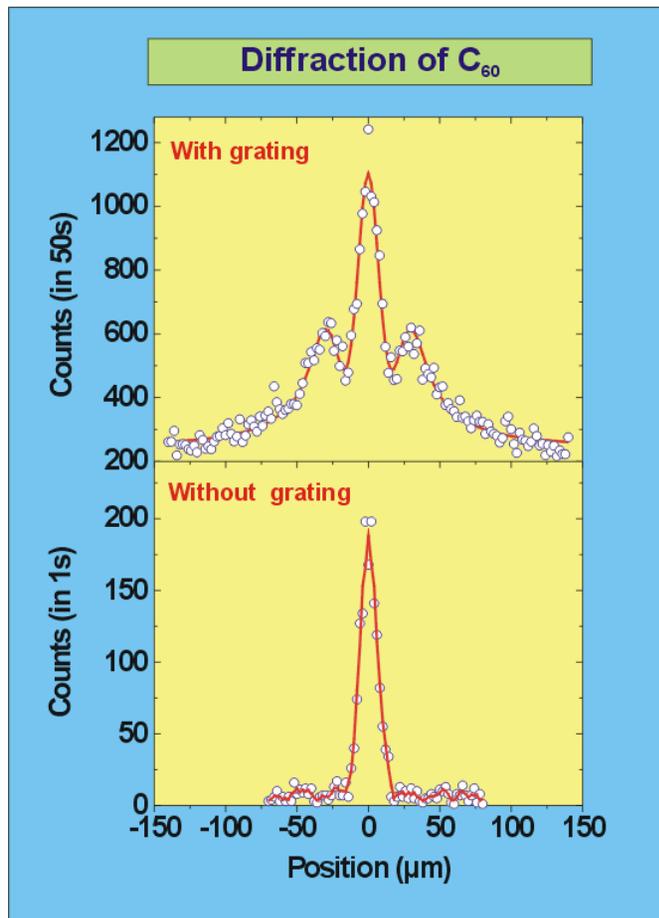


Geschwindigkeitsverteilung [11]



Detektionseinheit [11]

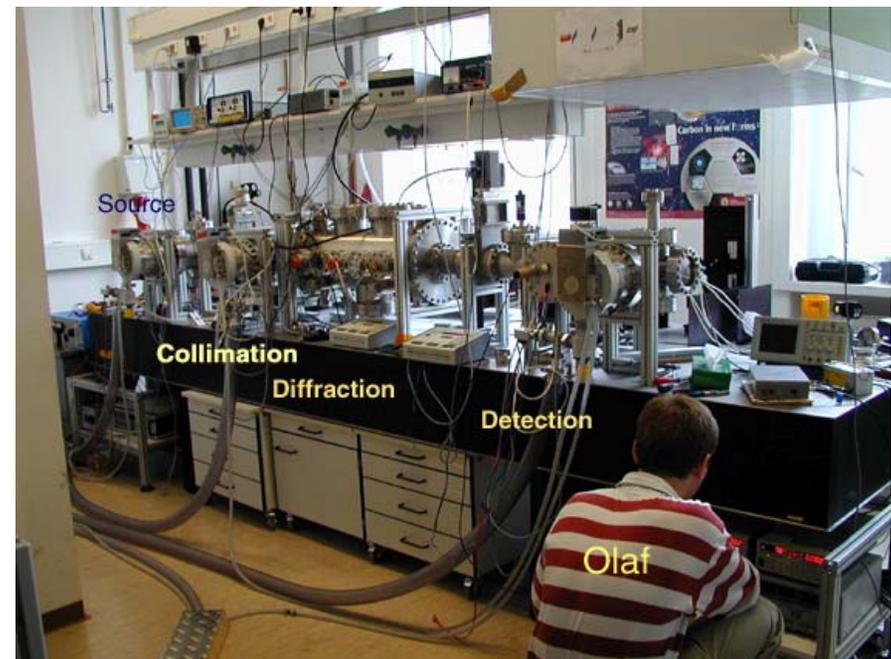
Interferenz von C_{60} -Molekülen (4)



Interferenzbild

Versuchsergebnisse [11]

Blick ins Labor



Labor [11]

Interferenz von C_{60} -Molekülen (5)

Was wurde erreicht?

Wellenverhalten des bisher schwersten und komplexesten Objekts:

- 60 Atome, Masse: 720 amu

Warum ist dies von Bedeutung?

