



Didaktisches Material zu diesem Beitrag:
www.wissenschaft-schulen.de

Einstein on Tour

Eine Wanderausstellung zur Relativitätstheorie

VON UTE KRAUS, ISABEL RICA MENDEZ UND ANDREAS KING



Schwarze Löcher und fast lichtschnelle Flüge – »Einstein on Tour« bringt interaktive Computersimulationen in die Schulen. Eigens erstellte Filme erklären die interaktiven Exponate und führen in die Grundlagen der Speziellen und der Allgemeinen Relativitätstheorie ein. Solche und viele andere Materialien stehen allen, die selbst mit der Relativitätstheorie experimentieren möchten, auch auf der Website »Tempolimit Lichtgeschwindigkeit« zur Verfügung, deren aktueller Inhalt auf der diesem Heft beigegebenen CD-ROM (Seite 35) gespeichert ist.

Wie wäre es, relativistische Situationen selbst zu erleben? Etwa in die Nähe eines Schwarzen Lochs zu reisen und sich dort einfach mal umzusehen. Oder fast lichtschnell zu fliegen und dabei aus dem Fenster zu schauen. Diese Ausgangsfrage steckt hinter den Computersimulationen, die im Zentrum der Wanderausstellung »Einstein on Tour« stehen.

Einsteins Relativitätstheorie beschreibt starke Schwerkraft und hohe Geschwindigkeiten. Das sind extreme Situationen, in denen Effekte bedeutungsvoll werden, die auf der Erde und bei Alltagsgeschwindigkeiten außerordentlich klein sind. Mit der Computersimulation holen wir diese relativistischen Effekte in den Alltag. Wir fahren beispielsweise fast lichtschnell

durch die Stadt oder spielen am Schreibtisch mit einem kleinen Schwarzen Loch.

Drei interaktive Exponate dieser Art enthält die Wanderausstellung, dazu kommen drei Filmstationen mit insgesamt elf Filmen. Einstein on Tour ist seit Anfang 2006 unterwegs und hat innerhalb von zwei Jahren 47 Schulen besucht (Abb. 1), wobei etwa 18 000 Schülerinnen und Schüler die Gelegenheit erhielten, sich spielerisch mit der Relativitätstheorie zu beschäftigen.

Die interaktiven Computersimulationen

Den spielerischen Zugang vermitteln in erster Linie die interaktiven Exponate. Sie entstanden am Institut für Astronomie und Astrophysik, Abteilung Theoretische

▲ Abb. 1: In den Jahren 2006 und 2007 hat »Einstein on Tour« an 47 Schulen in 34 verschiedenen Städten Station gemacht.

Astrophysik, der Universität Tübingen. Die markanteste der drei Simulationen ist sicherlich das relativistische Fahrrad. In dieser Simulation setzen wir die Lichtgeschwindigkeit auf 30 Kilometer pro Stunde herab, sodass wir mit dem Fahrrad beinahe lichtschnell durch Tübingen radeln können. Gefahren wird mit einem umgebauten Trimmrad. Während die Fahrerin lenkt, beschleunigt und bremst (Abb. 2a), erscheint in der Projektion vor ihr in Echtzeit der Anblick, den die Straße bei fast lichtschneller Bewegung bieten würde (Abb. 2b).

Und wenn die Fahrerin so kräftig in die Pedale tritt, dass sie die Lichtgeschwindigkeit fast erreicht, erscheinen die Hauskanten gekrümmt (wie Abb. 3b zeigt). Fahrradfahren kann man in verschiedenen Simulationsmodi. Schaltet man beispielsweise Dopplerverschiebungs- und Helligkeitseffekt ein, dann erscheinen bei hoher Geschwindigkeit die Häuser in ungewohnten Farben – wir sehen Infrarotstrahlung, die in den sichtbaren Bereich verschoben wurde – und dazu in veränderter Helligkeit. Die Straßenszene ist dann in Fahrtrichtung gleißend hell und wird zur Seite hin zunehmend dunkler.

Eine andere Option ist ein nichtrelativistisch berechneter Anblick der Straße, so wie man ihn vor Einsteins Spezieller Relativitätstheorie hätte erwarten müssen. Und um die Auswirkungen der hohen Geschwindigkeit ganz genau zu untersuchen, kann man schließlich noch eine feste Position anwählen und den Anblick von dieser Position aus bei verschiedenen Geschwindigkeiten abrufen.

Was wir in der Fahrradsimulation sehen, ist in [1] näher beschrieben und erklärt, im Internet (und auf der diesem

»Sterne und Weltraum« im Physik-Unterricht

Beim Spiel mit einem virtuellen Schwarzen Loch kann man mit den Auswirkungen der gravitativen Lichtablenkung experimentieren. Ein Arbeitsblatt, das Schülerinnen und Schüler wahlweise in Verbindung mit dem interaktiven Exponat der Wanderausstellung »Einstein on Tour« oder mit einer entsprechenden Simulation aus dem Internet-Portal (www.tempolimit-lichtge

www.schwindigkeit.de, Abschnitt Interaktives Schwarzes Loch) bearbeiten können, finden Sie unter www.wissenschaft-schulen.de.

