

## Übungen zur Theoretischen Physik 3 für das Lehramt L3 – Blatt 13

### Aufgabe 1 (10 Punkte): Viererstromdichte

In der Vorlesung haben wir gesehen, dass wir die homogenen Maxwell-Gleichungen mit Hilfe des antisymmetrischen Faraday-Tensors

$$(F^{\mu\nu}) = \begin{pmatrix} 0 & \vec{E}^T/c \\ -\vec{E}/c & -\epsilon^{ijk} B^k \end{pmatrix} \quad (1)$$

in kovarianter Form schreiben können

$$\partial_\mu F^{\mu\nu} = \mu_0 j^\nu \quad \text{mit} \quad (j^\mu) = \begin{pmatrix} c\rho \\ \vec{j} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Dabei ist  $\rho$  die Ladungs- und  $\vec{j}$  die Stromdichte, und weil die linke Seite ein Vektor ist, wenn wir die Felder so transformieren, dass  $F^{\mu\nu}$  ein Tensorfeld 2. Stufe ist, muss folglich  $(j^\mu)$  ein Vierervektor sein.

Wir haben andererseits in Theoretische Physik 2 gesehen, dass die Stromdichte für eine kontinuierliche Ladungsverteilung durch

$$\vec{j}(t, \vec{x}) \equiv \vec{j}(\underline{x}) = \rho(\underline{x}) \vec{v}(\underline{x}) \quad (3)$$

ist, wobei  $\vec{v}(\underline{x})$  das Strömungsfeld der geladenen Materie ist, also die Geschwindigkeit eines kleinen materiellen Volumens zur Zeit  $t$  am Ort  $\vec{x}$  und  $\rho = dq/d^3x$ , also die Ladung im Volumenelement  $d^3x$  pro Volumeneinheit.

Wir wollen zeigen, dass diese physikalischen Bedeutung von  $\rho$  und  $\vec{j}$  tatsächlich damit kompatibel ist, dass  $j^\mu$  ein Vierervektor ist.

Dazu betrachten wir ein Inertialsystem  $\Sigma^*$  wo das Fluidvolumenelement am Raumzeit-Punkt  $\underline{x}$  momentan in Ruhe ist. Offenbar gilt in diesem System

$$(j^{*\mu}) = \begin{pmatrix} c\rho^* \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Wir nehmen weiter an, dass die räumlichen Achsen des Systems  $\Sigma$  so orientiert sind, dass  $\vec{v} = \beta c \vec{e}_1$  ist. In diesem Ruhesystem des Fluidelements ist die Vierergeschwindigkeit

$$u^{*\mu} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \Rightarrow j^{*\mu} = \rho^* c u^{*\mu}. \quad (5)$$

(a) (3 Punkte) Zeigen Sie dass der „inverse Lorentz-Boost“

$$\hat{\Lambda}(-\vec{v}) = \begin{pmatrix} \gamma & \gamma\beta & 0 & 0 \\ \gamma\beta & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

die korrekte Vierergeschwindigkeit

$$u^\mu = \Lambda^\mu_\rho(-v)u^{*\rho} \quad (7)$$

ergibt.

(b) (3 Punkte) Argumentieren Sie, dass demnach

$$j^\mu = \rho^* c u^\mu \quad (8)$$

sein muss, wenn  $(j^\mu)$  sich wie ein Vierervektor transformiert.

(c) (4 Punkte) Zeigen Sie weiter, dass das kompatibel mit der Formel

$$(j^\mu) = \begin{pmatrix} c\rho \\ \rho\vec{v} \end{pmatrix} \quad (9)$$

ist.

**Anleitung:** Dazu bemerken wir, dass die Ladung ein Lorentz-Skalar ist, und die im Fluidelement enthaltene Ladung demnach durch

$$dq^* = \rho^* d^3x^* = \rho d^3x = dq \quad (10)$$

gegeben ist. Dabei ist  $d^3x^*$  das Volumen des Fluidelements, wie es ein Beobachter zum festen Zeitpunkt  $t^*$  im Ruhesystem  $\Sigma^*$  des Fluidelements misst, während  $d^3x$  das Volumen dieses Fluidelements für einen Beobachter im System  $\Sigma$  zum entsprechenden festen Zeitpunkt  $t$  ist. Demnach ist das Volumenelement bzgl.  $\Sigma$  in der Boost-Richtung  $\vec{e}_1$  Lorentz-kontrahiert gegenüber der entsprechenden Länge in  $\Sigma^*$ , während die dazu senkrechten Richtungen nicht kontrahiert sind, d.h. es gilt  $d^3x = d^3x^*/\gamma$ . Verwenden Sie nun (10), um die Ladungsdichte  $\rho^*$  bzgl. des Ruhesystems  $\Sigma^*$  des Fluidelements durch die Ladungsdichte  $\rho$  bzgl. des Laborsystems  $\Sigma$  auszudrücken. Verwenden Sie dann dieses Resultat in (8) und vergleichen das Ergebnis mit (9).