

# 100 Jahre Quantentheorie – die Welt der Wellen und Teilchen

## Quantenphysik?

*... ich denke, ich kann davon ausgehen, daß niemand die Quantenmechanik versteht*

RICHARD FEYNMAN, Nobelpreisträger

*25 Prozent des Bruttosozialproduktes kommt von Technologien, die wesentlich auf der Quantentheorie beruhen*

LEON LEDERMANN, Nobelpreisträger

*Ich weiß nur, dass ein Quant klein ist. Auch wenn die Leute immer große Sprünge meinen, wenn sie von Quantensprüngen reden*

FRIEDHELM R., Informatiker

- Max Planck und die Geburt der Quantentheorie
- Wellen und Teilchen
- Ausgewählte 'Paradoxien' und Anwendungen

# Die Geburt der Quantentheorie

Vorherrschende Meinung bis nach 1900:

*Die wichtigsten Grundgesetze und Grundtatsachen der Physik sind alle schon entdeckt, und diese haben sich bis jetzt so fest bewährt, daß die Möglichkeit, sie wegen neuer Entdeckungen beiseite zu schieben, außerordentlich fern zu liegen scheint.*

A. MICHELSON 1903

≥ 1900 : Erklärung der Hohlraumstrahlung →

Geburt der Quantentheorie

14. Dezember 1900: DPG-Vortrag von MAX PLANCK

*Kurzum zusammengefasst kann ich die ganze Tat einen Akt der Verzweiflung bezeichnen*

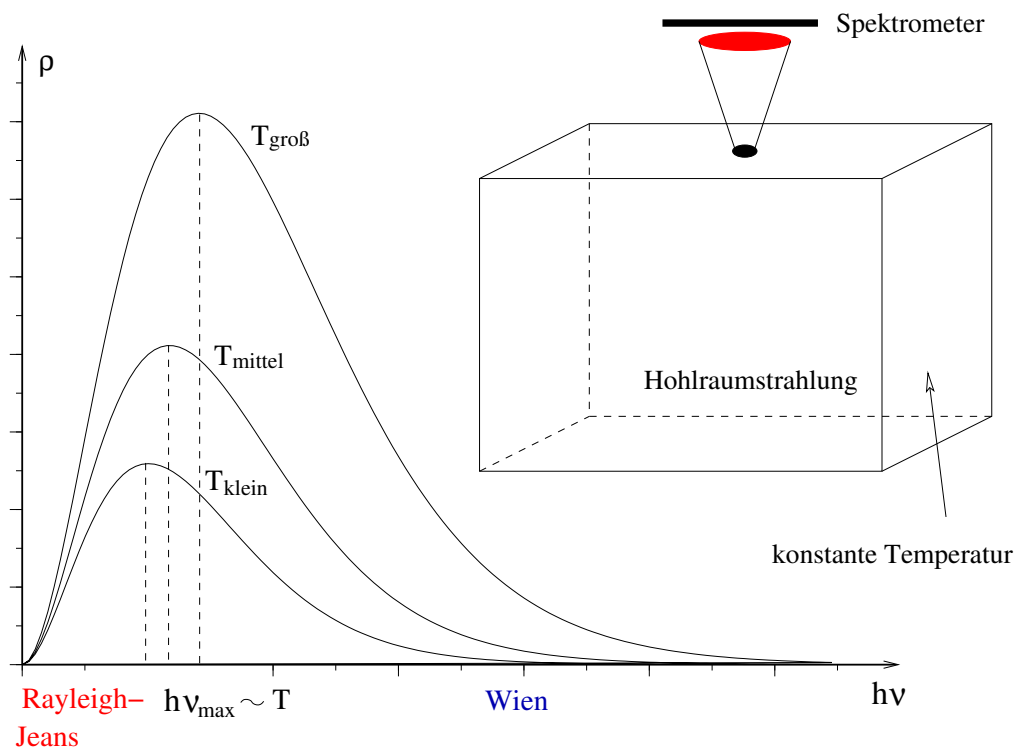
MAX PLANCK, 1931

100 Jahre Quantenphysik, Phys. Blätter 12/2000

# Das Problem mit der Hohlraumstrahlung

Glühender Stahl: rot  $\rightarrow$  weiss  $\rightarrow$  bläulich; Spektrum der Strahlung hängt von Temperatur des Körpers ab.

