

**Präsenz-Aufgabe 1 Harmonischer Oszillator; Erzeuger/Vernichter-Gymnastik**

Hamiltonian des harmonischen Oszillators:

$$H = \hbar\omega \left( a^\dagger a + \frac{1}{2} \right), \quad [a, a^\dagger] = 1. \quad (1)$$

- (a) Berechnen Sie  $[a^\dagger a, a^\dagger]$  und  $[a^\dagger a, a]$ . Zeigen Sie, daß  $a^\dagger |n\rangle$  EV von  $a^\dagger a$  zum EW  $(n+1)$  sowie daß  $a |n\rangle$  (für  $a |n\rangle \neq 0$ ) EV zu  $a^\dagger a$  zum EW  $(n-1)$  ist.
- (b) Bestimmen Sie  $[a^\dagger a, (a^\dagger)^n]$ ,  $[a^\dagger a, a^n]$  und die Normierung der Eigenzustände.
- (c) Zeigen Sie:

$$e^{\lambda a^\dagger a} a^\dagger e^{-\lambda a^\dagger a} = a^\dagger e^\lambda, \quad e^{\lambda a^\dagger a} a e^{-\lambda a^\dagger a} = a e^{-\lambda}. \quad (2)$$

Hinweis: Ableitung beider Seiten nach  $\lambda \in \mathbb{R}$ , Satz von der Eindeutigkeit linearer Differentialgleichungen.

- (d) Bestimmen Sie die Erzeuger und Vernichter im Heisenbergbild, einmal durch explizite Transformation, sowie durch Lösung der Heisenbergschen Bewegungsgleichungen (für einen bel. Operator  $\mathcal{O}$ ):

$$i \frac{\partial}{\partial t} \mathcal{O} = [H, \mathcal{O}]. \quad (3)$$

**Hausaufgabe 1 Zwei komplexe skalare Felder**

Die Lagrangedichte für zwei komplexe skalare Felder  $\Phi_1, \Phi_2$  sei gegeben durch

$$\mathcal{L} = \sum_{i=1}^2 \partial_\mu \Phi_i^* \partial^\mu \Phi_i - m^2 \sum_{i=1}^2 \Phi_i^* \Phi_i - \frac{\lambda^2}{2} \left( \sum_{i=1}^2 \Phi_i^* \Phi_i \right)^2.$$

- (a) Wie lauten die Bewegungsgleichungen? Nehmen Sie  $\phi$  und  $\phi^*$  als die elementaren dynamischen Felder (es wäre auch möglich, Real- und Imaginärteil von  $\phi$  zu wählen, so ist's aber einfacher!).

[4 Punkte]

- (b) Zeigen Sie, daß  $\mathcal{L}$  invariant ist unter der infinitesimalen Transformation

$$\Phi_i \longrightarrow \Phi'_i = \Phi_i + i\epsilon_a \frac{\sigma_{ij}^a}{2} \Phi_j,$$

wobei  $\sigma^a$  die üblichen Paulimatrizen mit den Vertauschungsrelationen  $[\sigma^a, \sigma^b] = i\epsilon^{abc} \sigma^c$  sind.  $\epsilon^a$  sind konstante reelle Parameter. Wie lauten die zugehörigen erhaltenen Ströme?

[6 Punkte]

- (c) Zeigen Sie unter Verwendung der Feldgleichungen, daß in der Tat  $\partial^\mu j_\mu^a = 0$  gilt.

[3 Punkte]

(d) Berechnen Sie den Energie-Impuls-Tensor  $T_{\mu\nu}$ .

[4 Punkte]

## Hausaufgabe 2 Maxwell-Gleichungen

(a) Das klassische elektromagn. Feld ohne äußere Quellen besitzt die Wirkung:

$$S = \int d^4x \left( -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \right), \text{ wobei } F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu \quad (4)$$

der Feldstärketensor ist. Leiten Sie die Maxwell-Gleichungen aus den Euler-Lagrange-Gleichungen aus obiger Wirkung her, indem Sie  $A_\mu(x)$  als die dynamischen Felder ansehen. Schreiben Sie das Ergebnis mittels  $E^i = F^{i0}$  und  $\epsilon^{ijk} B^k = -F^{ij}$  in die Standardform um. Wie sieht die Wirkung mit äußeren Quellen (Ladungs- und Stromdichte) aus?

[8 Punkte]

(b) Konstruieren Sie den Energie-Impuls-Tensor. Nach der üblichen Prozedur wird sich dieser als nicht symmetrisch herausstellen. Man kann aber einen neuen Energie-Impuls-Tensor einführen der Form

$$T'_{\mu\nu} = T_{\mu\nu} + \partial^\lambda K_{\lambda\mu\nu}, \quad (5)$$

wobei  $K_{\lambda\mu\nu}$  antisymmetrisch in seinen ersten beiden Indizes ist. Dann ist der neudefinierte Energie-Impuls-Tensor automatisch divergenzfrei (warum?) und ergibt auf die gleiche Weise erhaltene Energie und Impuls wie der ursprüngliche. Zeigen Sie, daß die Wahl

$$K_{\lambda\mu\nu} = F_{\mu\lambda} A_\nu \quad (6)$$

zu einem symmetrischen Energie-Impuls-Tensor führt und die Standardform für Energiedichte und Poynting-Vektor des elektromagnetischen Feldes ergibt:

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2} (E^2 + B^2), \quad \vec{S} = \vec{E} \times \vec{B}. \quad (7)$$

[6 Punkte]