

**Theoretische Physik III**  
**- Quantenmechanik (SoSe 2018) -**  
Übungsblatt 01 (20 +  $\pi$  +  $e$  Punkte)<sup>1</sup>

Ausgabe 09.04.18 – Abgabe 16.04.18 – Besprechung 12./13.04 (A1 und A4), 19./20.04 (A2 und A3)  
Aufgaben mit Sternchen sind Klausurisomorph

---

▷ **Aufgabe 1 (Natrium und Licht)** (6 Punkte)

Natriumdampflampen wurden früher gerne zur Straßenbeleuchtung eingesetzt. Das Licht derartiger Lampen hat eine Wellenlänge  $\lambda_D = 5.89 \times 10^{-7} \text{m}$ .

- (a) Was ist die Farbe des Lichtes bei dieser Wellenlänge? Welche Energie hat ein Photon bei dieser Wellenlänge?
- (b) Wieviele Photonen werden von einer 100W Lampe pro Sekunde emittiert? [Nehme Sie grob vereinfachend an, dass alle elektrische Leistung in Licht der Wellenlänge  $\lambda_D$  umgesetzt wird.] Wieviele Photonen dieser Lampe treffen pro Sekunde auf eine 1qm Fläche auf dem Mond? [Sie dürfen annehmen, dass die Lampe ein idealer Kugelstrahler ist, und dass die Fläche auf dem Mond optimal orientiert ist, so dass sie möglichst viele Photonen empfängt.]

Das Licht einer Natriumdampflampe wird natürlich von Natriumatomen emittiert (Masse  $3.82 \times 10^{-26} \text{kg}$ ). Der Impulssatz besagt, dass mit jeder Emission eines Photons das Atom einen Rückstoß erleidet. Für ein freies Atom, das anfänglich ruht:

- (c) Was ist die Rückstoßgeschwindigkeit des Atoms?<sup>2</sup> Wie vergleicht sich die Rückstoßgeschwindigkeit mit der thermischen Geschwindigkeit bei Zimmertemperatur? [gemäß statistischer Thermodynamik ist  $\langle v^2 \rangle = \frac{3}{2} k_B T$ .] Welche DeBroglie Wellenlänge hat das Atom wenn es sich mit der Rückstoßgeschwindigkeit bewegt? Thermisch?
- (d) Hätten Sie eine Idee, wie man mit Licht Atome kühlen könnte? Bis zu welchen Temperaturen würde man da wohl kommen?

Bemerkung: Lichtkühlung verdünnter atomarer Gase ist seit vielen Jahren ein unverzichtbares Werkzeug in der AMOP (atomic and molecular optical physics). Mit ein paar Zusatztricks erreicht man mittlerweile Temperaturen von einigen Nano-Kelvin. Bei derartig tiefen Temperaturen ist die Physik solcher Gase ausschließlich durch die Quantenmechanik bestimmt, was zu ganz besonderen kollektiven Phänomenen (Bose-Einstein Kondensation etc) Anlass gibt. Mehr in den weiterführenden Vorlesungen ...

---

<sup>1</sup>Aufgaben mit transzendenter Punktezahl sind fakultative Nüsse. Nüsse sind bekanntlich nahrhaft ...

<sup>2</sup>Otto Frisch hat diesen Rückstoß 1933 vermessen.

▷ **Aufgabe 2 (Lokalisierter Zustand)**<sup>\*3</sup>

(8 Punkte)

Gegeben eine Wellenfunktion in der Ortsdarstellung

$$\Psi(x, t) = Ae^{-\lambda|x|}e^{-i\omega t} \quad (1)$$

worin  $A, \lambda$  und  $\omega$  positive Konstanten.

- Wie ist  $A$  zu wählen, damit  $\Psi$  normiert? Welche Bedeutung hat  $\omega$ ?
- Bestimmen Sie die Erwartungswerte von  $\hat{q}$  und  $\hat{q}^2$ . Zur Erinnerung:  $\hat{q}$  ist der Ortsoperator, erklärt  $(\hat{q}\Psi)(x, t) = x\Psi(x, t)$ .
- Bestimmen Sie die Standardabweichung von  $\hat{q}$ . Skizzieren sie den Funktionsgraphen von  $|\Psi|^2$  als Funktion von  $x$ . Markieren Sie die Punkte  $(\langle\hat{q}\rangle + \sigma)$  und  $(\langle\hat{q}\rangle - \sigma)$ . Machen Sie sich ein Bild in welchem Sinne  $\sigma$  die Streuung bzw Unschärfe von  $\hat{q}$  beschreibt. Mit welcher Wahrscheinlichkeit muss bei einer Ortsmessung ein Messwert außerhalb dieses Bereichs erwartet werden?
- Bestimmen Sie die Wellenfunktion in der Impulsdarstellung und skizzieren Sie die Wahrscheinlichkeitsdichte für die Impulsmessung (zur Erinnerung: Fouriertransformation!). Berechnen Sie den Erwartungswert  $\langle\hat{p}\rangle$ . Versuchen Sie auch die Varianz zu berechnen. Welche Probleme treten auf?