Elektromagnetische Strahlung in einem Hohlraum mit Platin-Iridium Wänden  $\sim$  *Hohlraumstrahlung*



ED+TD: spektrale Energiedichte der Strahlung:

$$u(T, \nu) = \nu^3 f\left(\frac{\nu}{T}\right) \quad \text{was ist universelles } f??$$

*Es wäre erhebend, wenn wir die Gehirnsubstanz auf eine Waage legen könnten, die von den theoretischen Physikern auf dem Altar dieser universellen Funktion  $f$  hingeopfert wurde; und es ist dieses grausamen Opfers kein Ende abzusehen! Noch mehr: auch die klassische Mechanik fiel ihr zum Opfer, und es ist nicht abzusehen, ob Maxwells Gleichungen der Elektrodynamik die Krisis überdauern werden, welche diese Funktion  $f$  mit sich gebracht hat.*

A. EINSTEIN, 1913

W. WIENS Vorschlag:

$$u(T, \nu) = \frac{8\pi\nu^3}{c^3} \cdot h\nu \cdot \exp(-h\nu/kT).$$

Bis Ende 1899 mit Experimenten vereinbar

O. LUMMER UND E. PRINGSHEIM (19.9.1999): systematische Diskrepanz zu Experimenten im langwelligen Strahlungsbereich (4-8,5  $\mu\text{m}$ ).

F. KURLBAUM UND H. RUBENS: Gravierende Abweichungen vom Wienschen Strahlungsgesetz (bis 50  $\mu\text{m}$ ).

RAYLEIGH UND JEANS (Juni 1900): Elektrodynamik  
+ Gleichverteilungssatz  $\implies$

$$u(T, \nu) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT$$

Sehr gut begründet, stimmt bei großen Wellenlängen.

