

# Theoretische Physik II: Quantenmechanik I

- Dozent: Holger Stark, EW 709, Tel: 29623  
email: Holger.Stark@tu-berlin.de  
<http://www.itp.tu-berlin.de/stark>
- Zeit: Di: 8<sup>30</sup>-10<sup>00</sup>  
Mi: 8<sup>30</sup>-10<sup>00</sup> } EW 201
- grobe Inhaltsangabe:
  - I. Die Entwicklung der Quantentheorie (QT)
  - II. Der formale Rahmen der QT
  - III. Anwendungen der QT
- Voraussetzung: Mathematische Methode der Physik } Vorlesungsaufschrieb  
Mechanik } → Internet  
Mathematik-Vorlesung
- Literatur: → Webseite
- Webseite: [www.itp.tu-berlin.de/stark/](http://www.itp.tu-berlin.de/stark/) → Lehre
- Übungen: WMs: Judith Lehnert  
Max Schmitt  
Andreas Zöttl  
Tutoren: ?  
Details: s. Webseite  
Vorstellung am Mittwoch
- Achtung: Vorlesungsaufschrieb ≠ Skript!
- Wiederholer: „ $\delta$ -Funktion“ → Mechanik, WS 11/12: 15.11.11

## I. Die Entwicklung der Quantenmechanik

• Quanten Theorie (QT): modernerer Ausdruck als Quantenmechanik (QM)

QM: Entwicklung aus der Mechanik heraus

• Ende 19. Jh: abgeschlossenes System der klass. Physik  
klass. Mechanik, E.-dynamik, Thermodynamik,  
statistische Mechanik

Beginn 20. Jh: „Erschütterungen“

(i) Lichtausbreitung paßt nicht in Rahmen der klass. Mechanik

→ Spezielle Rel. Theorie (SRT) (s. Mechanik Vorlesung)

$c = \text{konst. in jedem Inertialsystem}$

→ Lorentztrafo

→ relativ. Mechanik

(ii) Hinweise: klass. Physik versagt im atomaren, mikroskopischen  
Bereich (Längen  $\leq 1 \text{ nm}$ )

→ **Quantentheorie mit Welle-Teilchen-Dualismus**

Energie wird in Energie-  
quanten / portionen auf-  
genommen, nicht kontinuierlich

klass. Teilchen / Wellen  
gibt es nicht

Teilchen haben Wellencharakter  
„Wellen“ Teilchencharakter

→ Heisenbergsche Unschärfe-  
relation

1. Erinnerung: Mechanik relativistischer Teilchen

• Impuls:

$$\mathbf{p} = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \mathbf{v} \quad (1.1)$$

geschn. abh. Impuls-  
masse:  $\rightarrow \infty$  für  $v \rightarrow c$

$m \dots$  Ruhemasse

Energie:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (1.2)$$

...  $E \rightarrow \infty$  für  $v \rightarrow c$ , also:  $v=c$  nicht erreichbar für  $m \neq 0$

• Umkehrreibung:

(i) (1.2)  $\xrightarrow{(1.1)}$   $E = \sqrt{m^2 c^4 + p^2 c^2} \quad (1.3)$

Beweis: Übungen

(ii) nichtrelativ. Grenzfall:  $v \ll c \rightarrow p \ll mc$

(1.3)  $\rightarrow$   $E = mc^2 + \frac{p^2}{2m} \quad (1.4)$

Beweis: Übungen

(iii) Geschwindigkeit:

$$\underline{v} = \underline{\nabla}_p E \quad (1.5)$$

$$[v_{gr} = \underline{\nabla}_k \omega(\underline{k})]$$

mit  $\underline{\nabla}_p = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial p_1} \\ \frac{\partial}{\partial p_2} \\ \frac{\partial}{\partial p_3} \end{pmatrix}$

Beweis: s. Übungen

## 2. Das Versagen der klass. Physik & Welle-Teilchen-Dualismus

- Krise der klass. Physik
- & neue Konzepte

### 2.1 Licht als Teilchen

- E-dynamik: Licht  $\equiv$  em. Welle:  $\left. \begin{aligned} \underline{E}(\underline{r}, t) &= \text{Re} \left[ \underline{E}_0 e^{i(\underline{k} \cdot \underline{r} - \omega t)} \right] \\ \underline{B}(\underline{r}, t) &= \text{Re} \left[ \underline{B}_0 e^{i(\underline{k} \cdot \underline{r} - \omega t)} \right] \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{ebene} \\ \text{Welle} \end{array}$