- C_{60} ist eigentlich klassisches Objekt:
 - Viele innere Freiheitsgrade
 - Mögliche Bindung zur Umgebung
- Neue Möglichkeiten: Dekohärenzuntersuchungen, Nanolithografie-Experimente

Interferenz von C_{60} -Molekülen (6)

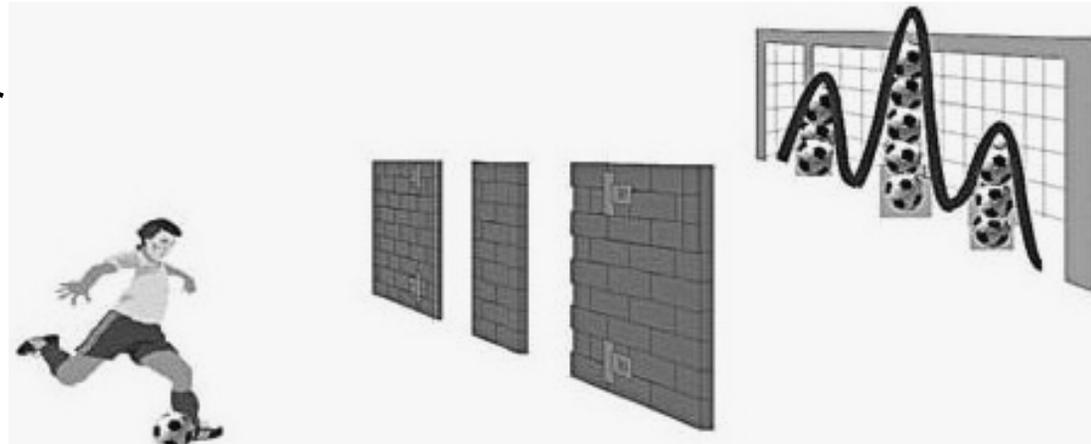
Vergleich mit Fußballspiel

C_{60} erfüllt FIFA-Anforderungen an Form und Symmetrie:

	C_{60}	Fußball
Durchmesser:	1 nm	22 cm
Tor-/ Gitterweite:	50 nm	732 cm
Verhältnis:	1:50	1:33

⇒ Abstand Quelle-Detektor
 ↔ Abstand Erde-Mond

Fußball: $\lambda_{dB} \approx 10^{-35} m$



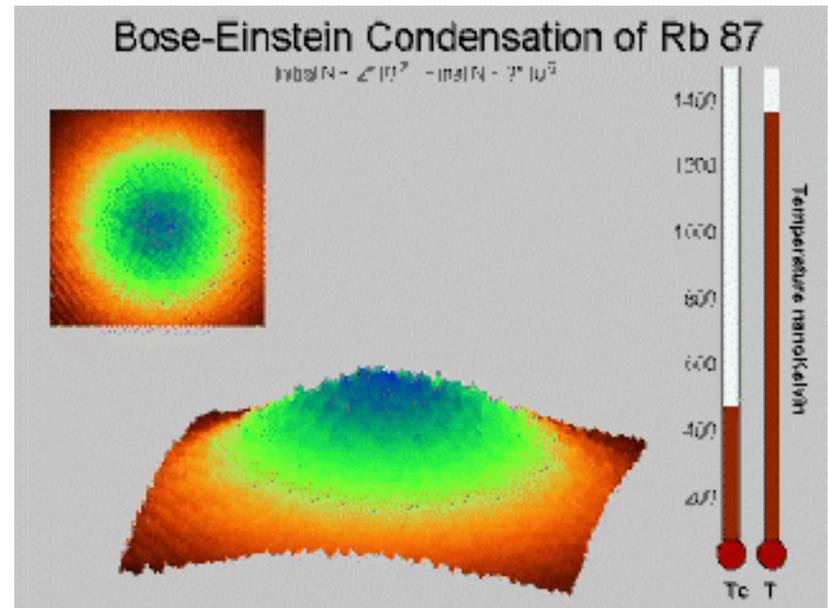
Beugung eines FIFA-Balls [13]

Interferenz von Bose-Einstein-Kondensaten (1)