Wiensches Gesetz  $\iff$  Rayleigh-Jeans Gesetz

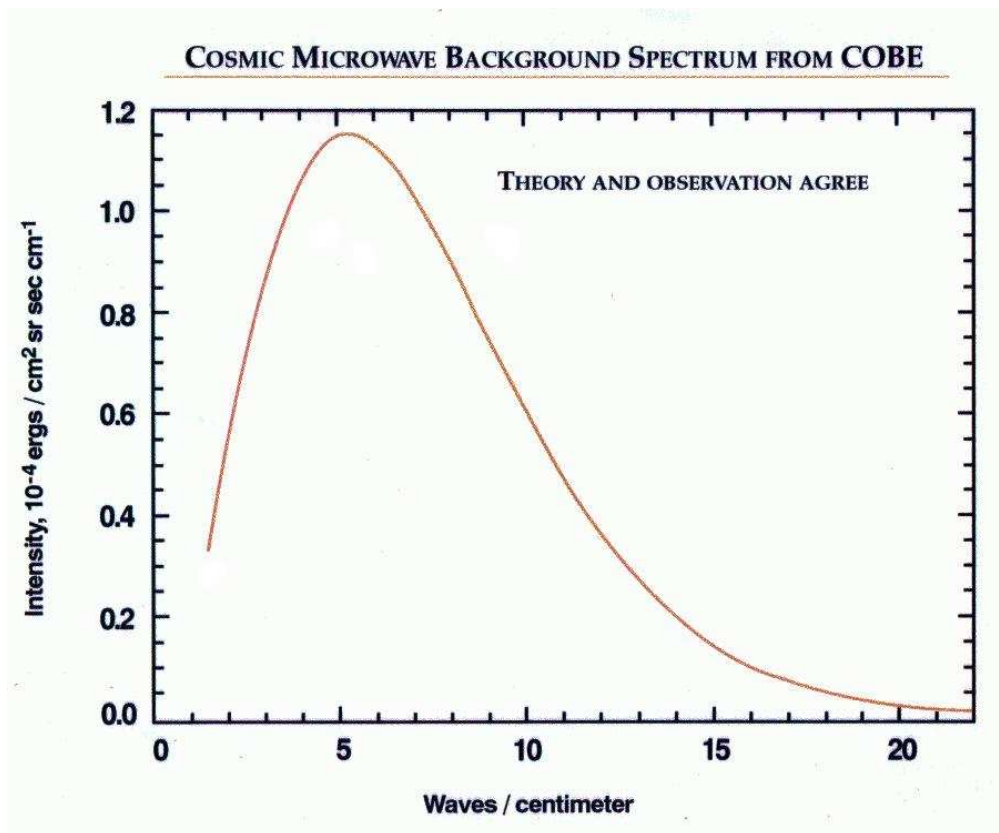
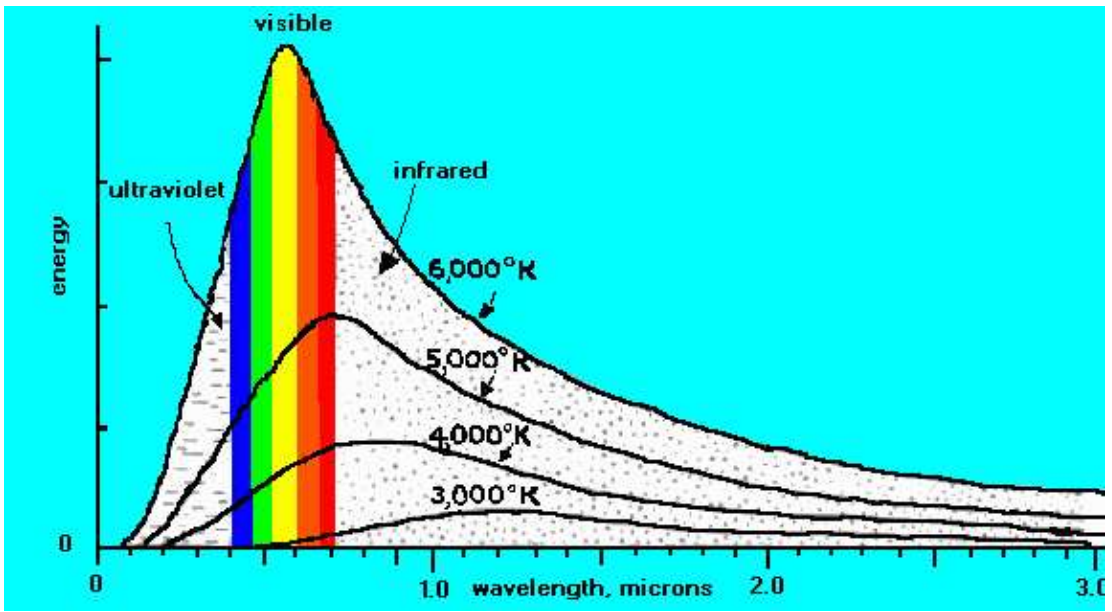
MAX PLANCK: Akt der Verzweiflung (14.12.1900):  
Interpolation

