



Einführung in die Quantentheorie der Atome und Photonen

23.04.2005

Jörg Evers

Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg

Quantenmechanik

Was ist das eigentlich?

- ▶ Physikalische Theorie
- ▶ Hauptsächlich zur Beschreibung mikroskopischer Objekte (Ausnahme: z.B. Supraleitung, Eigenschaften von Festkörpern)
- ▶ “Klassische” (Newtonsche) Mechanik als Grenzfall enthalten und für viele Situationen völlig ausreichend

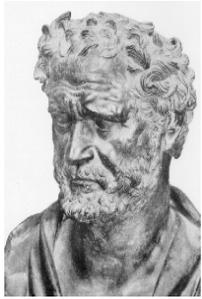
Warum gilt die Quantenmechanik oft als schwer und unzugänglich?

- ▶ Keine Intuition: Beschriebene Objekte gehören nicht zur Alltagserfahrung
- ▶ Vorhersagen oft schlecht mit dem “Bauchgefühl” vereinbar

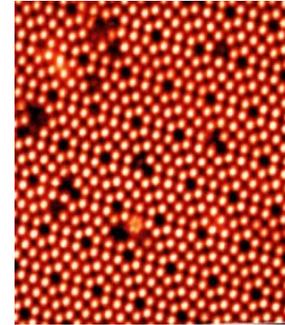
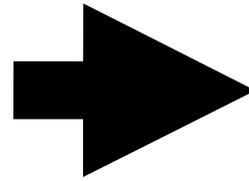


Atome als Grundbausteine

Geschichte in zwei Bildern:



Demokrit (400 v. Chr.)
“Alles Stoffliche
setzt sich aus Atomen
zusammen”



Atome (indirekt)
sichtbar durch
Rastertunnel-
mikroskop

(hier: Silizium)

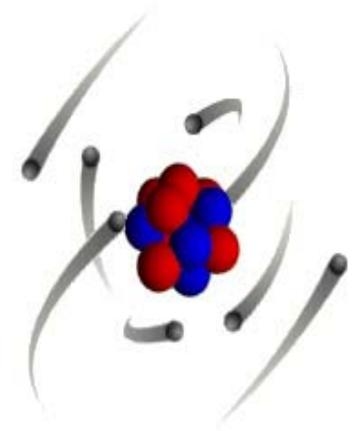
Grobes modernes Bild:

▶ Atomkern

- Protonen (positiv geladen) und Neutronen (neutral)
- Sehr klein (10^{-14} Meter)

▶ Elektronenhülle

- Elektronen (negativ geladen)
- Durchmesser ca. 10.000 mal größer als bei Kern



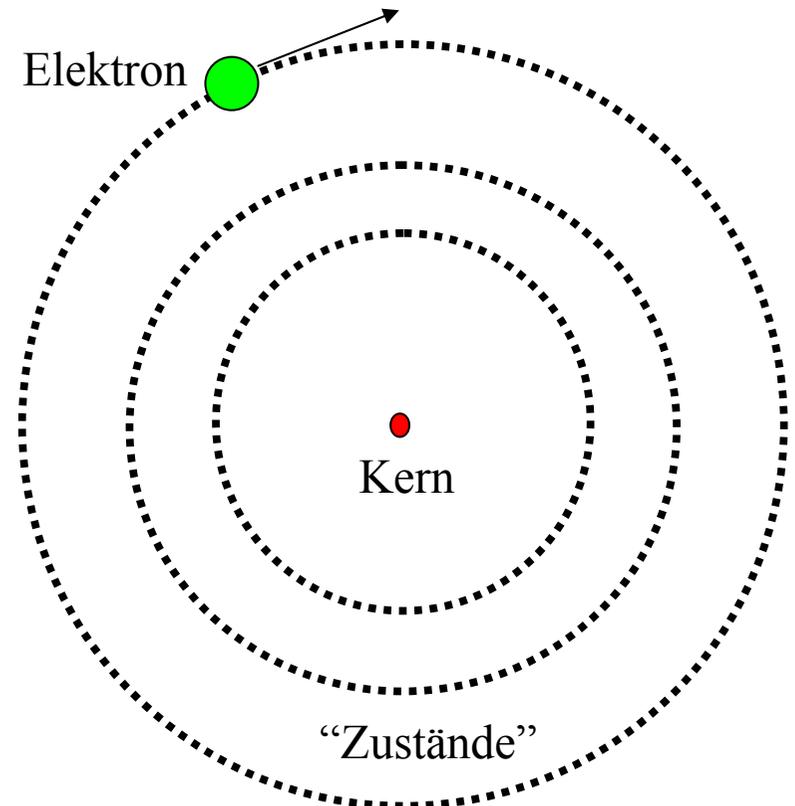
Das Bohrsche Atommodell

Modellvorstellungen:

- ▶ Elektronen bewegen sich auf stabilen Kreisbahnen um Kern
- ▶ Nur bestimmte **diskrete Radien** sind möglich
- ▶ Übergänge zwischen den Kreisbahnen möglich unter Emission oder Absorption von **charakteristischen Energien**

Was ist hier nicht klassisch?