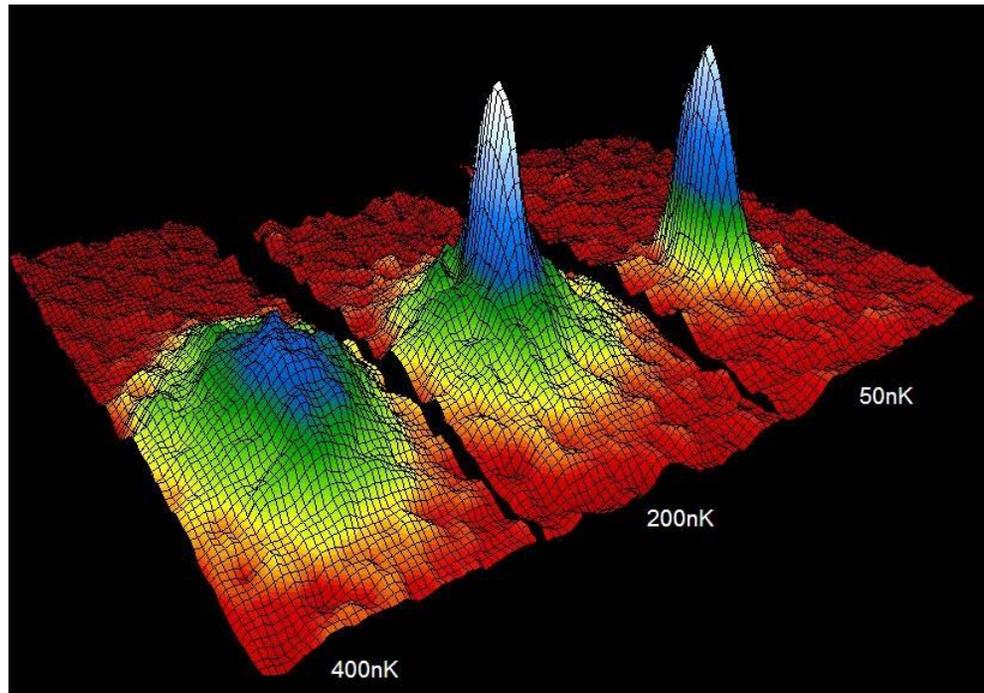
Was ist ein BEK?

- Extremer Aggregatzustand
- Alle Atome besetzen gemeinsam tiefstmögliches Energieniveau
- Nur möglich mit Bosonen
- Bosonen vollständig delokalisiert

Bose-Einstein-Kondensation
Bei kritischer Temperatur [14]



Interferenz von Bose-Einstein-Kondensaten (2)



Darstellung eines BEK bei verschiedenen Temperaturen [6]
Dichte in z-Richtung

- Einzelne Atome sind ununterscheidbar
- Zustand durch eine einzige Wellenfunktion beschreibbar
- Atomwellen beginnen exakt gleichphasig zu schwingen

Interferenz von Bose-Einstein-Kondensaten (3)

Eigenschaften des BEK

- Makroskopische Quantenobjekte (100 μm)
- Suprafluidität (vgl. superflüssiges Helium)
- Supraleitung
- Kohärenz über makroskopische Entfernungen

⇒ Interferenzexperimente, Atomlaser

Interferenz von Bose-Einstein-Kondensaten (4)

Wie erhält man ein BEK?

- Phasenübergang bei kritischer Phasenraumdichte:

$$\rho \cdot \lambda_{dB}^3 > 2,61 \quad \lambda_{dB} = \frac{h}{\sqrt{2\pi m k_B T}}$$