$$u(T, \nu) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$$

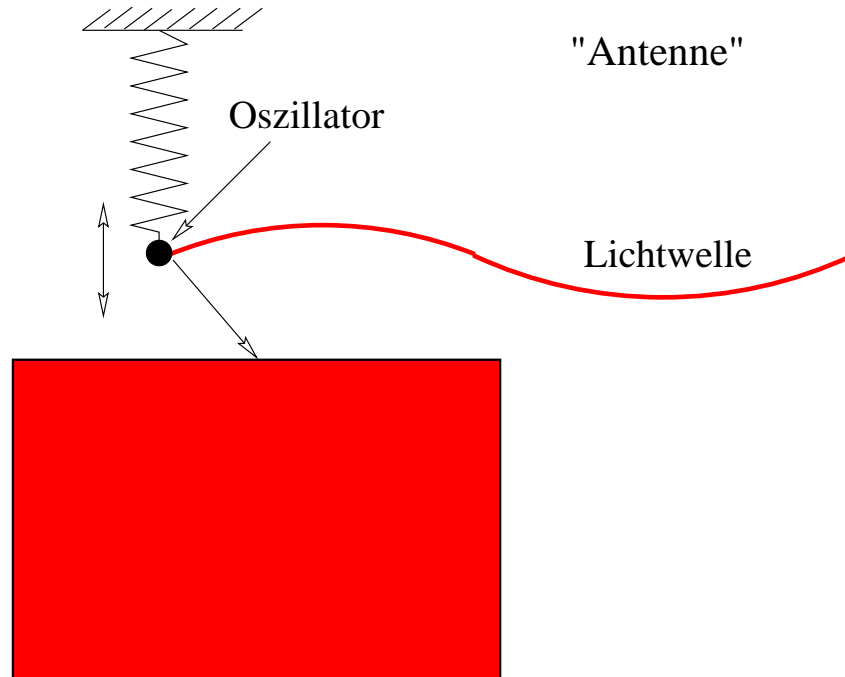
Zur experimentellen Überprüfung empfohlen! Perfekte  
Übereinstimmung

Idealer schwarzer Körper: unser Universum; *kosmische  
Hintergrundstrahlung*  $T = 2.726$  K

Erklärung  $\longrightarrow$  Quantentheorie



Materie in Wand: Ansammlung von Oszillatoren → Wechselwirkung von Lichtwellen mit Oszillator



Annahme: Oszillator tauscht nur quantisierte Energien mit Strahlungsfeld aus

$$E = nh\nu, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ Js}, \quad \text{Wirkungsquantum}$$

grünes Licht  $\sim 3 \cdot 10^{-19}$  Joule.

*...koste es was es wolle, ein positives Resultat herbeiführen wollte, PLANCK*

EINSTEIN (1905): Natürliche Erklärung wenn sich Licht verhält als ob es in lokalisierten Päckchen (*Photonen*) innerhalb des Lichtstrahls transportiert wird.

$$\text{Energien} \quad E = nh\nu, \quad n = 0, 1, 2 \dots$$

Etwa 300 Jahre nach Newton:

Wiederaufleben des Teilchenbildes des Lichts

Erklärung von

- Photoelektrischer Effekt (1905)  
Elektronen werden durch kleine Energiepakete herausgeschlagen  $E = h\nu$
- Comptoneffekt  
Licht besteht aus Teilchen (Photonen)

$$\text{Impuls:} \quad \vec{p} = \hbar\vec{k}, \quad \hbar = h/2\pi.$$

Interferenzversuche: Licht verhält sich wie eine *Welle*  
Photoeffekt: Licht verhält sich wie *Teilchenstrom*