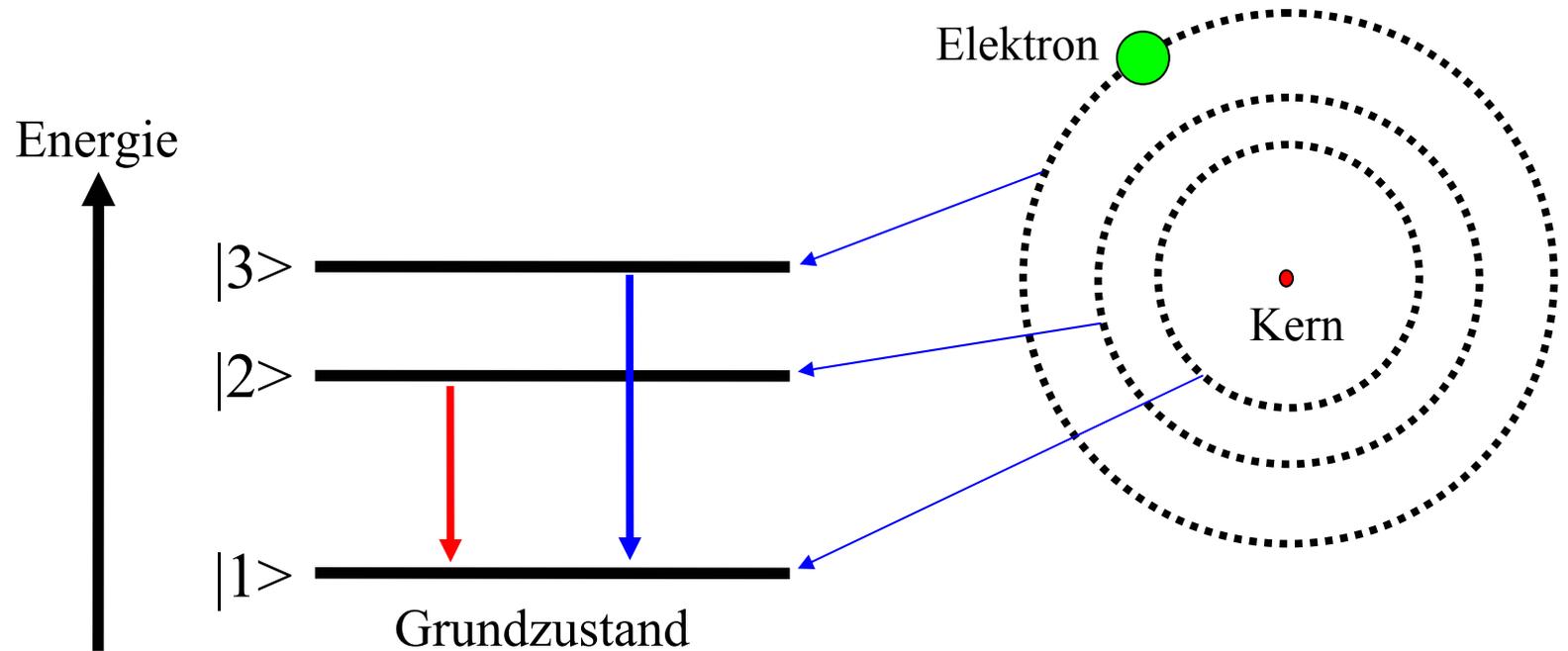
- ▶ Quantelung von Radius, Energie, ...
- ▶ Nach klassischer Elektrodynamik müsste Elektron auf Kreisbahn Energie abstrahlen, langsamer werden und in Kern stürzen



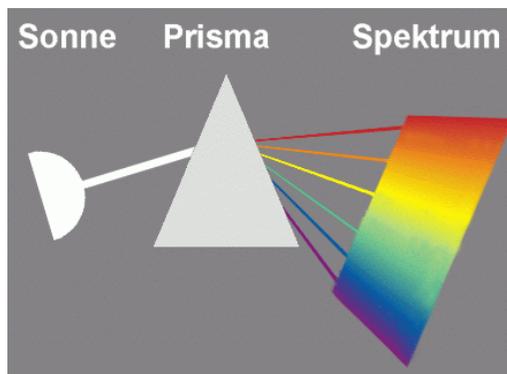
In diesem Vortrag: "Quantentheorie der Atome"
meint
"Quantentheorie der Elektronenhülle"

Zustände und Linienspektren

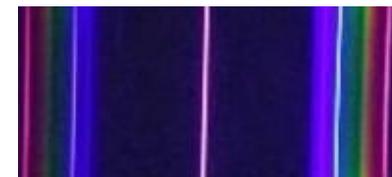
Zustände:



Linienspektren: charakteristisch für jedes Atom



Wasserstoff:

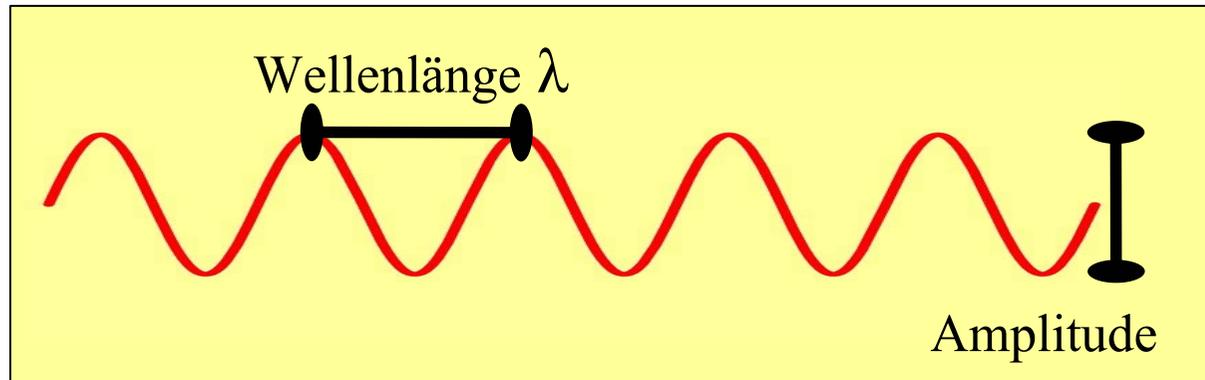


Neon:

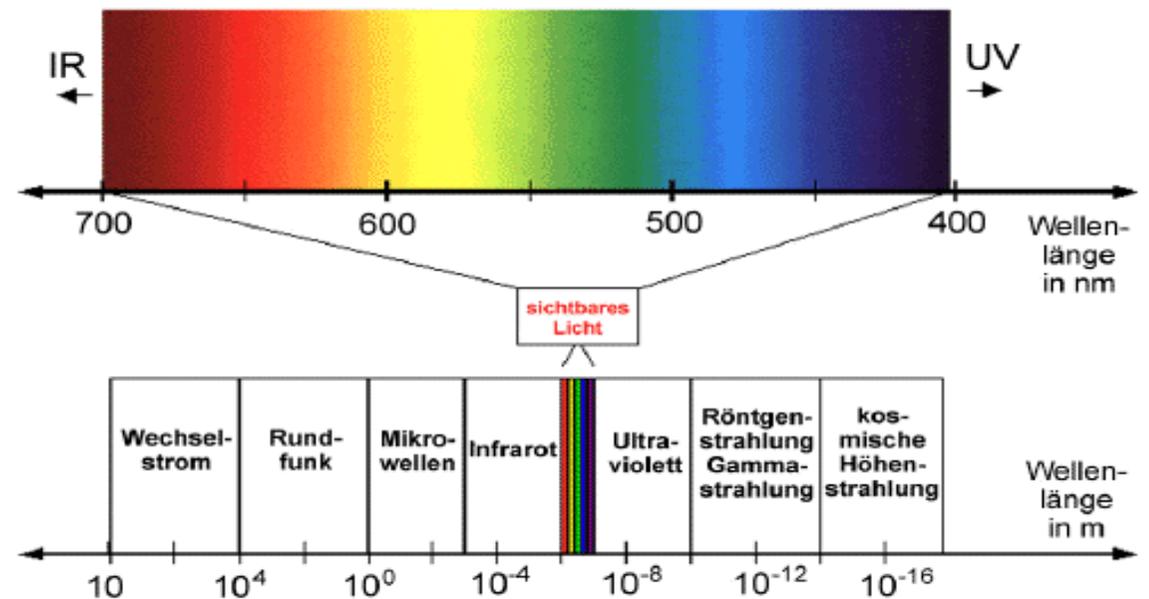


Licht

Klassische Vorstellung: Licht als elektromagnetische Welle

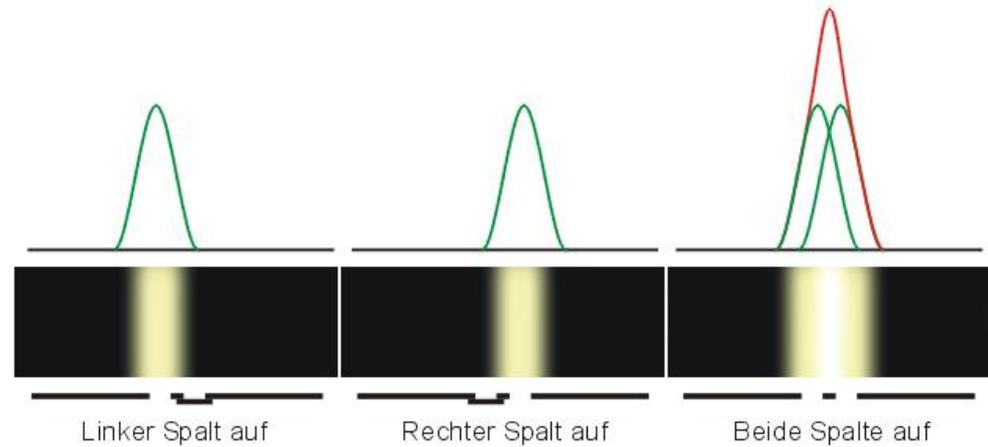
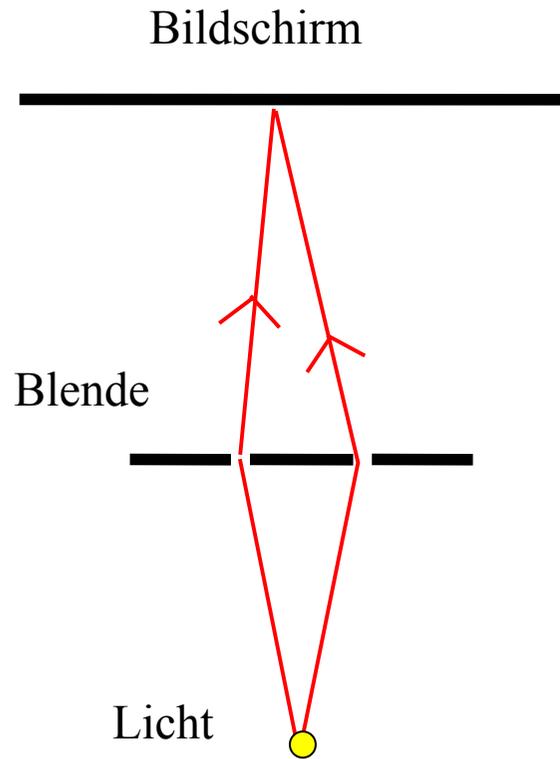


Optisches Spektrum des Lichts

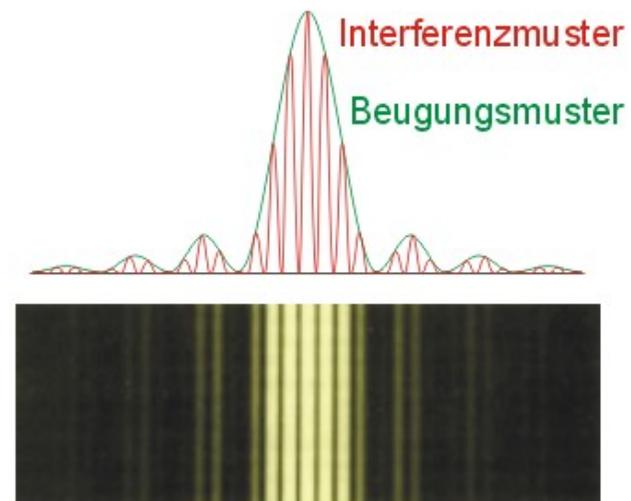


Licht am Doppelspalt

► naive Erwartung:



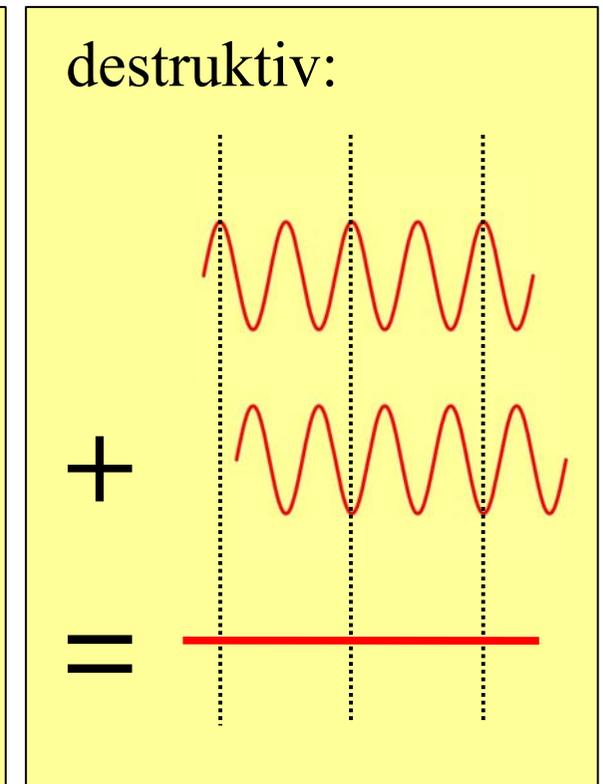
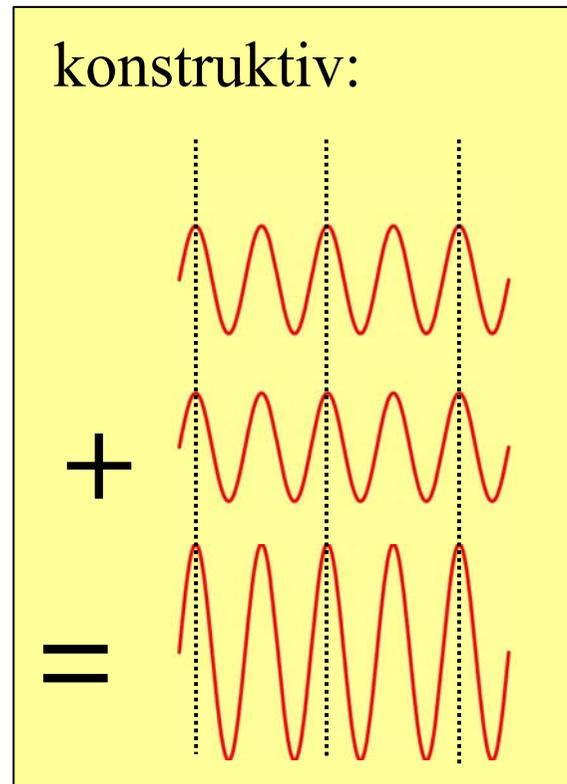
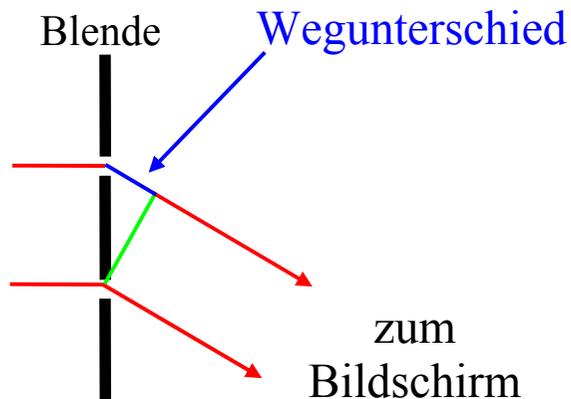
► Beobachtung im Experiment:



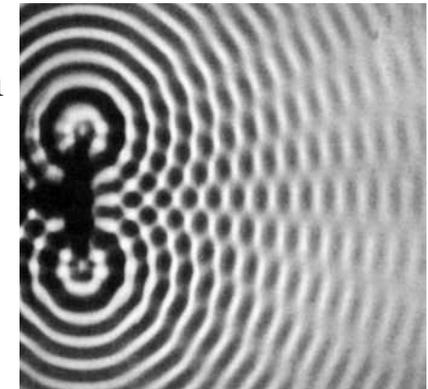
Interferenz

Licht als Welle:

- ▶ Aus jedem Spalt trifft eine Welle auf den Schirm
- ▶ Wegunterschied zwischen den zwei Wellen



analog:
Wasserwellen



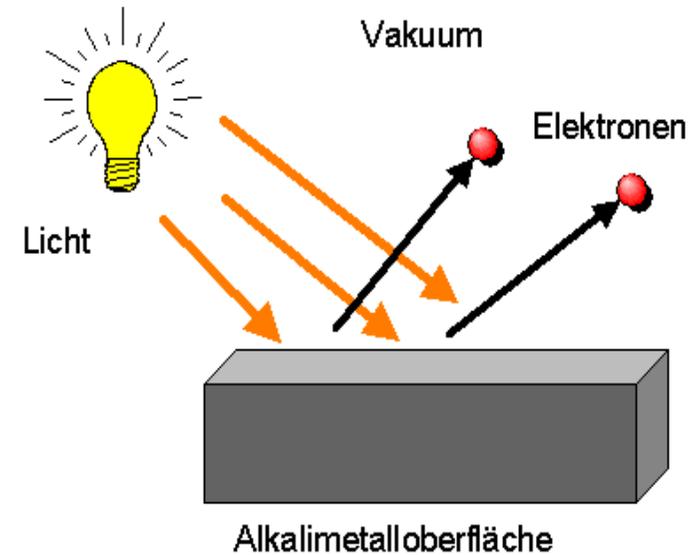
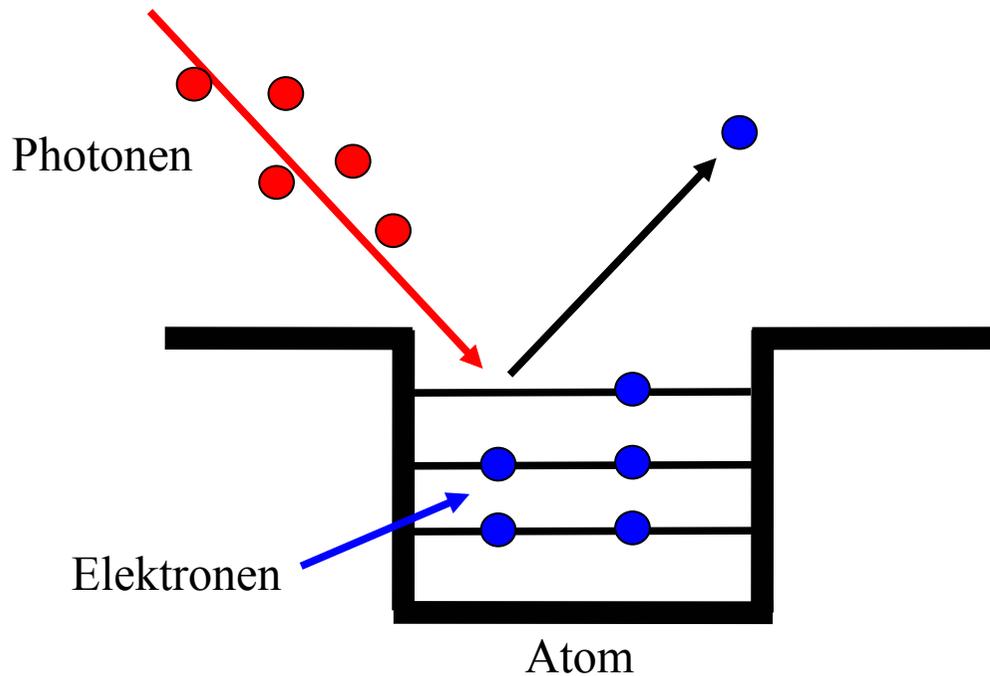
Das Licht interferiert
und verhält sich wie eine Welle