▷ **Aufgabe 3 (Lineares Molekül)**\*

(6 + e Punkte)

In einem einfachen Modell eines linearen Moleküls kann sich das Leuchtelektron effektiv nur in einer Dimension bewegen. Der Konfigurationsraum des Elektrons ist das Intervall  $X = [-a/2, a/2]$ , seine Wellenfunktion von der Form

$$\Psi(x, t) = c_0e^{-\frac{i}{\hbar}E_0t}\varphi_0(x) + c_1e^{-\frac{i}{\hbar}E_1t}\varphi_1(x), \quad (2)$$

worin  $c_0, c_1$  komplexe Zahlen, und  $\varphi_0, \varphi_1$  sog *Orbitale*

$$\varphi_0(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \cos(\pi x/a), \quad \varphi_1(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin(2\pi x/a), \quad (3)$$

für  $x \in [-a/2, a/2]$ , und  $\varphi_0(x) = \varphi_1(x) = 0$  für  $x \notin [a/2, -a/2]$ .

- Bestätigen Sie, dass
 
$$|c_0|^2 + |c_1|^2 = 1 \quad (4)$$
 die Normierung garantiert.
- Beschreiben Sie – in Worten – wo das Elektron im Fall  $c_1 = 0$  bzw.  $c_0 = 0$  vornehmlich angefundnen wird.
- Bestätigen Sie, dass im allgemeinen Fall die W'keitsdichte für eine Ortmsessung

$$|\Psi(x, t)|^2 = |c_0|^2|\varphi_0(x)|^2 + |c_1|^2|\varphi_1(x)|^2 + c_0^*c_1e^{-\frac{i}{\hbar}(E_1-E_0)t}\varphi_0^*(x)\varphi_1(x) + c_0c_1^*e^{+\frac{i}{\hbar}(E_1-E_0)t}\varphi_0(x)\varphi_1^*(x). \quad (5)$$

Welcher der Terme verschleißt sich einer klassischen Interpretation “hat mit W'keit  $|c_0|^2$  eine Dichte  $|\varphi_0(x)|^2$  und mit W'keit  $|c_1|^2$  eine Dichte  $|\varphi_1(x)|^2$ ”?

<sup>3</sup>Problem 1.8 in Griffiths *Introduction to quantum mechanics*

- (d) Für  $c_0 c_1 \neq 0$  oszilliert die W'keitsdichte als Funktion der Zeit. Mit welcher Frequenz? Machen Sie sich ein Bild für den Spezialfall  $\alpha_0 = \alpha_1 = 1/\sqrt{2}$  indem Sie die W'keitsdichte zu einigen aussagekräftigen Zeitpunkten  $t_i$  plotten.
- (e) Berechnen Sie den Mittelwert und die Varianz der Ortsverteilung. Mittelwert und Varianz sind zeitabhängig. Machen Sie sich ein Bild (Plot!) für den Spezialfall  $c_0 = c_1 = 1/\sqrt{2}$ .

Als kleine "Zusatzübung", für die wie großzügig  $e$  Punkte vergeben:

- (e) Bestimmen Sie nun die Wellenfunktion und W'keitsdichte in der Impulsdarstellung. Beachten Sie, dass der Konfigurationsraum das Intervall  $[-a/2, a/2]$ , außerhalb dieses Intervalls also  $\Psi(x, t) = 0$ .
- (f) Berechnen Sie den Erwartungswert und die Varianz der Impulsverteilung. Plotten Sie Ihr Resultat für den in (c) angegebenen Spezialfall. Was ergibt sich für das Produkt der Orts- und Impulsvarianz?

▷ **Aufgabe 4 (Ein unmoralisches Angebot)** ( $\pi$  Punkte)

Aus dem Internet erreicht Sie ein Angebot für ein gezinktes Glücksrad, spezifiziert durch eine Wahrscheinlichkeitsdichte

$$\rho(\varphi) = \frac{1}{4} \left[ \sin(\varphi/2) - \frac{1}{2} \sin \varphi \right], \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi \quad (6)$$

zum Schnäppchenpreis von 99 Euro. Sie sind von der Aussicht, Ihre Bekannten beim Glücksspiel übers Ohr zu hauen fasziniert, wollen aber sicher stellen, dass sich Ihre Investition auch lohnt.

- Handelt es sich bei (6) tatsächlich um eine Wahrscheinlichkeitsdichte (positiv? normiert)? Vielleicht machen Sie sich ein Bild von  $\rho(\varphi)$ ?
- Das Glücksrad kommt mit 64 Teilungsnägeln, alle im gleichen Abstand, einer bei  $\varphi = 0$ . Die entsprechenden Abschnitte sind durchnummeriert von 1 bis 64. Gespielt wird, indem man eine Zahl tippt, etwa 15. Bleibt das Rad auf 15 stehen, hat man gewonnen, andernfalls hat man verloren. Im Falle eines Gewinns erhält man bei einem Einsatz von 1 Euro eine Auszahlung von 63 Euro (von der Bank).<sup>4</sup> Auf welche Zahl werden Sie setzen?
- Angenommen Sie haben das gezinkte Glücksrad gekauft und veranstalten nun fleissig Spieleabende mit Ihren Bekannten. Reihum übernimmt jeder Mitspieler mal für einen Abend die Bank. Gewinnt die Bank im Mittel? Wie sieht es mit Ihnen aus? Als einziger Mitspieler kennen Sie (6). Wie lange dauert es im Mittel, bis sich Ihre Investition amortisiert hat?

---

<sup>4</sup>Richtig! Langfristig gewinnt bei einem fairen Glücksrad immer die Bank (im Mittel einen Euro in 64 Spielen). Die hat ja auch Auslagen (Öl fürs Rad, Personal etc).