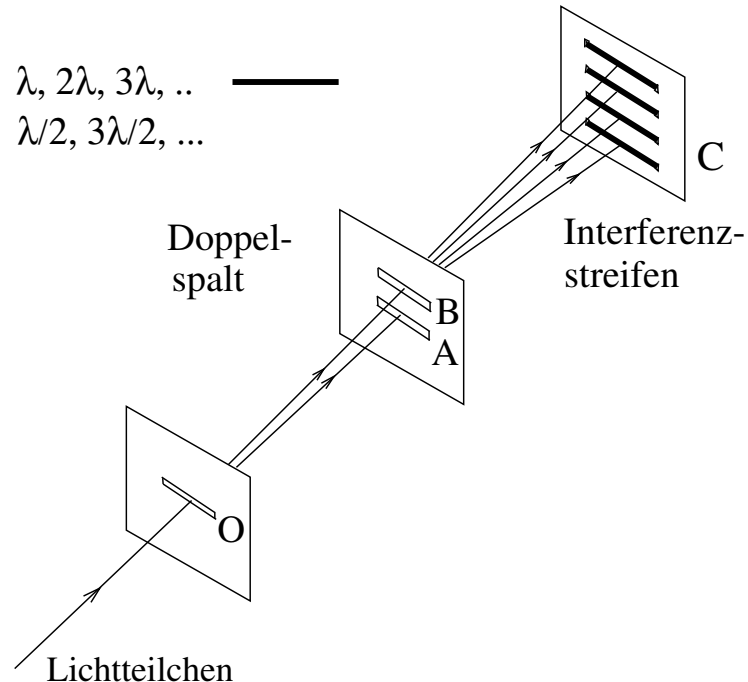
Teilchen? Welle? oder beides?



# Interferenzversuche mit Licht

$$\Delta l = \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots \quad \text{---}$$

$$\Delta l = \lambda/2, 3\lambda/2, \dots$$

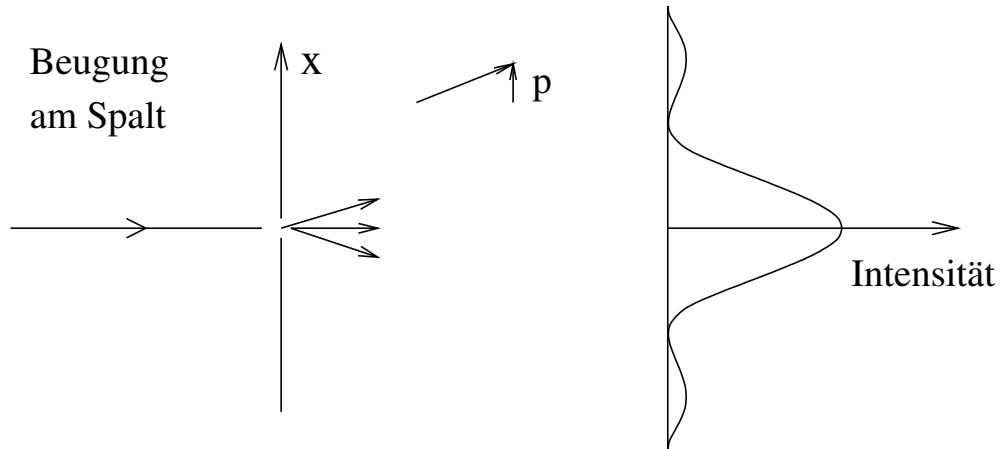


Photonenstrom: wie entsteht Interferenzmuster? Durch welchen Spalt? wechselwirken Photonen?  
schwaches Licht: einzelne Punkte sichtbar, Muster wird aufgebaut, spalten sich Photonen? schaut man nach, dann verschwindet Interferenz

*Welle-Teilchen-Dualismus:*

Licht geht als Photon durch einen Spalt, wenn wir nachweisen welchen Spalt es passiert; es tritt als Welle durch beide Spalte, wenn wir ein Interferenzexperiment machen

# Heisenbergsche Unschärferelation



Spaltbreite  $\rightarrow$  Ortsunschärfe  $\Delta x$   
Interferenzbreite  $\rightarrow$  Impulsunschärfe  $\Delta p$

$$\text{Unschärferelation} \quad \Delta x \cdot \Delta p \geq h/4\pi.$$

Welle-Teilche-Dualismus  $\rightarrow$  Unschärferelation  $\rightarrow$

Der Genauigkeit jeder *gleichzeitigen Messung* zweier physikalischer Größen wie Ort und Impuls eines Photons sind prinzipielle Grenzen gesetzt.

