Physik- Klausur im Leistungskurs 13.2

Aufgabe 1 (70 Punkte): Linienspektren und der lichtelektrische Effekt - der Welle-Teilchen-Dualismus und die Grundlagen der Quantenmechanik

a) Vorgaben:

Bereits am Ende des 19. Jahrhunderts konnte Balmer mit seiner empirisch gefundenen Formel die Frequenzen der sichtbaren Spektrallinien im Licht einer Wasserstofflampe berechnen und lieferte damit einen wichtigen Baustein für die Entwicklung des Bohr'schen Atommodells. Durch die Verwendung von Dampflampen mit ihren diskreten Spektren war es wiederum möglich, gezielt weitere Experimente mit monochromatischem Licht ausreichender Intensität durchzuführen. So wurde der lichtelektrische Effekt beobachtet und später von Albert Einstein erklärt.

Photoeffekt:

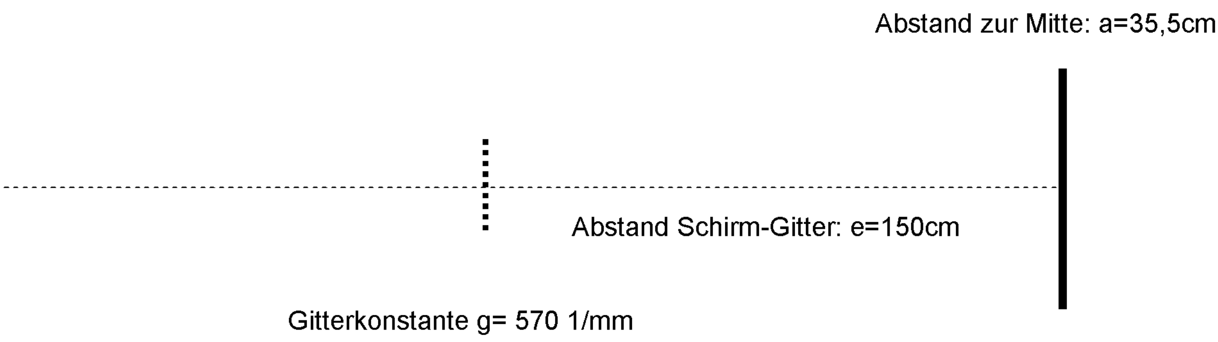
(lichtelektrischer Effekt, photoelektrischer Effekt), quantenmechanischer Vorgang, bei dem Elektronen durch Lichtabsorption aus ihrem Bindungszustand gelöst und für den elektrischen Ladungstransport verfügbar werden; im weiteren Sinn jede Art der Wechselwirkung von Photonen (Lichtquanten) mit Materie, bei der die Photonen ihre gesamte Energie abgeben; z. B. wird beim **atomaren Photoeffekt (Photoionisation)** ein Licht-, Röntgen- oder Gammaquant durch die Elektronenhülle eines freien Atoms vollständig absorbiert, wobei die Photonenenergie auf ein Elektron übergeht, das die Atomhülle verlässt. ....

Einstein:

Einstein entwickelte um 1905 die spezielle, 1915 die allgemeine Relativitätstheorie, die die moderne Physik auf neue Grundlagen stellten. ...... Seine Erklärung des äußeren Photoeffekts (1905; 1921 Nobelpreis für Physik) mithilfe der Lichtquantenhypothese trug zur Anerkennung der Quantentheorie bei, obwohl Einstein die statistische Interpretation der Quantenmechanik nie akzeptierte.

In einem Experiment soll zunächst das Linienspektrum einer Wasserstofflampe untersucht und mit diesem dann in einem zweiten Teil eine Photozelle beleuchtet werden. Dazu wird wie in der Abb. 1 dargestellt das leuchtende Wasserstoffgas mittels einer Sammellinse scharf auf einen Spalt abgebildet, welcher sich wiederum im Brennpunkt einer zweiten Sammellinse befindet. Das parallele Licht beleuchtet nun ein Strichgitter (hier im Experiment mit einer Gittekonstanten von g=570 Striche pro mm). Auf einem weit vom Gitter entfernten Schirm (e=150cm) beobachtet man links und rechts je 4 diskrete Linien unterschiedlicher Farbe neben einem hellen weißen Zentralmaximum. Am nächsten zum Zentralmaximum findet sich eine violette Linie, deren Abstand zu diesem beträgt a=35,5cm.

