

Forschungsbasierte Entwicklung des Freiburger Einsteinlabors Lernerperspektiven zu Raum und Zeit in der Relativitätstheorie

Einleitung

Im November 1915, zehn Jahre nach der Veröffentlichung der Speziellen Relativitätstheorie (SRT), trug Albert Einstein vor der Preußischen Akademie der Wissenschaften die Kernideen der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) vor. Seither finden sie vielfältig Bestätigung in diversen Forschungsfeldern der Kosmologie (Gravitationswellen, Gravitationslinsen) und wirken über Entwicklungen in der modernen Technologie, wie z. B. die GPS-Navigation, in Bereiche unserer Lebenswelt hinein. Rund 100 Jahre nach ihrer Formulierung sind es nicht zuletzt die oft ungewöhnlichen und nicht selten kontraintuitiven Aussagen der Relativitätstheorie, die eine besondere Anziehungskraft auf ein breites Publikum ausüben. In Kooperation mit Vertretern der theoretischen Astrophysik der Universität Tübingen entsteht seit 2013 an der Pädagogischen Hochschule Freiburg ein Einsteinlabor, das schwerpunktmäßig aber nicht ausschließlich astrophysikalischen Effekten der Relativitätstheorie gewidmet ist. Grundlegende Konzepte der SRT und ART sollen Sekundarstufenschülern und einer interessierten Öffentlichkeit näher gebracht werden. Zurzeit entstehen Lernmaterialien und Exponate (Analogexperimente, interaktive Simulation etc.) im Rahmen von Staatsexamensarbeiten. Erste empirische Studien zum Lernen von Grundideen der SRT wurden ebenfalls auf dem Hintergrund von Examina durchgeführt. Ein Drittmittelantrag, der auf eine systematische Untersuchung von Lernprozessen zu ausgewählten Phänomenen der Relativitätstheorie zielt, ist in Vorbereitung.

Ausgangslage

In der einschlägigen Literatur findet sich eine ganze Reihe von Ansätzen zur didaktischen Strukturierung von Grundideen der Relativitätstheorie, die ohne einen sophistizierenden mathematischen Formalismus auskommen. Der wohl prominenteste und älteste seiner Art basiert auf der Visualisierung relativistischer Effekte durch Umskalierung der Lichtgeschwindigkeit auf typische Alltagsgeschwindigkeiten z. B. eines Radfahrers (Gamov, 1940). Moderne Fortführungen dieses Ansatzes berücksichtigen über die messbaren Änderungen von Länge und Zeit hinaus auch Lichtlaufzeiteffekte, die dem relativistisch bewegten Radfahrer völlig andere Sinneseindrücke bescheren als von Gamov angenommen (Nollert & Ruder, 2005). Im Zusammenhang mit der ART wird auch ein geometrischer Ansatz verfolgt (Kraus & Zahn, 2005). Zentrale Konzepte sind hier das Prinzip der Raumzeit-Krümmung durch massive Körper sowie der Geodäten-Begriff. Grundlage sind Analogien zu gekrümmten Flächen, die in den dreidimensionalen Konfigurationsraum eingebettet sind. Ein weiterer Ansatz versucht, typische Verständnisprobleme, die der geometrische Zugang mit sich bringt (Reduktion der Raumzeitkrümmung auf zwei Raumdimensionen, Begriff der intrinsischen Krümmung in Abgrenzung zur äußeren Krümmung) zu umgehen, indem er auf den Begriff der Krümmung völlig verzichtet. Im Zentrum steht das Prinzip, dass Gravitation eine Veränderung von Entfernungen in Raum und Zeit bewirkt. Bewegungen vollziehen sich nach einem Extremalprinzip. Mögliche Vorteile werden hier mit einer sehr formalen Argumentation erkaufte. Allen drei Ansätzen gemeinsam ist ihre im Kern rein fachimmanente Grundlegung. Insbesondere sind sie bislang empirisch-fachdidaktisch weder motiviert (z. B. über Lernerperspektiven) noch evaluiert. Lernerperspektiven im Bereich der Relativitätstheorie werden dabei seit über 30 Jahren beforscht (z. B. Hewson, 1982). Die Studien nehmen dabei überwiegend Bezug auf Lernprozesse Physikstudierender

im Zusammenhang mit der SRT. Die ART ist bislang empirisch-fachdidaktisch „Terra Incognita“.

