Übungsblatt 4

Relativitätstheorie II

Sommersemester 2015
Fakultät für Physik, Universität Stuttgart
Prof. Dr. R. Hilfer

Aufgabe 1 (Votieraufgabe) **3 Punkte**

Es sei M eine Raumzeit und $p \in M$.

1. Erklären Sie, warum ein zukunftsweisender zeitartiger Tangentialvektor $x \in T_pM$ mit $g(x,x) = 1$ einen momentanen Beobachter im Punkt p repräsentiert.

2. Die Relativgeschwindigkeit zweier Beobachter x, z sei definiert als der raumartige Tangentialvektor $v \in x^{\perp}$, der durch $z = \lambda(x + v)$ mit $\lambda > 0$ eindeutig bestimmt ist. (Dabei ist $x^{\perp}$ der Raum aus Aufgabe 4.1.)

   Zeigen Sie, dass die Relativgeschwindigkeit von x und z gerade

   $$v = \frac{z}{g(x,z)} - x \tag{1}$$

   beträgt.

3. Zeigen Sie, dass in der Relativitätstheorie alle Relativgeschwindigkeiten kleiner als die Lichtgeschwindigkeit sind, d.h. dass

   $$-1 < g(v,v) \leq 0 \tag{2}$$

   gilt.

Aufgabe 2 (Votieraufgabe) **4 Punkte**

Beweisen Sie, analog zu den Gleichungen (5.3.2) – (5.3.4), einen Ausdruck für die kovariante Ableitung $\nabla_i T^{j_1 \ldots j_p}_{k_1 \ldots k_q}$ eines (p,q)-Tensors.

Bitte wenden!

Aufgabe 3 (Hausaufgabe) **8 Punkte**

Sei $z(\tau)$, $\tau \in \mathbb{R}$, die nach der Eigenzeit τ parametrisierte Trajektorie eines Beobachters B im zweidimensionalen Minkowskiraum M mit metrischem Tensor g. Der Geschwindigkeitsvektor $u(\tau) = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\tau} z(\tau)$ erfüllt $g(u(\tau), u(\tau)) = 1$ für alle $\tau \in \mathbb{R}$ und ist zukunftsweisend. Der metrische Tensor g hat bezüglich dem Koordinatensystem (x^0, x^1) die Komponenten $(g_{\mu\nu})_{\mu=0,1;\nu=0,1} = \mathrm{diag}(1, -1)$.
Die *Radarkoordinaten* (y^0, y^1) *des Beobachters* B werden wie folgt definiert:

$$y^0(p) := \tfrac{1}{2}(\tau^+(p) + \tau^-(p)), \qquad y^1(p) := \tfrac{1}{2}(\tau^-(p) - \tau^+(p)), \qquad \text{für alle } p \in \mathscr{R}. \tag{3}$$

Dabei definieren wir $\tau^\pm(p) \in \mathbb{R}$ so, daß $z(\tau^\pm(p)) \in \ell_p^\pm$, falls solche $\tau^\pm(p) \in \mathbb{R}$ für dieses $p \in M$ existieren. Dabei sind $\ell_p^\pm := p + (1, \pm 1) \cdot \mathbb{R}$ die Lichtstrahlen durch den Punkt $p \in M$. Die Menge der Punkte $p \in M$, für die dies möglich ist, nennen wir die *Radarmenge* $\mathscr{R}_\mathrm{B}$ *von* B.

1. Zeigen sie, daß das Radarkoordinatensystem des Beobachters B für beliebige Weltlinien $z(\tau)$ wohldefiniert ist und die inverse $x^\mu(y^\nu)$ als Funktion von $\mathbb{R}^2$ nach $\mathscr{R}_\mathrm{B}$ existiert. Was sind die (y^0, y^1)-Komponenten von $z(\tau)$ und $u(\tau)$? Was ist die anschauliche Bedeutung des Radarkoordinatensystems?

2. Der Beobachter B bewege sich auf der Weltlinie mit $x^0(z(\tau)) = a^{-1}\sinh(a\tau)$, $x^1(z(\tau)) = a^{-1}\cosh(a\tau)$, mit der Konstanten $a > 0$. Berechnen sie die Radarmenge $\mathscr{R}_\mathrm{B}$ und die Radarkoordinaten $y^\mu(x^\nu)$. Zeigen sie, daß die inverse Funktion $x^\mu(y^\nu)$ gegeben ist durch

$$x^\mu(y^\mu) = \begin{pmatrix} x^0(y^0, y^1) \\ x^1(y^0, y^1) \end{pmatrix} = \frac{\mathrm{e}^{ay^1}}{a} \begin{pmatrix} \sinh(ay^0) \\ \cosh(ay^0) \end{pmatrix}. \tag{4}$$

3. Berechnen sie die Komponenten $\tilde{g}_{\mu\nu}$, $\tilde{u}^\mu(\tau)$ des metrischen Tensors g und der Geschwindigkeit $u(\tau)$ bezüglich der Radarkoordinaten y^μ. Berechnen sie dazu die Funktionalmatrizen $\left(\frac{\partial x^\mu}{\partial y^\nu}(y^\alpha)\right)$ und $\left(\frac{\partial y^\mu}{\partial x^\nu}(y^\alpha)\right)$ aus (4). Geben sie eine anschauliche Interpretation der Formeln.

4. Berechnen sie alle Christoffelsymbole $\tilde{\Gamma}^\eta_{\mu\nu}$ in den Koordinaten (y^0, y^1). Bestimmen sie damit die kovariante Ableitung $\nabla_{u(\tau)} u(\tau)$ im Koordinatensystem (y^0, y^1). Was sagt das Ergebnis über die Art der Fortbewegung des Beobachters B aus?

Hinweis: Veranschaulichen sie sich die Radarkoordinaten mit Hilfe eines Minkowskidiagramms. In 4. entspricht $\nabla_{u(\tau)} u(\tau)$ dem Ausdruck $\nabla_0 \tilde{u}^\mu$.