Abbildung 1: Aufbau des Gitterspektrometers:



Im zweiten Teil des Versuches wird nun anstelle des Schirms eine Photozelle verschiebbar so positioniert, dass mit ihr nacheinander alle 4 sichtbaren Linien im Wasserstoffspektrum abgefahren werden können. Dabei wird jeweils die Kondensatorspannung als Funktion der Zeit gemessen.

Abbildung 2: Aufbau der Photozelle:

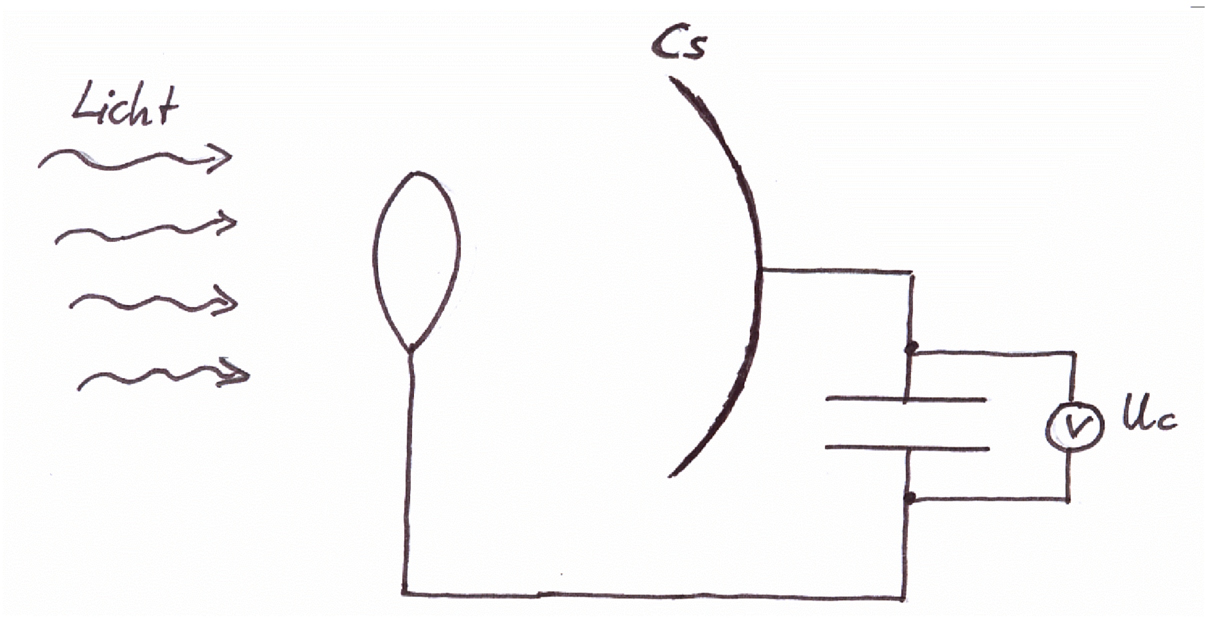
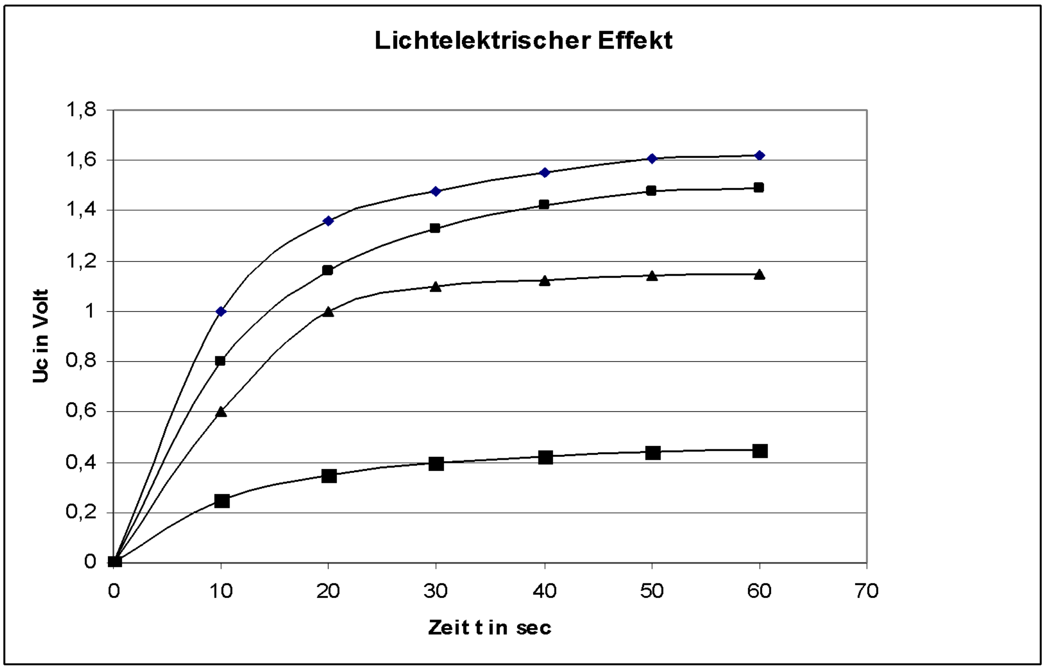