Photoeffekt

Ergebnis des Experiments:

Kann nicht mit Licht als Welle verstanden werden

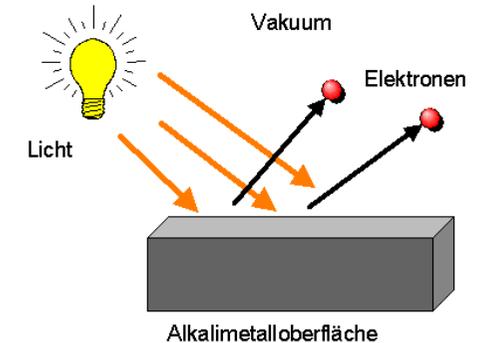
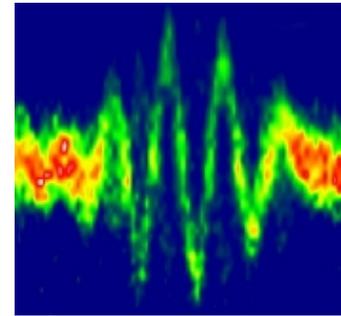
Lösung: Licht als Teilchen (Photonen)



Welle–Teilchen-Dualismus

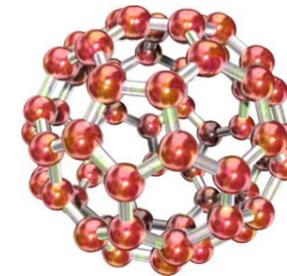
Licht hat Wellen- und Teilcheneigenschaften

- ▶ Interferenz
- ▶ Photoeffekt



Teilchen haben auch Welleneigenschaften

- ▶ Interferenz von Teilchen experimentell bestätigt
- ▶ Bisher größte Teilchen in Experiment: Fullereene (“Fußball” aus 60 Kohlenstoff-Atomen)



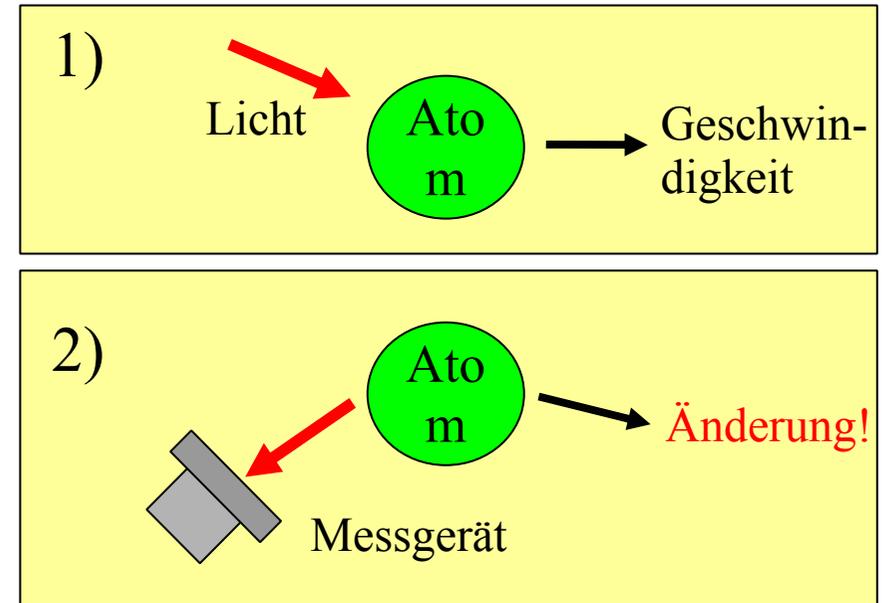
Quantenmechanische Objekte
haben Wellen- und Teilcheneigenschaften

Unschärferelation

Bestimmte Größen sind nicht gleichzeitig genau messbar:

z.B. Ort und Geschwindigkeit eines Atoms:

- ▶ Um den Ort zu messen, braucht man eine Wechselwirkung, etwa etwa mit Licht
- ▶ Dabei wird Geschwindigkeit unkontrollierbar verändert



Mathematische Beschreibung:

$$\Delta x * \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

Δx : Unsicherheit des Orts

Δp : Unsicherheit des Impulses

\hbar : Plancksches Wirkungsquantum
(Naturkonstante)

Wahrscheinlichkeitsinterpretation

Klassische Mechanik:

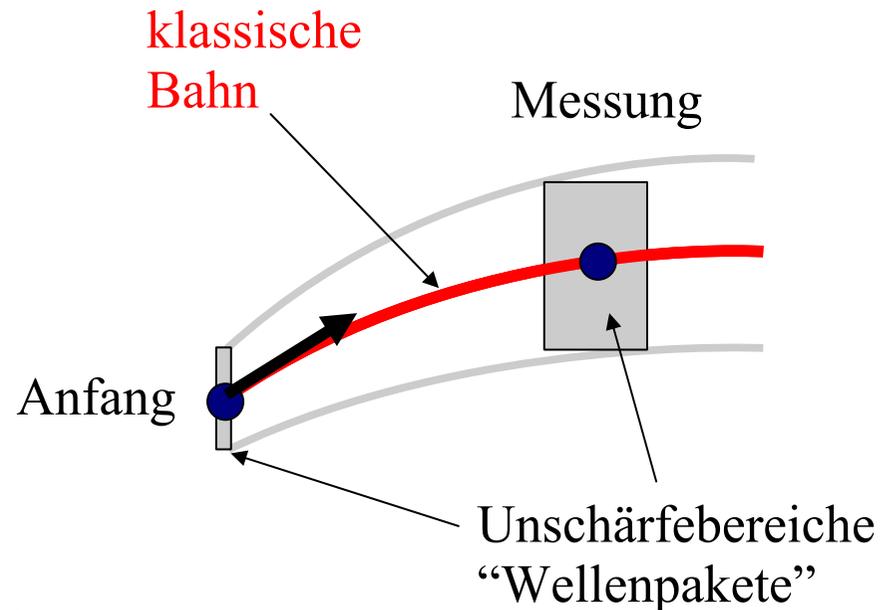
- ▶ Für bekannte Anfangsbedingung lässt sich (im Prinzip) Bewegung exakt vorhersagen

Quantenmechanik:

- ▶ Anfangsbedingung können nicht exakt angegeben werden
- ▶ Bahn kann nur in gewissen Unschärfegrenzen vorhergesagt werden
- ▶ Für jede mögliche Bahn kann eine Wahrscheinlichkeit berechnet werden

