

Sven Weissenborn<sup>1</sup>

Ute Kraus<sup>1</sup>

Crovin Zahn<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universität Hildesheim

## Relativitätstheorie: Design und Evaluation eines Online-Schülerlabors

### Abstract

Wer sich mit Gravitation entsprechend der Allgemeinen Relativitätstheorie beschäftigt, wird in den Standardlehrbüchern schnell mit komplexen und für die Schule ungeeigneten mathematischen Formulierungen konfrontiert. Dabei geht es auch anders, denn Gravitation und Geometrie hängen unweigerlich zusammen und Geometrie ist bereits in frühen Schuljahren fester Bestandteil des Lehrplans. Die Anzahl solcher Ansätze, die über einen geometrischen Zugang versuchen die Allgemeine Relativitätstheorie zu vermitteln, ist jedoch noch nicht sehr groß. Ziel des vorgestellten Projekts ist die Bereitstellung und Evaluation schülerorientierter Online-Kurse, welche sich den geometrischen Charakter der Theorie zu Nutze machen. Dabei setzen wir eine digitale Version sogenannter Sektormodelle ein, mit denen sich die Geometrie gekrümmter Raumzeiten untersuchen lässt. Der Beitrag stellt das Design der digitalen Lernumgebung sowie die geplante Evaluation zur Lernwirksamkeit vor.

### Die Allgemeine Relativitätstheorie in der Schule

Im Jahr 1915 veröffentlichte Albert Einstein die vollständige Formulierung der Allgemeinen Relativitätstheorie. Darin wird Gravitation, im Gegensatz zur klassischen Newtonschen Theorie, nicht als Kraft, sondern als Geometrie der Raumzeit beschrieben. Diese revolutionäre Vorstellung der Wechselwirkung von Materie, Raum und Zeit hat bis heute kaum Einzug in die nationale und internationale Schullandschaft finden können. In Deutschland führen lediglich vier Bundesländer die Allgemeine Relativitätstheorie explizit in ihren Curricula auf (Stand 2017, (Kraus, Zahn & Moustafa, 2018)). Doch wie kann es sein, dass eine exaktere und für das heutige physikalische Weltbild relevantere Beschreibung als die Newtonsche Gravitationstheorie kaum Beachtung im Physik-Unterricht findet? Eine mögliche Antwort ist, dass der ihr zugrundeliegende mathematische Apparat für die Schule zu komplex ist. Hier steht die Physikdidaktik vor der Herausforderung, Methoden und Modelle zu entwickeln, mit deren Hilfe die Allgemeine Relativitätstheorie fachlich befriedigend bereits in der Schule vermittelt werden kann.

### Was wird bereits dafür getan?

Verschiedene nationale und internationale Arbeitsgruppen widmen sich der Herausforderung, die Allgemeine Relativitätstheorie schülergerecht aufzubereiten. Exemplarisch sollen an dieser Stelle zwei Arbeitsgruppen genannt werden, die ebenfalls einen stark geometriegerichteten Vermittlungsansatz verfolgen, sich jedoch in der Repräsentation ihrer Modelle unterscheiden:

Einen auf einem gegenständlichen Modell basierenden Ansatz verfolgt eine Arbeitsgruppe der University of Western Australia. Im Projekt *Einstein-first* (Kaur et al., 2017) werden Kurse entwickelt, die die Einsteinsche Theorie bereits in Klassen der Unterstufe thematisieren. Mit Hilfe eines horizontal gespannten und durch Massen vertikal gewölbten Gummituchs wird eine Analogie zu einem durch Materie gekrümmten zweidimensionalen Raum geschaffen. Die so entstandene Verzerrung in eine dritte Dimension verursacht eine Verformung der zweidimensionalen Fläche. Mit sich auf dem Gummituch bewegenden Objekten untersuchen die Lernenden in qualitativen und quantitativen Experimenten die

geometrischen Eigenschaften des Gummituchs und leiten anhand der Ergebnisse die Wirkung des gekrümmten Raumes auf Licht- und Teilchenbahnen ab. Ein ähnlicher, jedoch auf digitalen Medien basierender, Ansatz wird an der Universität in Oslo im Rahmen des Projekts *ReleQuant* (Kersting et al., 2018) verfolgt. Eine für höhere Schulklassen entwickelte digitale Lernumgebung stellt über den Einsatz von Kurzvideos, Animationen, Informationstexten sowie kleinen Applikationen dar, dass Gravitation in der Allgemeinen Relativitätstheorie nicht als Kraft sondern als Geometrie der gekrümmten Raumzeit beschrieben wird. Dabei illustriert die Lernumgebung die Eigenschaften dieser Geometrie anhand gekrümmter Flächen und zeigt, dass sie sich anders als die vertraute euklidische Geometrie verhält. Dazu werden Geodäten (lokal gerade Linien) als Beschreibung von Licht- und Teilchenbahnen im durch Massen gekrümmten Raum eingeführt und ihr Verhalten auf gekrümmten Flächen sowie auf einem digitalen Gummituch-Modell (Kersting & Steier, 2018) gezeigt. Einen besonderen Schwerpunkt legen die hier erstellten digitalen Materialien auf „talking physics“. Diskussionen in Partnerarbeit oder in Kleingruppen sollen das Verständnis der Zusammenhänge fördern und das Lernen durch Erklären betonen.