Abbildung 3: Kondensatorspannung bei Belichtung mit unterschiedlichen Wellenlängen (410nm, 434nm, 486nm, 656nm)



b) Arbeitsaufträge:

1.1 Erkläre unter Bezug auf eine geeignete Skizze, warum eine solche Anordnung wie in Abb. 1 als „Spektrometer", also zur Zerlegung von weißem Licht in seine Bestandteile und zur Bestimmung deren Wellenlängen eingesetzt werden kann. (8P)

1.2 Berechne aus obigen Werten die Wellenlänge und daraus die Frequenz des violetten Anteils im Wasserstoffspektrum. (4P)

1.3 Balmer stellte bereits 1885 seine empirisch gefundene Formel $f = C \cdot (2^{-2} - m^{-2})$ auf. Die Konstante C ergab sich aus seinen Messungen zu $C = 3{,}29 \cdot 10^{15}$Hz. Vergleiche den aus dieser Formel berechneten Wert für die violette Linie mit dem experimentellen aus 1.2 und erläutere, welcher Übergang dabei auftritt. (6P)

1.4 Nenne die Bohr'schen Postulate in Worten und als Formeln. (6P)

1.5 Leite kommentiert aus den Bohr'schen Postulaten und klassischen Annahmen der Elektrizitätslehre und Mechanik die folgende Formel zur Berechnung von Energiezuständen eines Elektrons im Wasserstoffatom her. Berechne dabei die sog. Rydberg- Energie von 13,6eV aus Naturkonstanten. (10P)

$$E_n = -13{,}6\text{eV} \cdot n^{-2}$$

1.6 Erläutere, wie die Balmer- Formel aus dem Modell von Bohr folgt und warum es nur 4 diskrete Linien im sichtbaren „Balmer"- Spektrum des Wasserstoffs gibt. (6P)

1.7 Erkläre den Begriff „Kohärenzlänge" und begründe mit diesem die Notwendigkeit einer möglichst punktförmigen Lichtquelle sowie eines nicht zu dichten Wasserstoffgases für diesen Versuch. (6P)

1.8 Nun wird der Schirm aus dem 1. Versuchsteil durch eine im selben Abstand verschiebbare Photozelle wie in Abb. 2 gezeigt ersetzt und die Kondensatorspannung U_C als Funktion der Zeit für alle 4 sichtbaren Linien im Wasserstoffspektrum gemessen. Die Messergebnisse sind in Abb. 3 aufgetragen.

a) Erläutere die Messergebnisse qualitativ und begründe, in wie weit dieser Versuchsteil ein Widerspruch zur klassischen Lichtvorstellung als EM-Welle darstellt und statt dessen für ein Teilchenbild spricht.(6P)

b) Stelle die aus dem Diagramm ableitbare Energie der Photonen gegen deren Frequenz in geeigneter Darstellung graphisch dar und leite daraus GRAPHISCH den Wert des Planckschen Wirkungsquantums h sowie der Austrittsarbeit W_A für Elektronen aus Caesium ab. (8P)

1.9 Anstelle der Wasserstofflampe wird nun eine Elektronenquelle verwendet und erneut der Schirm aus Teil 1 eingesetzt. Der gesamte Aufbau befindet sich im Vakuum. Das Strichgitter wird bis auf zwei benachbarte Spaltöffnungen abgedeckt. Berechne die erforderliche Beschleunigungsspannung und den Impuls der Elektronen, damit auf dem Schirm Interferenzstreifen mit 2µm Abstand auftreten. (10P)

c) Zusatzinformationen

Relativistische Energie $E_0^2 = E^2 - c^2p^2$ mit der Gesamtenergie $E = E_0 + E_{Kin}$