Zusammenhang mit Experimenten:

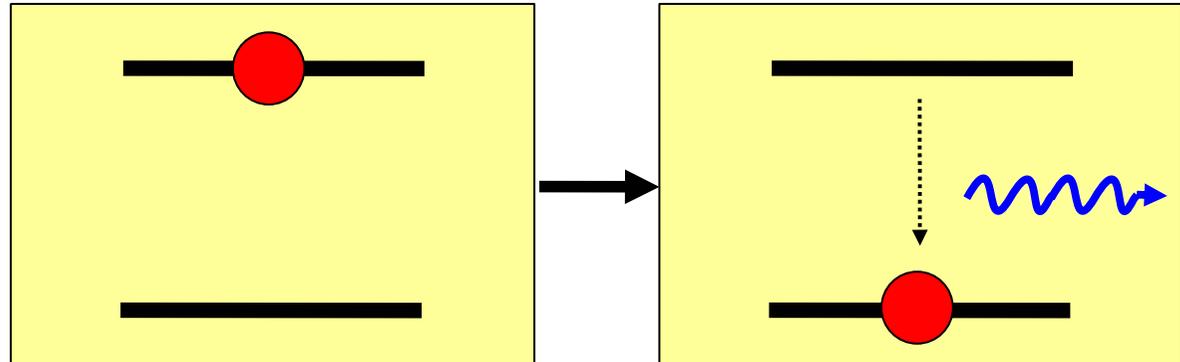
- ▶ Bei klassischen Objekten ist Wahrscheinlichkeit der klassischen Bahn groß, alle anderen Bahnen vernachlässigbar klein
- ▶ Bei quantenmechanischen Objekten kann für jedes Messergebnis eine Wahrscheinlichkeit berechnet werden



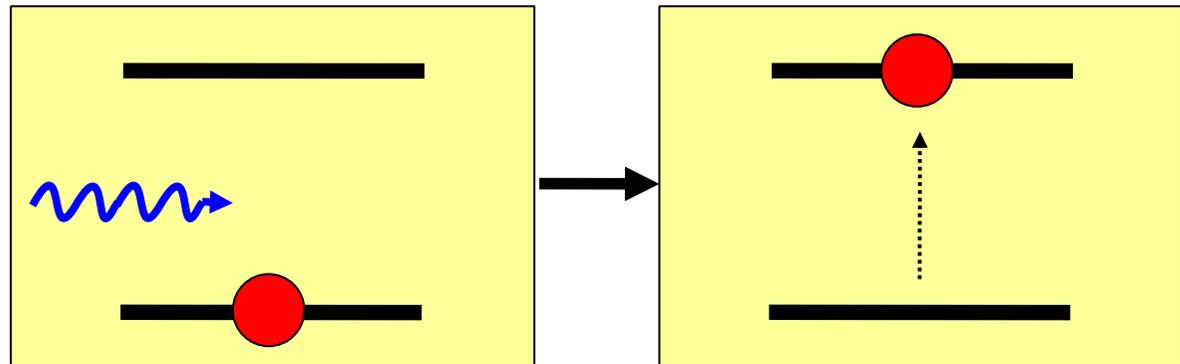
Atom-Licht-Wechselwirkung

Drei grundlegende Prozesse:

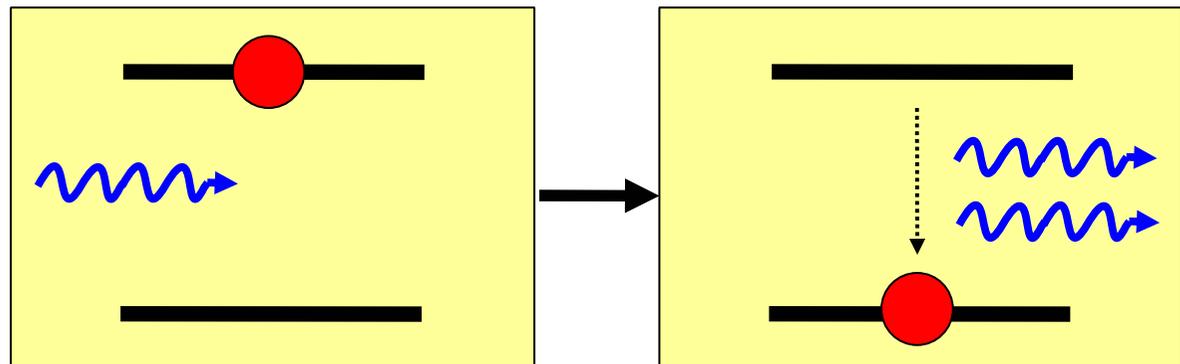
▶ Spontane Emission



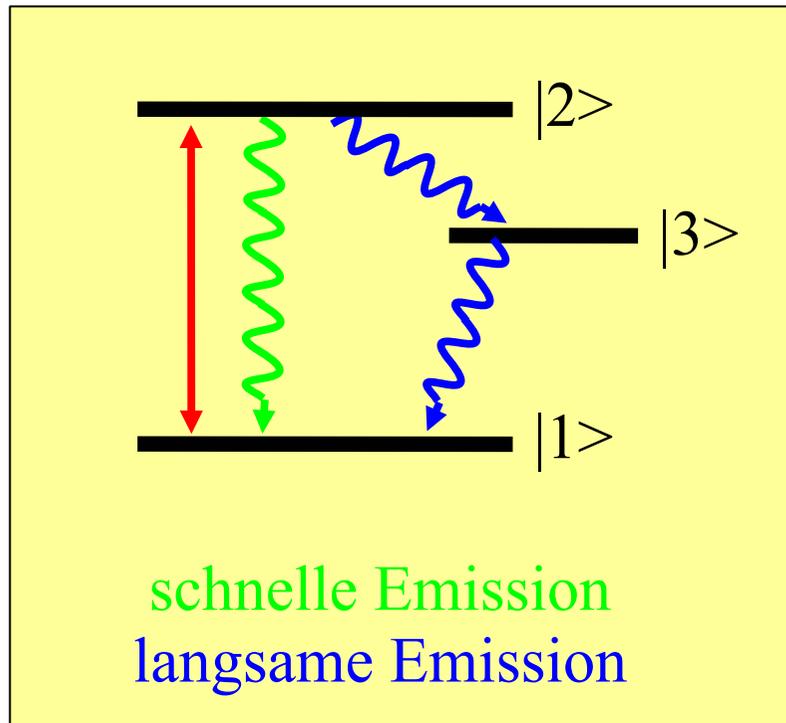
▶ Absorption



▶ Induzierte Emission
(Laser)