Ziele des Vorhabens

In seiner Entwicklungskomponente hat das Projekt drei Schwerpunkte: das Äquivalenzprinzip als zentrales Fundamentalprinzip, das geometrische Paradigma der ART sowie die Phänomenologie relativistischer Effekte in Bezug auf astronomische Objekte wie zum Beispiel Schwarze Löcher oder Neutronensterne. Exponate zur SRT haben bei der Entwicklung des Schülerlabors vorwiegend instrumentellen Charakter bezogen auf das Lernen von Grundideen der ART, auch wenn sie in der bisherigen Entwicklungsarbeit einen der Akzente bilden.

Ziele und Inhalte einer lernwirksamen Lernumgebung sind freilich nicht rein fachimmanent gegeben. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des Freiburger Einsteinlabors nehmen Bezug auf das Modell der Didaktischen Rekonstruktion nach Kattmann et al. (1997). Das Forschungsinteresse richtet sich in besonderem Maße auf Fragen zur Lernwirksamkeit unterschiedlicher didaktischer Strukturierungen und Lernerperspektiven:

- Inwieweit können anschlussfähige Vorstellungen zu Phänomenen der ART ohne SRT vermittelt werden?
- Welche grundlegende didaktische Strukturierung (Raumkrümmung und Geodäten versus Abstandsbetrachtungen) ist dabei besonders lernförderlich?
- In welchem Maße ist ein mathematischer Formalismus unumgänglich?
- Welche Vor- und Nachteile bieten die unterschiedlichen Ansätze?
- Welche Schülervorstellungen zu relativistischen aber auch zu „klassischen“ Konzepten sind in diesem Kontext bedeutsam für den Lernprozess?
- Inwieweit wird eine Lernumgebung zur ART, die die SRT ausblendet, den Erwartungen der Lernenden und ihrer Lehrkräfte gerecht?

Die Forschungsfragen werden im Rahmen von Laborstudien in teilstrukturierten Interviews und in einer Variante des Teaching-Experiment-Designs nach Steffe und Thomson (2000) angegangen. Erste Untersuchungsergebnisse zu Lernervorstellungen liegen aus einer Pilotstudie vor, die im Rahmen einer Staatsexamensarbeit durchgeführt wurde. Auf ausgewählte Ergebnisse wird im Folgenden eingegangen.

Ergebnisse einer Lernprozessstudie

Die Studie wurde an der Pädagogischen Hochschule Freiburg mit 15 Teilnehmern eines Seminars zur modernen Physik im Wintersemester 2013/14 durchgeführt. Die erhobenen Daten wurden in einer qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring (2003) ausgewertet.

Inhaltlich fokussierte das Interview auf die SRT. Die Lernsequenzen basieren auf den zum Erhebungszeitpunkt bereits entwickelten Exponaten. Kernelement war ein relativistischer Flug durch die PH-Freiburg. Die Simulation basiert auf der bereits erwähnten Umskalierung der Lichtgeschwindigkeit auf Alltagsgeschwindigkeiten. Das Programm erlaubt eine freie Navigation durch eine virtuelle Welt nahe der Lichtgeschwindigkeit. Das Interview repliziert in Teilen Ergebnisse anderer Studien.

Die Lorentz-Transformationen geben die Zeit- und Ortskoordinaten von Ereignissen an, wie sie aus unterschiedlichen Inertialsystemen heraus beobachtet werden. Die Beobachtung einer Längenkontraktion des bewegten Maßstabes ist dabei im Sinne einer objektiven Messung zu verstehen, wird von den Lernenden aber im Regelfall als optische Täuschung interpretiert (s. a. Hewson, 1982). Länge wird als objektive Eigenschaft eines Körpers gesehen, unabhängig davon, ob oder wie sie gemessen wird (wahrgenommene vs. tatsächliche Länge). Demgegenüber scheint das Konzept von der Relativität der Gleichzeitigkeit erstaunlicher-