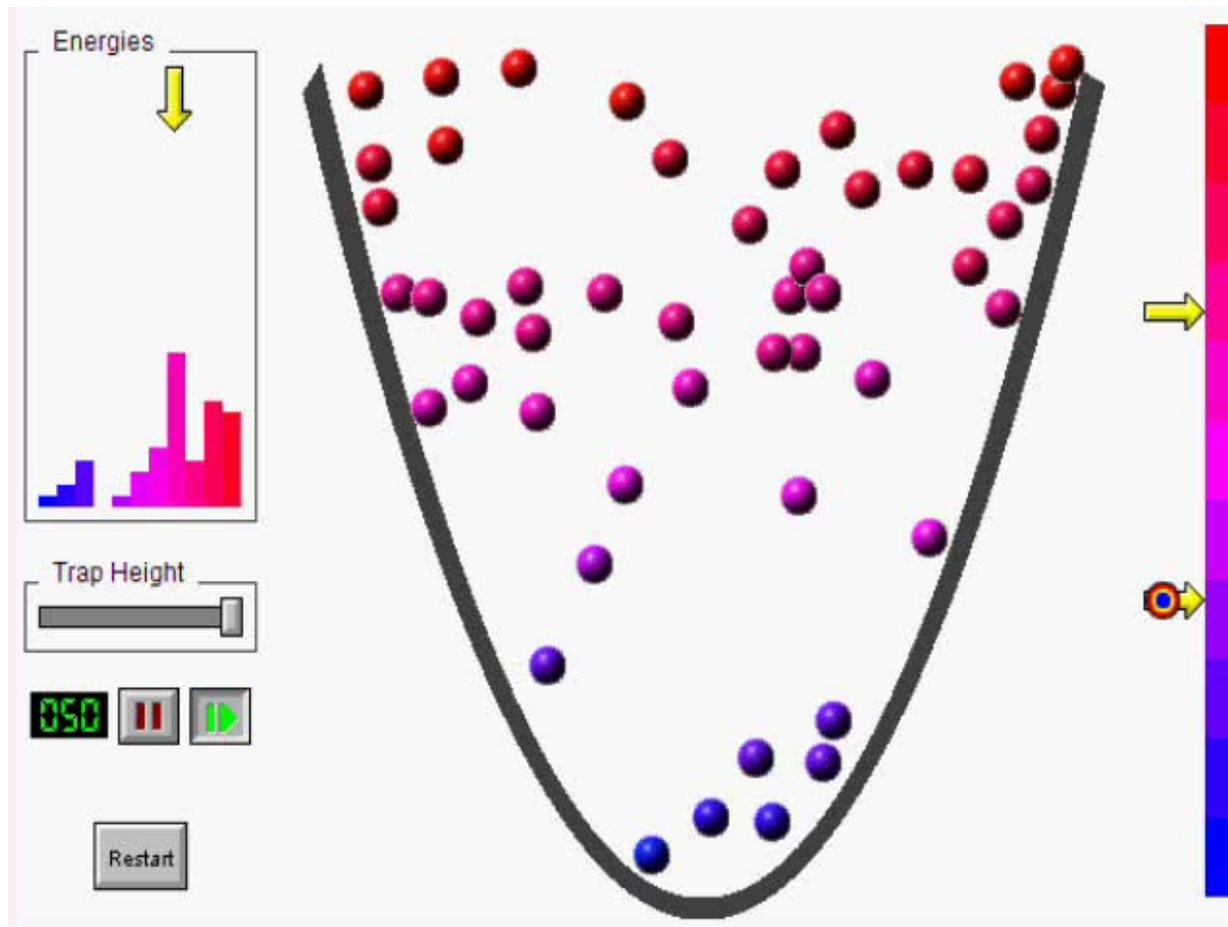
- Einsetzen der Kondensation, wenn: $d_{Atome} < \lambda_{dB}$

Übliche Methode:

- Fangen von Atomen in magneto-optischer Falle, Vorkühlung durch Laser-Kühlung
- Evaporative Kühlung

Interferenz von Bose-Einstein-Kondensaten (5)

Evaporative Kühlung:



Evaporative Kühlung [14]

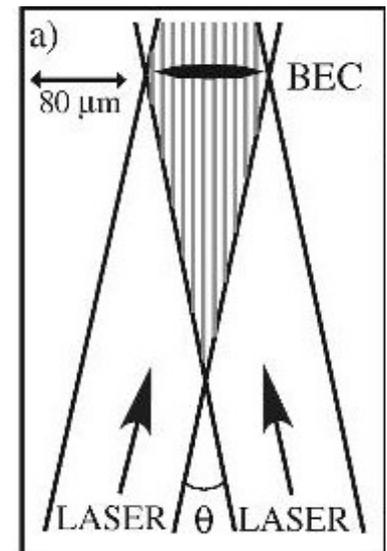
Interferenz von Bose-Einstein-Kondensaten (6)

- Theoretische Vorhersage: 1924 von S. Bose und A. Einstein
- Erste Herstellung: 1995 von Eric Cornell, Carl Wiemann, bzw Wolfgang Ketterle
- Nobelpreis für Physik 2001 für Herstellung eines BEK aus einem Gas von Na- bzw. Rb- Atomen
- Bis 2004 für verschiedene Isotope gelungen
(Bsp. ^{85}Rb , ^{87}Rb , ^7Li , ...)