Ort-Impuls-Unschärferelation: $\Delta x \cdot \Delta p \geq h/(4\pi)$

Aufgabe 2 (60 Punkte): Thermodynamik

a) Vorgaben:

Ein unbekanntes, als ideal anzunehmendes Gas wird untersucht. Dabei wird seine Wärmekapazität bestimmt. Hierzu liefert eine Heizung konstant Wärmeleistung von 20 Watt an ein „perfekt isoliertes“ Gefäß (dessen Wärmekapazität ist zu vernachlässigen!) mit 1m³ dieses Gases als Inhalt. Bei einer Temperatur von 26,85°C misst man in diesem Behälter einen Druck von 2000 hPa. Nach 1h misst man eine Temperatur von 70,0 °C.

b) Arbeitsaufträge:

2.1 Berechne die Teilchenzahl N und die Stoffmenge n des Gases. (8P)

2.2 Berechne den Druck des Gases nach 1h. (6P)

2.3 Berechne die absolute Wärmekapazität C dieses Gases sowie C_{mV} und C_{mP}. (10P)

2.4 Treffe anhand C_{mV} begründete Aussagen über die Art des Gases, in dem Du die Zahl der hier wirksamen Freiheitsgrade ermittelst. (12P)

2.5 Das auf 70°C erhitzte Gas wird nun zum Antrieb einer Turbine genutzt. Dabei strömt es langsam durch ein Regelventil, so dass die Temperatur dabei konstant gehalten wird. Das Gas expandiert auf sein doppeltes Volumen. Zeichne diesen Vorgang im p-V-Diagramm und berechne die verrichtete mechanische Arbeit und die während der Expansion zugeführte Wärmeenergiemenge. (16P)

2.6 Nenne und erläutere den ersten Hauptsatz der Thermodynamik. (8P)

c) Zusatzinformationen

Zustandsgleichung für ideale Gase: $p \cdot V = n \cdot R \cdot T = N \cdot k_B \cdot T$

mit n = Stoffmenge in Mol, N = absolute Teilchenzahl, Avogadro-Konstante $N_A = 6{,}022 \cdot 10^{23}$ 1/mol

universelle Gaskonstante R = 8,3145 J/(mol K)

Boltzmann- Konstante $k_B = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J/K

Musterlösung LK 13.2 vom 04.03.09

1.1 s. Metzler

Stichworte: Beugung, Interferenz, Gangunterschied...

1.2 1. Maximum: $\lambda = d \cdot \sin\alpha = \frac{1}{g} \sin\alpha$

$$\approx \frac{1}{g} \frac{a}{e} = \frac{35{,}5\,cm}{570 \frac{1}{mm} \cdot 150\,cm} = 4{,}152 \cdot 10^{-4}\,mm$$

$$\underline{\lambda = 415{,}2\,nm}$$

$$f = \frac{c}{\lambda} = \underline{7{,}23 \cdot 10^{14}\,Hz}$$

1.3 Balmer: $f = C \cdot \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{m^2}\right)$, $m = 3, 4, 5, 6$

violett ⇒ Energiereichster Übergang ⇒ $\underline{\underline{m = 6}}$

rechnerisch: $f_{violett} = 3{,}29 \cdot 10^{15}\,Hz \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{36}\right) = \underline{7{,}31 \cdot 10^{14}\,Hz}$

Übergang Schale $6 \to 2$ mit $f_{Balmer} \approx f_{Exp.}$ (Abw. ca. 1%)

1.4 s. Metzler / Mitschrift / Lösung

1.5 Ansatz: 1) $L = n\hbar \iff m r^2 \omega = n\hbar$ 1. Postulat

2) $\frac{m v^2}{r} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$ Kräftegleichgewicht

3) $E_{ges} = \frac{1}{2} m v^2 - \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r}$ Gesamtenergie

Rest siehe **1.4**

–1–

1.6/ $\Delta E = E_m - E_n = -13{,}6\,eV \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)$

$\Delta E = 13{,}6\,eV \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right)$

$\Leftrightarrow \Delta E = h \cdot f = 13{,}6 \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19}\,J \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right)$

$\Leftrightarrow f = \frac{13{,}6 \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19}\,J}{6{,}63 \cdot 10^{-34}\,Js} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right)$

$= 3{,}288 \cdot 10^{15}\,Hz \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right)$

Im sichtbaren Bereich nur Übergänge $3,4,5,6 \rightarrow 2$!