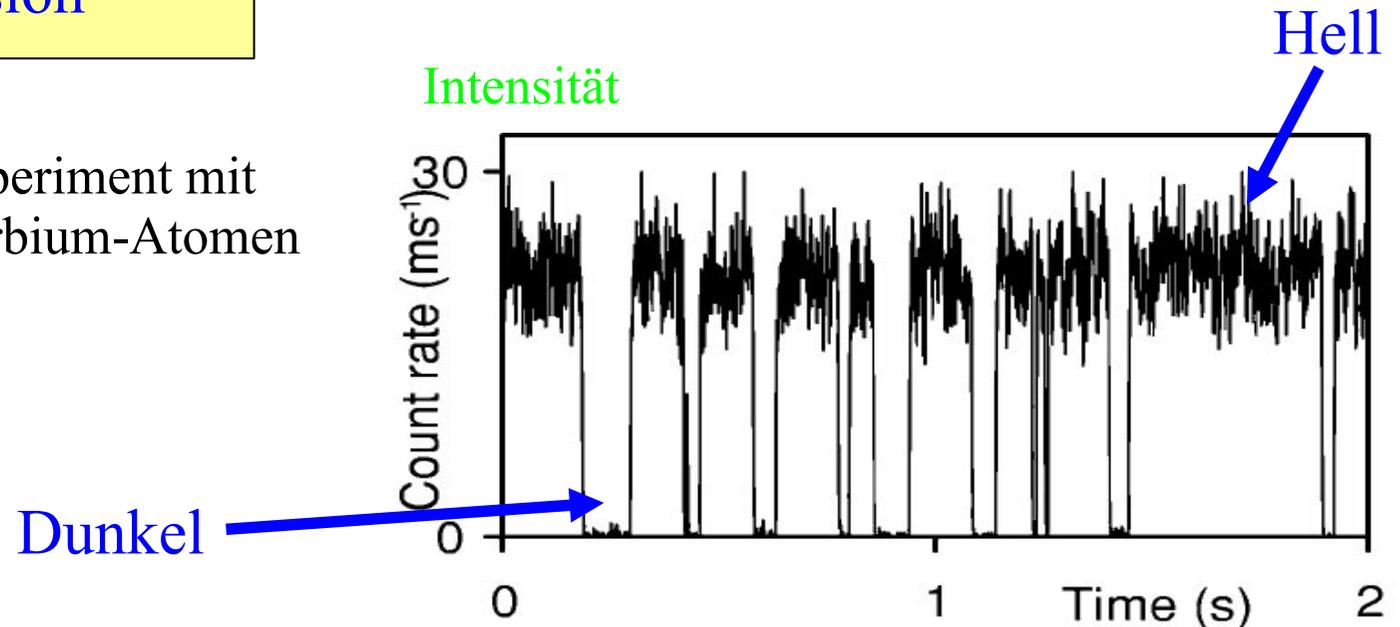


“Verstecken” von Elektronen



- ▶ Atom in $|1\rangle$ oder $|2\rangle$
Laser “sieht” das Elektron
Normale Emission $|2\rangle \rightarrow |1\rangle$
“Hell”-Phase
- ▶ Atom in $|3\rangle$
Laser “sieht” das Elektron nicht
Keine Emission $|2\rangle \rightarrow |1\rangle$
“Dunkel”-Phase

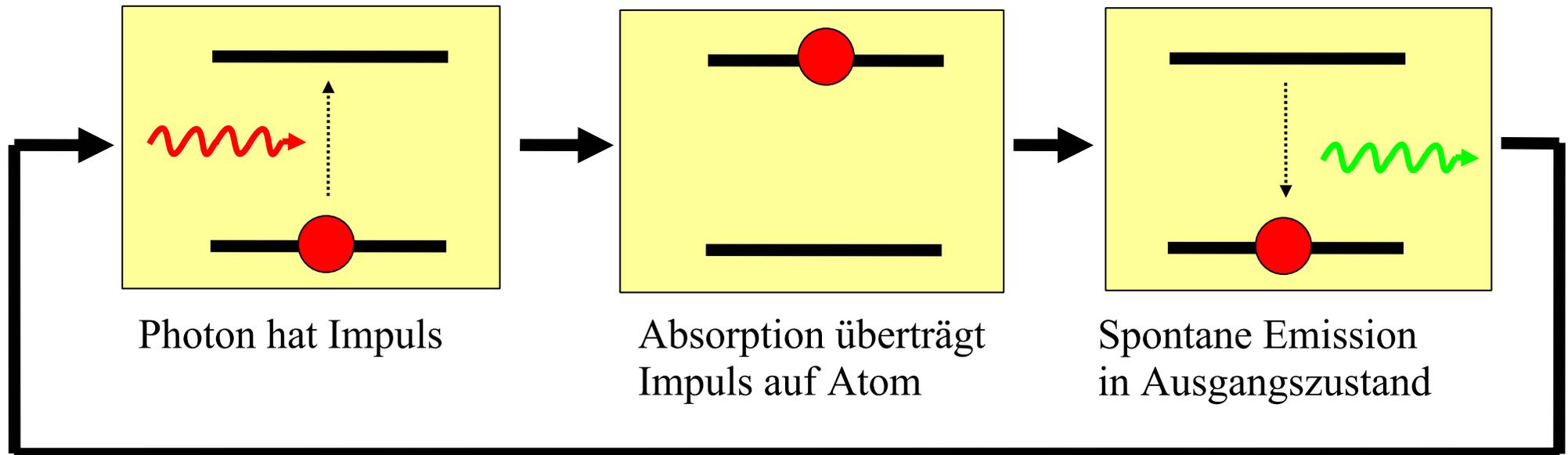
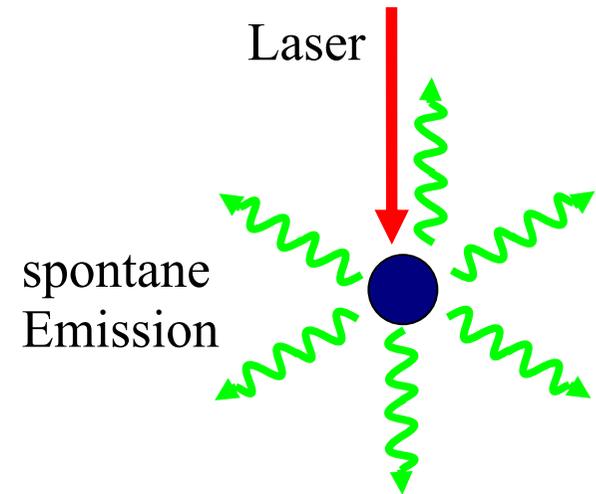
Experiment mit
Ytterbium-Atomen