Interferenz von Bose-Einstein-Kondensaten (7)

Das Experiment

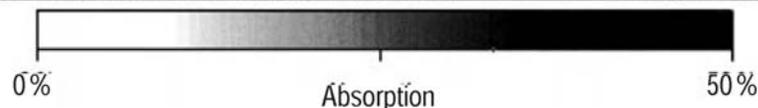
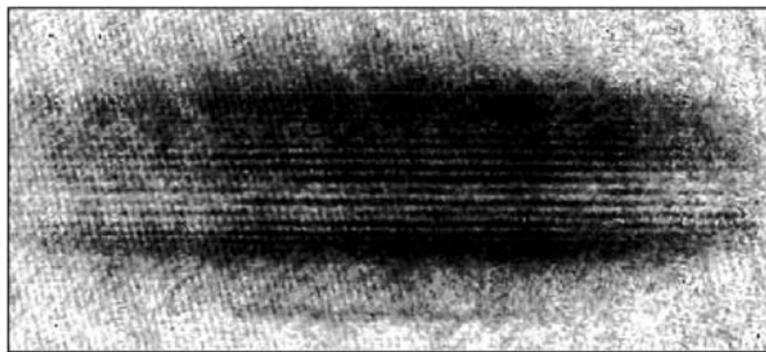
- ^{87}Rb -Kondensat mit $3 \cdot 10^5$ Atomen
- Erzeugung von Kondensaten:
Verdampfung in zylindersymmetrischer magnetischer Falle
→ Zigarrenförmige Kondensate ($L=84\mu\text{m}$, $R=6\mu\text{m}$)
- Optisches Gitter: Laserstrahlen $\lambda=532\text{nm}$
→ Stehende Welle
→ Periodisches Potential entlang z-Achse
→ Abstoßendes Potential für Atome



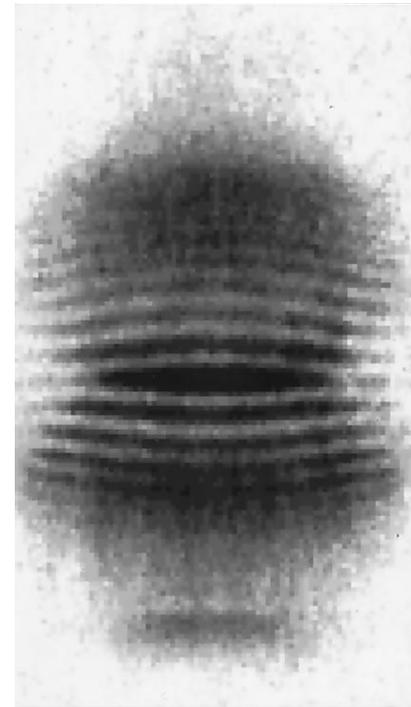
Optisches Gitter
Zur Teilung eines
BEK in 30 BEKs [9]

Interferenz von Bose-Einstein-Kondensaten (8)

- Abschalten der Fallen
 - Kondensate fallen nach unten, dehnen sich aus und überlappen 22 ms lang
- Dichteverteilung wird sichtbar gemacht



Interferenzmuster zweier überlappender BEK's (Ketterle) [7]



Interferenzmuster zweier sich Ausdehnender BEK's (aus science) [8]

Interferenz von Bose-Einstein-Kondensaten (9)

Anwendungsmöglichkeiten in vielen Gebieten:

- Erzeugung von Festkörpern
- Präparation von niedrigdimensionalen Quantengasen
- Atomfallen-Interferometrie
- Quanteninformationsverarbeitung

Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!

Quellenverzeichnis (1)

- Aus <https://bscw.ph-bw.de>: 0130060 Kap_08++ in CS3.pdf
- Aus <https://bscw.ph-bw.de>: 0130060 Kap_09++ in CS3 disclaimer.pdf
- W. Philipp: „Zeigermodell im Physikunterricht der Kursstufe“, StdSem Esslingen
- Wolfgang Philipp: Fachdidaktik-Seminar 2007
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Bose-Einstein-Kondensat>
- http://seminar.physik.uni-mainz.de/uploadz/fp_sem_26112007.pdf
- http://users.physik.fu-berlin.de/~simons/Publikationen_Physik%20IV/PhysBI97.pdf
- M. R. Andrews, SCIENCE z VOL. 275 z 31 JANUARY 1997 637:
(<http://www.sciencemag.org/cgi/reprint/275/5300/637.pdf>)

Quellenverzeichnis (2)

- Hadzibabic, PhysRevLett.93.180403 (<http://prola.aps.org/pdf/PRL/v93/i18/e180403>)
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Fullerene>
- Nature 401, 680-682, 14.October 1999: (<http://www.quantum.at/research/molecule-interferometry-foundations.html>
und <http://www.quantum.at/research/molecule-interferometry-foundations/wave-particle-duality-of-c60.html>)
- http://quantendynamik.physik.uni-freiburg.de/teaching/ss03/ss03_seminar/C60.pdf
- www.univie.ac.at/pluslucis/PLUSLUCIS/081/s39.pdf