### Die Raumzeitwerkstatt

Seit 2009 bietet das Institut für Physik der Universität Hildesheim das Schülerlabor Raumzeitwerkstatt an. Dessen Ziel ist es, Schülerinnen und Schülern der Jahrgangsstufen 9 bis 13 einen Einstieg in die Spezielle und Allgemeine Relativitätstheorie zu bieten. Zu den Themen gehören unter anderem Zeitdilatation, Äquivalenzprinzip, Lichtablenkung und Gravitationswellen. Es wird mit interaktiven Computersimulationen, realen und virtuellen Modellen sowie mit Analogieexperimenten gearbeitet.

Im Folgenden beschreiben wir eine Einheit zur Allgemeinen Relativitätstheorie, die derzeit zu einem Online-Angebot weiterentwickelt wird. Sie gibt am Beispiel der Lichtablenkung an Schwarzen Löchern eine Einführung in die geometrische Beschreibung der Gravitation. Mit Hilfe sogenannter Sektormodelle zur Darstellung gekrümmter Flächen und Räume (Zahn & Kraus, 2014) werden Geodäten auf maßstabsgetreuen Abbildungen zweidimensionaler Räume und Raumzeiten konstruiert und untersucht (Zahn & Kraus, 2018; Kraus & Zahn, 2018). Ein einführendes Beispiel ist die Konstruktion solcher Geodäten auf dem Sektormodell der Kugeloberfläche. Hier untersuchen die Lernenden ein ihnen meist noch unbekanntes Feld und erfahren, dass die vertrauten Eigenschaften der euklidischen Geometrie auf einer Kugel nicht gelten. Dazu wird die Oberfläche einer Kugel zunächst in Vierecke zerlegt (Abb. 1(a)). Jedes Flächenstück der Kugeloberfläche wird dann durch ein ebenes Flächenstück angenähert (Abb. 1(b)). Eine Geodäte verläuft innerhalb eines solchen Sektors gerade. Erreicht sie eine Sektorkante wird der entsprechende Nachbarssektor angelegt und die Geodäte fortgesetzt (Abb. 1(c)). Konstruiert man so eine zweite, zur ersten parallel startende Geodäte, nähern sich diese auf dem Sektormodell an (Abb. 1(d)). Vergleichbar ist dieses Verhalten der Geodäten mit den Längengraden auf einem Globus: Am Äquator verlaufen sie parallel, in Richtung der Pole nähern sie sich einander an. Hierin zeigt sich die nichteuklidische Geometrie der Kugeloberfläche.

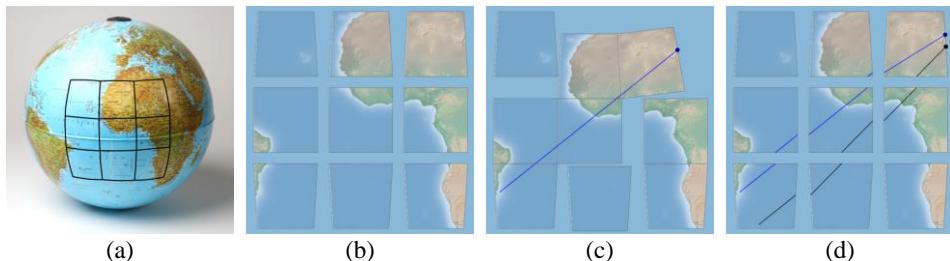


Abb. 1: Die Konstruktion von Geodäten auf dem Sektormodell der Kugeloberfläche

### **Inhalte und Struktur des Online-Schülerlabors**

Das geplante Online-Schülerlabor wird mindestens vier Module zur Allgemeinen Relativitätstheorie umfassen, die von den Lernenden selbstständig bearbeitet werden sollen: Das erste Modul umfasst als Grundlage eine Einführung in die Eigenschaften nichteuklidischer Geometrien (Geometrien der Kugeloberfläche und der Sattelfläche). Das zweite Modul greift die erweiterten Geometriekenntnisse auf und zeigt über einen historischen Zugang wie das Phänomen der Lichtablehnung am Sonnenrand auf die Geometrieeigenschaften des Raumes zurückgeführt werden kann. Wahlweise kann dies in einem dritten Modul anhand astronomischer Beobachtungen vertieft werden. Untersuchungen des gekrümmten Raumes um einen Neutronenstern illustrieren in diesem Modul den Einfluss der Raumzeit auf die Ausbreitung von Licht. Im vierten Modul werden die bisherigen räumlichen Betrachtungen um die Dimension der Zeit erweitert und darüber Teilchenbahnen in der gekrümmten Raumzeit analysiert.