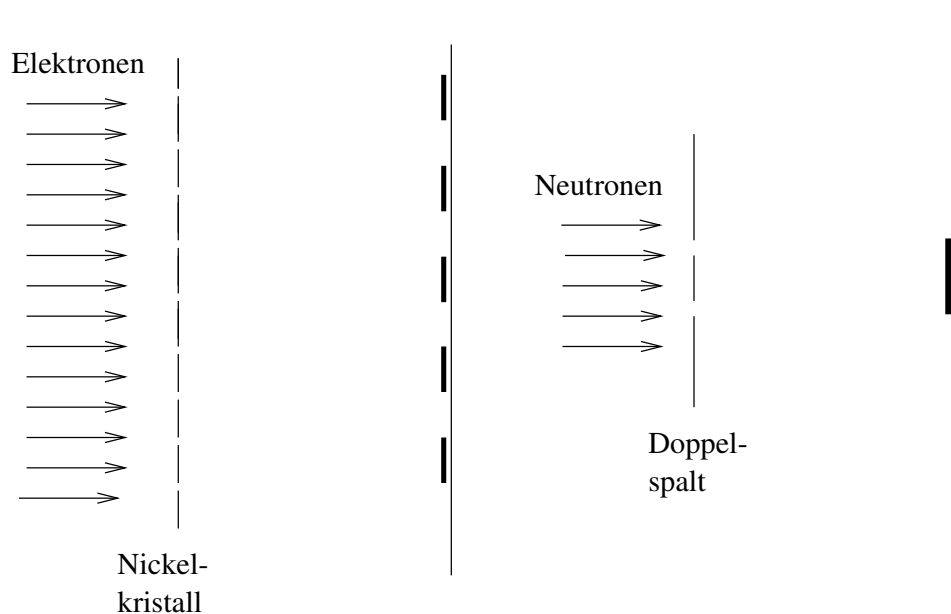
Die Quantenmechanik setzt der Genauigkeit von Messungen eine *grundsätzliche Schranke*.

# Materiewellen

Neutronen, Protonen, Elektronen, ...: Teilchen?

L. DE BROGLIE (1924): Wenn sich Lichtwellen manchmal wie Teilchen verhalten, könnte es dann sein, daß Teilchen wie *Elektronen manchmal Welleneigenschaften aufweisen?*

G.P. Thomson; Davisson und Germer:

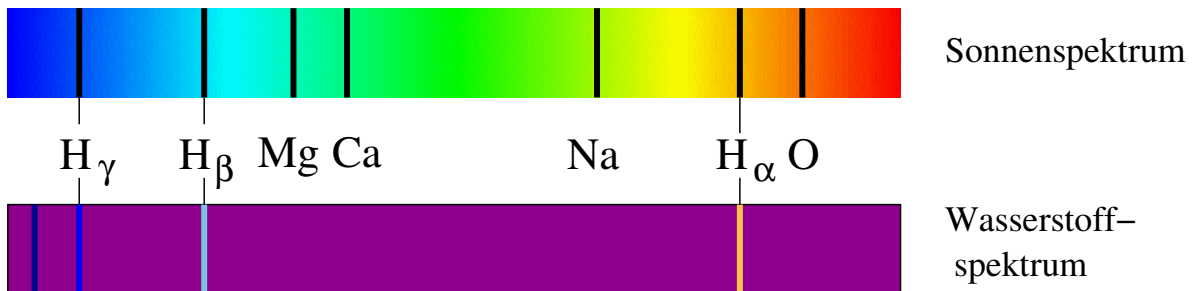


$$p = h/\lambda \quad , \quad \Delta x \cdot \Delta p \geq h/4\pi$$

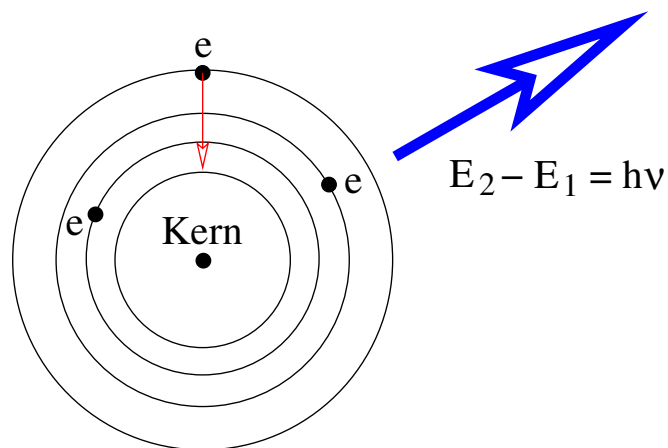
Thomson senior (*e/m* 1897) bekam den Nobelpreis, weil er gezeigt hatte, daß das Elektron ein Teilchen ist, und Thomson junior dafür, daß es eine Welle ist.

# Atomphysik

Atome absorbieren/emittieren Licht (Strahlung) mit charakteristischen Frequenzen → atomare Spektren.

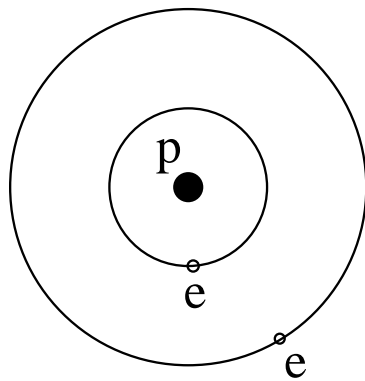


## Bohrsches Atommodell (1913)



- Nur ausgewählte klassische Bahnen realisiert
- Diese sind stabil

Welche Bahnen sind erlaubt?



Fliehkraft = Coulombkraft

$$p = p(r) = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{de Broglie}}}{h/\lambda}$$

- Übergänge  $\rightarrow$  elm. Strahlung  $\Delta E = h\nu$
- Bohr Atom  $\leftrightarrow$  Hohlraumstrahlung  
Strahlungsübergänge ( $\rightarrow$  Laser)
- Nach ersten Erfolgen: zunehmende Probleme  
Zahlenmystik, keine wirkliche Theorie

## Neue Quantenmechanik

WERNER HEISENBERG (1925):

klassische Größen  $\rightarrow$  Größen in Quantenmechanik

$$x, p, xp = px \longrightarrow \hat{x}, \hat{p}, \hat{x}\hat{p} - \hat{p}\hat{x} = \frac{h}{4\pi}$$

$\hbar$  misst Abweichung von klassischer Physik.

## Unschärferelation (Unbestimmtheitsrelation)

$$\Delta \hat{x} \cdot \Delta \hat{p} \geq \frac{\hbar}{2}$$

Harmonischer Oszillator:

$$E = \frac{1}{2m} \hat{p}^2 + \frac{m\omega^2}{2} \hat{x}^2 \geq \frac{h\nu}{2} = E_0$$

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2}\right) h\nu$$

Spektren der Atome, Moleküle, . . .

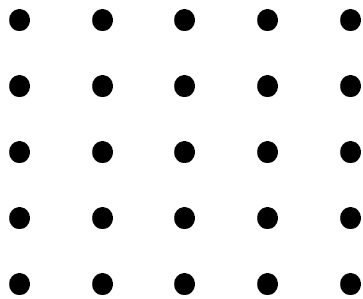
LOUIS DE BROGLIE, ERWIN SCHRÖDINGER (1923,26)  
Elektronen in Atomen  $\sim$  Wellen:

- spezifische Wärme von Festkörpern

...

## Alte Quantentheorie

- EINSTEIN (1907): Energie der Gitterteilchen (Oszilatoren) im Festkörper ist gequantelt,  $E_n = nh\nu \implies$



$$\langle E \rangle = \frac{h\nu N}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} \longrightarrow c_V$$

- Auftakt zur Quantenelektronik (1916)
- Comptoneffekt