$\underline{k}$  ... Wellenvektor  
 $k = |\underline{k}|$  ... Zahl  
 $\omega$  ... Kreisfrequenz

$$\omega = c k \quad (2.1)$$

... Dispersionsrelation

NB:  $\nu = \frac{\omega}{2\pi}$  .. Frequenz  
 $\lambda = \frac{2\pi}{k}$  .. Wellenlänge

$$c = \lambda \nu \quad (2.2)$$

... wird hier nicht verwendet

- (i) Beugung am Einzel-/Doppelspalt, Gitter
  - (ii) Bragg-Reflexion von Röntgenstrahlen am Kristall [→ Festkörperphysik]
- Interferenz  
zweier Wellen

$$\underline{E} = \underline{E}_1 + \underline{E}_2$$

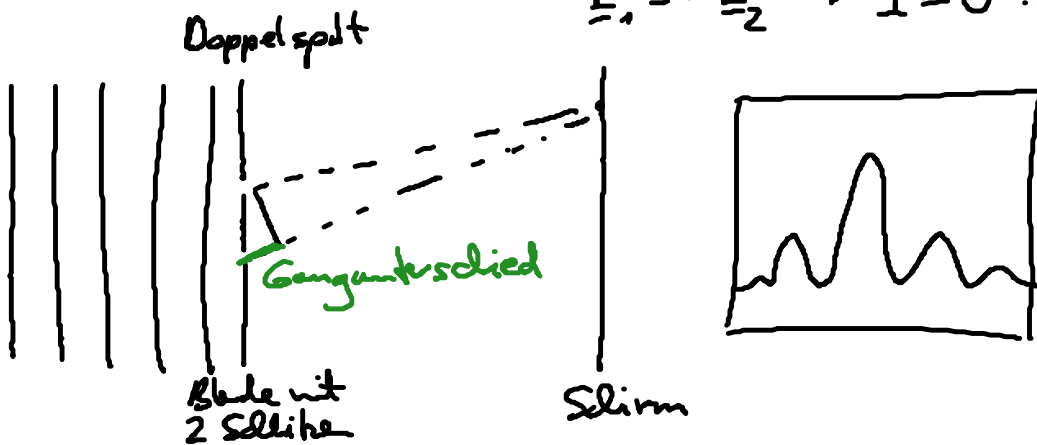
$$\rightarrow I = \underline{E}^2$$

$$= \underline{E}_1^2 + 2\underline{E}_1 \cdot \underline{E}_2 + \underline{E}_2^2$$

Intensität ... Meßgröße auf Schirm

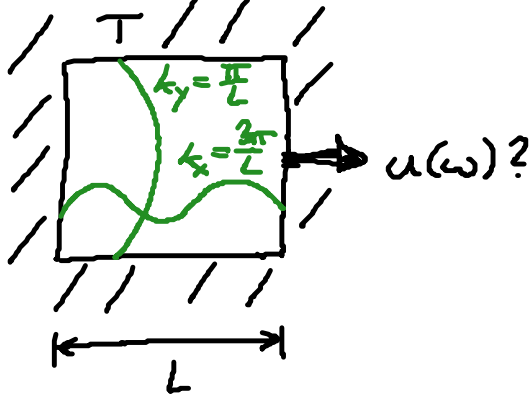
also:  $\underline{E}_1 = \underline{E}_2 \rightarrow I = 4\underline{E}_1^2$  ... konstruktiv

$\underline{E}_1 = -\underline{E}_2 \rightarrow I = 0$  ... destruktiv



# a) Hohlraumstrahlung

- Hohlraum bei Temp.  $T$ : (schwarzer Körper)



Strahlungsgleichgewicht  
(Absorption = Emission von Wänden)

→ stehende Lichtwellen

(1) Wellenvektor:  $\underline{k} = \frac{\pi}{L} (n_x, n_y, n_z)$   
 $n_i = 1, 2, \dots$

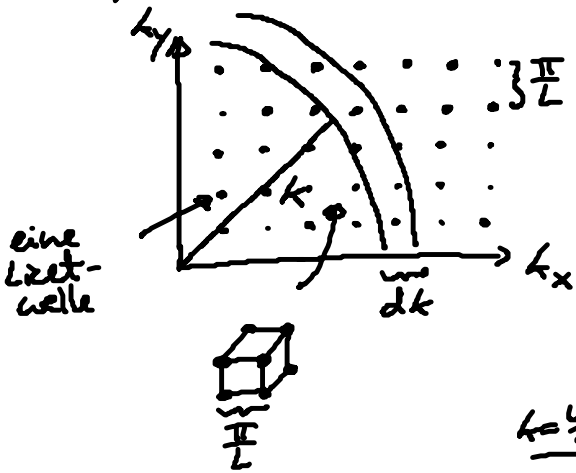
(2) Energie des Lichtfeldes:

in  $[\omega, \omega + d\omega]$ :  $\underbrace{u(\omega)}_{\text{Energie pro Volumen}} L^3 d\omega$

• Klass. Berechnung:  $u(\omega) L^3 d\omega =$  Anzahl  $N$  stehender Wellen in  $[\omega, \omega + d\omega]$   $\times$  mittlere Energie

(1) (2)

(1) mit  $\omega = ck$ ,  $N$  in  $[k, k + dk]$ ?



Quasi-Kontinuum für  $k \gg \frac{\pi}{L}$

also:

$$N = \frac{\frac{1}{8} \text{Vol. Kugelschale}}{k\text{-Raum-Vol. pro Zustand}} \times \underbrace{2}_{\text{Lichtpolarisation}}$$

$$= \frac{2}{8} \frac{4\pi k^2 dk}{\left(\frac{\pi}{L}\right)^3}$$

$k = \frac{\omega}{c}$   
 $dk = \frac{1}{c} d\omega$

$$N = \frac{L^3}{\pi^2 c^3} \omega^2 d\omega$$