Die technische Grundlage für diese Module bilden auf Moodle basierende Onlinekurse auf einer institutseigenen Plattform. Neben darin enthaltenen standardisierten Aufgaben- und Textformaten greifen die Kurse auf weitere webbasierte Applikationen und Inhalte wie kurze Erklärvideos, Geogebra-Applets und virtuelle Sektormodelle (ViSeMo) (Weissenborn et al., 2020) zurück.

### **Die Sicherstellung der Lernwirksamkeit und die geplante Evaluation**

Dieses Projekt basiert auf dem „Design-Based Research“-Ansatz (Design-Based Research Collective, 2003) und strebt durch iterative Zyklen aus Design, Anwendung, Analyse und Re-Design eine möglichst hohe Lernwirksamkeit der hier vorgestellten Lernumgebung an. Innerhalb der Anwendungszeiträume sind Experteninterviews mit Lehrkräften, Akzeptanzbefragungen (Jung, 1992) mit einzelnen Lernenden und Feldstudien in ganzen Klassenverbänden mit anschließender Auswertung der in Moodle gegebenen Antworten geplant. Ziel ist die Beantwortung der folgenden Fragestellung: Wie beeinflusst die digitale Darstellung von Sektormodellen den Lernerfolg der Schülerinnen und Schüler in der Vermittlung der Allgemeinen Relativitätstheorie? Dabei stellen sich einige Teilfragen, die es ebenfalls für das Erreichen einer hohen Lernwirksamkeit zu beantworten gilt:

F1: Welche Elemente der digitalen Lernumgebung wirken sich förderlich, welche hinderlich auf den Lernprozess aus?

F2: Welche Anforderungen müssen die verwendeten Applikationen erfüllen, um vom Nutzer mühelos und zielführend verwendet werden zu können?

F3: Welche Fehler der Lernenden im Umgang mit Sektormodellen sollten durch die Applikationen zugelassen und welche direkt unterbunden werden, um den Lernprozess der Schülerinnen und Schüler zu unterstützen sowie das Aufkommen von Fehlvorstellungen zu unterbinden?

### Literatur

- Design-Based Research Collective (2003). Design-based research: An emerging paradigm for educational inquiry. *Educational Researcher*, 32 (1), 5 – 8.
- Jung, W. (1992). Probing Acceptance, A Technique for Investigating Learning Difficulties. In: R. Duit et al. (eds.): *Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies*, Kiel: IPN, 278 – 295.
- Kaur, T., Blair, D., Moschilla, J., Stannard, W. & Zadnik, M. (2017). Teaching Einsteinian physics at schools: part 1, models and analogies for relativity. *Physics Education*, 52 (6), 065012.
- Kersting, M., Henriksen, E. K., Bøe, M. V. & Angell, C. (2018). General relativity in upper secondary school: Design and evaluation of an online learning environment using the model of educational reconstruction. *American Physical Society*, 14, 010130.
- Kersting, M. & Steier, R. (2018). Understanding curved spacetime - the role of the rubber sheet analogy in learning general relativity. *Science & Education*. 27(7) ,593 – 623.
- Kraus, U., Zahn, C. & Moustafa, M. (2018). General relativity in German secondary schools. In Nordmeier, V. & Grötzebach, H. (Hrsg.). *PhyDid B – Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung Würzburg 2018*. Beitrag DD 02.55.
- Kraus, U. & Zahn, C. (2018). Sector Models – A Toolkit for Teaching General Relativity: III. Spacetime geodesics. *European Journal of Physics*, 40, 015602.
- Weissenborn, S., Kraus, U., Zahn, C. & Görsch, N. (2020). Virtuelle Sektormodelle (ViSeMo). In Nordmeier, V. & Grötzebach, H. (Hrsg.). *PhyDid B – Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung Bonn 2020*. Beitrag DD 12.02.
- Zahn, C. & Kraus, U. (2014). Sector Models – A Toolkit for Teaching General Relativity: I. Curved Spaces and Spacetimes. *European Journal of Physics*, 35, 055020.
- Zahn, C. & Kraus, U. (2018). Sector Models – A Toolkit for Teaching General Relativity: II. Geodesics. *European Journal of Physics*, 40, 015601.