



**Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg**
Maschinenbau und Produktion



Quantenoptik

Experimentalphysik
Ulrich Stein



**Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg**
Maschinenbau und Produktion




Quantentheorie


1900: Max Planck
Strahlungsformel
zur Erklärung der Hohlraumstrahlung

Atomphysik
1905: Einstein - Lichtquantenhypothese
1913: Bohrsches Atommodell, Sommerfeld

Quantenmechanik
1925: Heisenberg, Pauli, Schrödinger, Born, Dirac,
Bohr/Einstein, Feynman, Bell, Aspect, Zeilinger, ...



**Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg**
Maschinenbau und Produktion



Lichtspektrum

Ursache
e⁻-Übergänge zwischen Atom-Niveaus

1. Diskretes Spektrum:
Gase

H₂
Ne
Na




**Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg**
Maschinenbau und Produktion



Lichtspektrum (2)

2. Kontinuierliches Spektrum:
Festkörper, Flüssigkeiten

Analyse: Spektrometer




Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion

Quantenoptische Phänomene

- Wärmestrahlung
- Photo-Effekt
- Compton-Effekt
- Materiewellen

→ Phänomene nicht erklärbar durch
Geometrische oder Wellen-Optik



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion

1. Wärmestrahlung

Wärmeinhalt von Festkörpern
→ Abstrahlung elektro-magnetischer Wellen

Frage: Welche Wellenlängen
bzw. Frequenzen ?

Spektrales Emissionsvermögen:

$E_{\lambda}(T)$: abgestrahlte Leistung
pro Flächeneinheit
im Wellenlängenbereich



Hohlraumstrahler

Schwarzer Körper

Idee: Bau eines Kastens,
mit definierter Temperatur,
der keine Strahlung reflektiert
(schwarz = keine Reflexion),
materialunabhängiges Spektrum,

therm. Gleichgew. im Kasten: Emission = Absorption

Gemessene spektrale Zusammensetzung $E_\lambda(T)$
stand Ende des 19. Jahrhunderts
im krassen **Widerspruch** zu allen Modellen



1900: Max Planck

Annahme:


Energie-Übertrag von Strahlung auf Wandatome
kann nur **diskrete Werte** annehmen:


Plancksche Hypothese:

$$E = nhf$$

h : Plancksches Wirkungsquantum
 $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

→ Beginn der Quantentheorie
Diskrete Werte = Atom-Niveaus („Atom-Bahnen“)



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion 

Plancksche Formel

Plancksche Strahlungsgesetz:

$$E_{\lambda}(T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1}$$


Stefan-Boltzmann-Gesetz: $E(T) = \sigma T^4$

Stefan-Boltzmann-Konstante: $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

Wiensches Verschiebungsgesetz: $\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$

Konstante: $b = 2.898 \cdot 10^{-3} \text{ m K}$



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion 

Laser

1. Induzierte (stimulierte) Emission

Induziertes Photon identisch mit anregendem Photon in Frequenz, Phase, Richtung und Polarisation.

Voraussetzung: Höhere Niveaus müssen besetzt sein



Laser (2)

2. Besetzungsumkehr

Im Normalfall sind höhere Niveaus schwächer besetzt,
d.h. Absorptionsrate ist höher als Emissionsrate.

Lösung:
Besetzungsumkehr
im aktiven Medium,
z.B. durch optisches
Pumpen

Damit wirkt die
Apparatur als
Lichtverstärker.




Laser (3)

3. Rückkopplung im Resonator

Spiegel an den Enden des aktiven Mediums
→ stehende Welle im Resonanzfall: $\lambda_n = 2 L / n$

Einer der beiden Spiegel ist schwach durchlässig,
damit ein Teil des Laser-Lichts austreten kann.




Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion

2. Photo-Effekt

Photozelle

- $I_F \sim \text{Intensität}$
- Schwellenfrequenz:
 $f < f_0 \rightarrow I_F = 0$
- $E_{\text{kin,max}} \sim f$
nicht abhängig
von Intensität



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion

1905: Albert Einstein

Annahme:

Energie der (einzelnen) Lichtquanten (Photonen)

$$E = h f$$

Austrittsarbeit: W_A

$$E_{\text{k,max}} = h f - W_A$$



Gegenspannungs-Methode


Schwellenfrequenz f_0 :

$$E_{k,\max} = hf - W_A$$



3. Compton-Effekt

Streuung von elektromagnetischer Strahlung
an schwach gebundenen Elektronen im Festkörper




Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion

Compton-Effekt (2)

Stoß zwischen Photon und Elektron

(Streuung von
el.-magn. Strahlung
an Festkörpern,
schwach gebund. e^-)

Anfang: e^- ruhend
Ende: e^- fliegt davon, Photon wird abgelenkt,
Wellenlänge des Photons ändert sich



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion


1925: A. H. Compton

Annahme:
Impuls der Lichtquanten (Photonen)


$$p = h / \lambda, \quad (\lambda f = c)$$

Keine Erklärung in klassischer Physik:
Welle hat dort keinen definierten Impuls

klassisch: Wellen sollten e^- zum Schwingen anregen,
aber keine Änderung der Wellenlänge erfahren



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion



Stoßprozess

Elastischer Stoß:


Impuls-Erhaltung: $\mathbf{p}_\gamma = \mathbf{p}_\gamma' + \mathbf{p}_{e^-}'$

Energie-Erhaltung: über $E^2 = (mc^2)^2 + (cp)^2$
relativistische Formulierung


Wellenlängen-
änderung :

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta_\gamma)$$

λ Wellenlänge vorher, λ' Wellenlänge danach
Elektronenmasse: $m_0 = 9.109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion



Absorption von γ -Strahlen

γ -Strahlung ab ca. 2.5 keV aufwärts (ca. 1000 x Licht)

Ursachen der Wechselwirkung von Strahlung mit Materie:

- **Comptoneffekt:** Stoß mit e^- in Materie
- **Photoeffekt:** e^- verlässt Atom / Molekül (Austrittsarbeit)
- **Paarbildung:** Erzeugung von e^+ und e^-



Absorption von γ -Strahlen (2)

Absorptionskoeffizient μ
ist abhängig von γ -Energie

z.B. Ruhe-Energie des e^- : $m_e \cdot c^2 = 0.511 \text{ MeV}$

Intensitätsabnahme: $I(d) = I_0 \cdot e^{-\mu d} \rightarrow \ln(I(d)/I_0) = -\mu d$

sichtbares Licht im **eV-Bereich** ($1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$),

Elementarladung: $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$



Welle-Teilchen-Dualismus

Verhalten el.-magn. Wellen

- in manchen Versuchen wie **Wellen**
- in manchen Versuchen wie **Teilchen**

d.h. die **Bilder**, die wir haben,
sind nur Näherungen an die Wirklichkeit,
abgeschaut von **makroskopischen Effekten**,
wie Wasserwellen oder Billard-Kugeln.



4. Materiewellen

Hat auch Materie Wellencharakter ?

Gilt der Welle-Teilchen-Dualismus
nicht nur für Strahlung,
sondern auch für materielle Teilchen,
wie Elektronen ?

Nachweis-Möglichkeit:
Beugung von
Materie-Strahlen



1924: de Broglie

Annahme:


Frequenz eines
materiellen Teilchens:

$$E = h \cdot f = \frac{m \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$


Wellenlänge eines
materiellen Teilchens:

$$p = h / \lambda \quad p = \frac{m \cdot v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

m = Masse, gemessen in Ruhe



**Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg**
Maschinenbau und Produktion




Bemerkungen

Makroskopische Körper


λ ist so klein, dass keine Welleneffekte beobachtbar sind (beugende Strukturen $\sim \lambda$), bzw. Teilchen wären extrem langsam

Mikroskopische Teilchen

1927: experiment. Nachweis der Beugung durch Davisson und Germer



**Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg**
Maschinenbau und Produktion



Heisenb. Unschärferelation

Welle oder Teilchen ?

Das hängt von der Präparation der Objekte ab.

gut definierte Wellenlänge λ
bzw. Impuls $p = h / \lambda$

gut definierter Ort x

Heisenbergsche Unschärferelation:

$$\Delta p_x \Delta x \geq \frac{h}{4\pi}$$