weise auf den ersten Blick vergleichsweise leicht zugänglich zu sein. Tatsächlich wird die Relativität der Gleichzeitigkeit tendenziell als reiner Lichtlaufzeiteffekt verstanden, wie bereits Scherr et al. (2001) gezeigt haben. Ein ursächlicher Zusammenhang mit Fehlvorstellungen zum Konzept des Bezugssystems, das tendenziell von den Interviewpartnern als Punkt im Konfigurationsraum verstanden wurde, scheint naheliegend. Ein Bezugssystemwechsel ist demnach ein Wechsel zwischen Orten und nicht zwischen unterschiedlich bewegten Koordinatensystemen. Der Zeitpunkt eines Ereignisses bezeichnet die Zeit, zu der das Signal den Beobachter erreicht. Verschiedentlich wird in den Interviews deutlich, dass oberflächlich betrachtet, außerhalb der Relativitätstheorie angesiedelte Schülervorstellungen erheblich Einfluss auf Lernprozesse in diesem Bereich haben können. Ein Beispiel sind typische Verständnisprobleme in Bezug auf den physikalischen Kraftbegriff. Auf ihrem Hintergrund wird typischerweise zwischen einer scheinbaren und einer realen Bewegung unterschieden. Nur letztere wird durch eine Art Impetus aufrecht erhalten (s. a. Saltiel & Malgrange, 1980). Dies begünstigt die Vorstellung von einer absoluten Bewegung und einem ausgezeichneten Bezugssystem. Vorzugsweise ist das in der Vorstellung der Lerner das Ruhesystem der Erde.

Fazit und Ausblick

Das Freiburger Einsteinlabor greift in Teilen auf Exponate der Tübinger Kooperationspartner zurück (z. B. Gravitationswellenstuhl, Einsteinfahrrad). Weitere interaktive Exponate, Simulationen und Lerneinheiten wurden und werden weiterhin im Themenfeld Kosmologie und ART konzipiert, wie z. B. eine Lerneinheit zur Raumzeit-Krümmung, eine Simulation zum Shapiro-Delay oder Simulationsversuche zur gravitativen Rotverschiebung und zur Zeitdilatation. Eine erste Lernprozessstudie bestätigt einerseits bereits in der Literatur beschriebene Vorstellungen und führt andererseits zu neuen Einsichten in Lernverläufe. Vor allem aber zeigt sie Blickrichtungen für Lernprozessstudien in diesem Inhaltsbereich auf und bestätigt ein aufgabenbasiertes Teaching-Experiment-Design als geeignete Methode zur Untersuchung von Lernverläufen. Vertiefende Studien werden im Rahmen eines Promotionsvorhabens folgen. Die Entwicklungsarbeiten im Projekt finden mit einer einwöchigen Ausstellung zum Thema „Raum, Zeit, Kosmos“ aus Anlass des 100jährigen Jubiläums der ART im Juni 2015 im Freiburger Seepark ihren vorläufigen Abschluss und Höhepunkt.

Literatur

- Gamov, G. (1940). *Mr. Tompkins in Wonderland*. Cambridge, England: Cambridge University Press.
- Hewson, P. (1982). A Case Study of Conceptual Change in Special Relativity: The Influence of Prior Knowledge in Learning. *European Journal of Science Education* 4(1), 61-78.
- Kattmann, U. et al. (1997). Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion – Ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung. *ZfDN* 3(3), 3-18.
- Kraus, U. & Zahn, C. (2005). Wir basteln ein Schwarzes Loch – Unterrichtsmaterialien zur Allgemeinen Relativitätstheorie. *PdN Physik*, 38-43.
- Mayring, P. (2003). *Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken*. Weinheim: Beltz.
- Nollert, H.-P. & Ruder, H. (2005). Die relativistische Welt in Bildern – Was Einstein gerne gesehen hätte. *Spektrum der Wissenschaft Spezial*.
- Saltiel, E. & Malgrange, J.L. (1980). Spontaneous Ways of Reasoning in Elementary Kinematics. *American Journal of Physics* 1, 73-80.
- Scherr, R. et al. (2001). Student Understanding of Time in Special Relativity: Simultaneity and Reference Frames. *American Journal of Physics* 69(7), 24-35.
- Steffe, L.P. & Thomson, P.W. (2000). Teaching Experiment Methodology: Underlying Principles and Essential elements. In R. Lesh & A.E. Kelly (Eds.), *Research Design in Mathematics and Science Education* (pp.267-307). Hillsdale, NJ: Erlbaum.