Mechanische Lichtkräfte

Licht kann ein Atom bewegen:

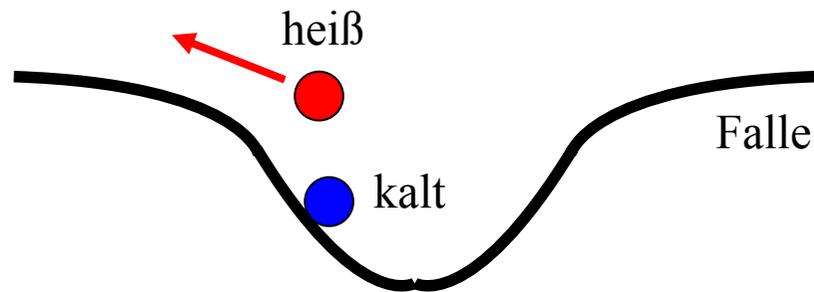
- ▶ Jede Absorption oder Emission eines Photons ändert Geschwindigkeit des Atoms
- ▶ Laser: immer in eine Richtung
- ▶ Spontane Emission: zufällig verteilt, im Mittel keine Geschwindigkeitsänderung
- ▶ Häufige Wiederholung gibt messbaren Effekt



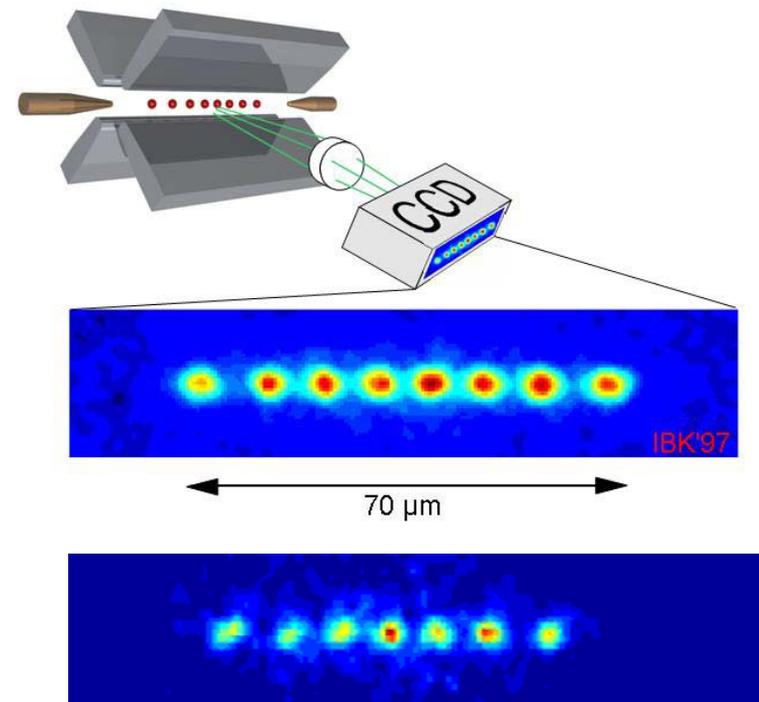
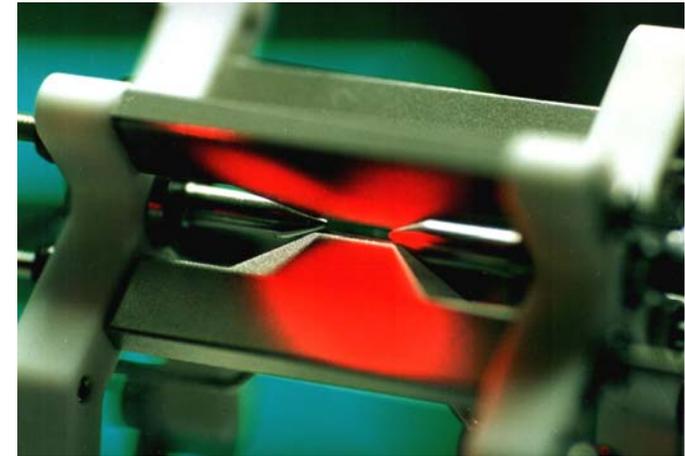
Laserkühlung

Abkühlen Atomen:

- ▶ Kühl bedeutet: Möglichst wenig Bewegung
- ▶ Geschickte Anwendung von Lichtkräften kann Atome oder Ionen abbremsen
- ▶ Langsame Teilchen können gefangen werden

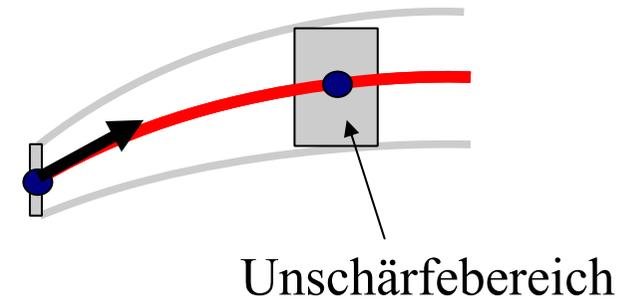
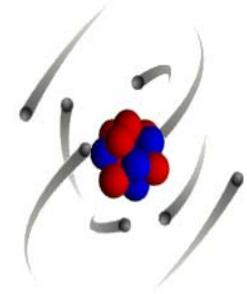


Sehr gute Kontrolle -
ideale Voraussetzungen
für Experimente



Zusammenfassung

- ▶ Quantenmechanik ist eine Theorie zur Beschreibung mikroskopischer Objekte, z.B. Atome, Moleküle, Licht
 - Viele moderne Experimente nur durch QM verständlich
- ▶ Vorhersagen und Beobachtungen, die kein klassisches Äquivalent haben
 - Welle-Teilchen-Dualismus
 - Unschärferelation
 - Wahrscheinlichkeitsinterpretation
 - ...
- ▶ Diese Effekte ermöglichen viele neue Anwendungen
 - Unterhaltungselektronik
 - Kommunikation
 - Medizin
 - Quantencomputer
 - ...



Laser und
Glasfasern