1.7/ Kohärenzlänge: räumliche Ausdehnung einzelner Wellenzüge

Interferenz: nur möglich, wenn Gangunterschied deutlich kleiner als Kohärenzlänge! „große" Lichtquellen $\Rightarrow$ Wegunterschied zwischen verschiedenen Punkten der Lichtquelle bis zum beugenden Objekt zu groß.

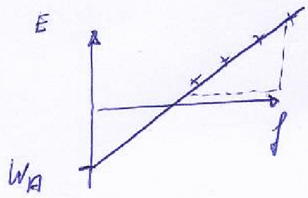
„Dichtes" Gas: zu häufige Stöße, dadurch schrumpft Kohärenzlänge $\Rightarrow$ Interferenzfähigkeit des Lichtes nimmt ab

-2-

1.8/ a) Kondensatorspannung steigt gegen Grenzwert, der ist abhängig von λ.

klassisch: kein Grenzwert, U_C sollte mit $\sqrt{E}$ anwachsen (immer mehr Energie!)

offenbar: Lichtteilchen mit maximaler Energie

b) 

$E = h f + W_A$

1.9/ 1. Maximum bei 2 µm $\Rightarrow \lambda = \frac{a}{g e} = \frac{2\,\mu m}{570\,\frac{1}{mm} \cdot 150\,cm}$

$\underline{\lambda = 2{,}34\ pm}$

damit $p = \frac{h}{\lambda} = \underline{\underline{2{,}83 \cdot 10^{-22}\ kg\,\frac{m}{s}}}$

relativistisch! $E_{kin} = E - E_0 = \sqrt{E_0^2 + c^2 p^2} - E_0$

$= \sqrt{(511\ keV)^2 + (530{,}4\ keV)^2} - 511\ keV$

$= 736{,}5\ keV - 511\ keV = \underline{225{,}5\ keV}$

damit $\underline{\underline{U_B = 225{,}5\ kV}}$

-7-

2.1/

$pV = nRT$

$\Leftrightarrow n = \frac{pV}{RT} = \frac{2 \cdot 10^5 Pa \cdot 1m^3}{8{,}3145 \frac{J}{mol\,K} \cdot 300K}$

$\underline{\underline{n = 80{,}18\ mol}}$

$\underline{\underline{N = 4{,}829 \cdot 10^{25}}}$

2.2/

$p = \frac{nRT}{V} = \underline{\underline{2287{,}63\ hPa}}$

2.3/

$C = \frac{\Delta E}{\Delta T} = \frac{P \cdot t}{\Delta T} = \frac{20W \cdot 1h}{(70-26{,}85)K} = \underline{\underline{1{,}669 \frac{kJ}{K}}}$

da hier isochor gilt: $C_{mV} = \frac{1{,}669 \frac{kJ}{K}}{80{,}18 mol} = \underline{\underline{20{,}81 \frac{J}{mol K}}}$

und wegen $-C_{mV} + C_{mp} = R$: $C_{mp} = \underline{\underline{29{,}13}} \frac{J}{mol K}$

2.4/ wegen $C_{mV} = \frac{f}{2} RT$ gilt hier $f = \frac{2 \cdot 20{,}81}{8{,}3145}$

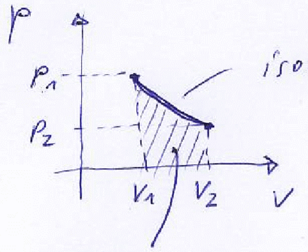
also $f = 5{,}01 \approx \underline{\underline{5}}$ Freiheitsgrade

damit handelt es sich wohl um ein zweiatomiges Gas!

-4-

2.5/ wegen isotherm gilt $pV = const.$

also $p \sim \frac{1}{V}$



Fläche ist die Arbeit!

zugeführte Wärme Q
= geleistete Arbeit W

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p\,dV$$

$$= nRT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$= nRT \ln 2$$

$$= \underline{\underline{158,6\ kJ}}$$

2.6/ s. Metzler

–5–