Unser Projekt »Wissenschaft in die Schulen!« führen wir in Zusammenarbeit mit der Landesakademie für Lehrerfortbildung in Bad Wildbad durch. Es wird von der Klaus Tschira Stiftung gGmbH großzügig gefördert.



Heft auf Seite 35 beigefügten CD) kann man eine solche Fahrt auch im Film ansehen. Den realistisch wirkenden Bildern liegt ein detailliertes dreidimensionales Modell der Tübinger Altstadt zugrunde, das am Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik in Tübingen erstellt wurde (mehr dazu in [2]). Aus vielen Schulen haben wir erfahren, dass das relativistische Fahrrad bei den Jüngeren das beliebteste Exponat ist.

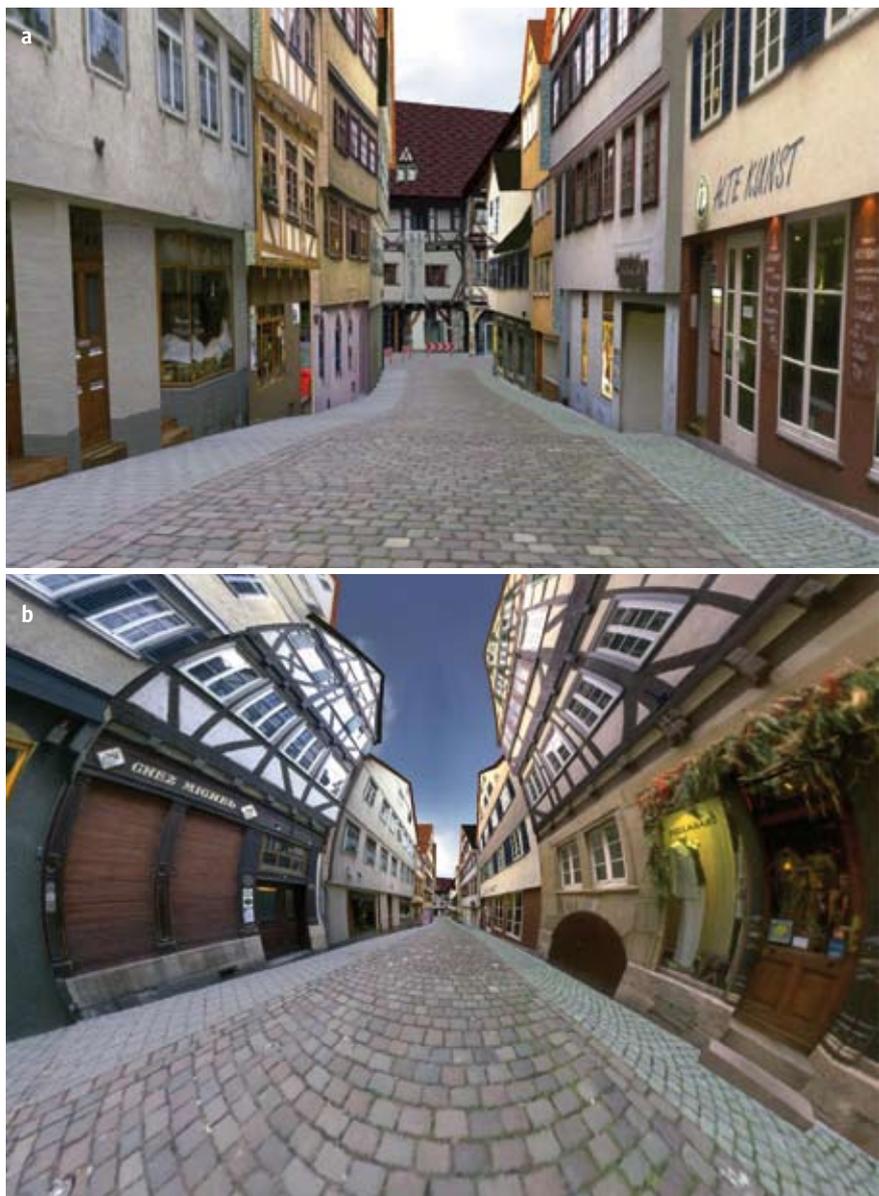
Das Fahrradfahren in der virtuellen Welt ist einfach, denn das Programm verhindert Kollisionen und Stürze. Anders beim zweiten interaktiven Exponat. Mit dem relativistischen Flugsimulator, der wie üblich mittels Joystick gesteuert wird, kann man fast lichtschnell über eine Insellandschaft fliegen. Eine sanfte Landung trotz der verzerrten Wahrnehmung in dieser virtuellen Welt (Abb. 4) ist eine echte Herausforderung!

Beim dritten interaktiven Exponat spielen wir mit einem Schwarzen Loch. Dass Licht durch Schwerkraft abgelenkt wird, war eine der ersten Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie und die erste, die erfolgreich getestet wurde. Nachgewiesen wurde der Effekt im Jahr 1919 an der Sonne als winzige Verschiebung der Beobachtungsorte von Sternen, die nahe bei der Sonne erscheinen. In der Nähe Schwarzer Löcher ist die Lichtablenkung dramatisch groß und führt dazu, dass die betrachteten Gegenstände völlig verzerrt oder auch mehrfach wahrgenommen werden.

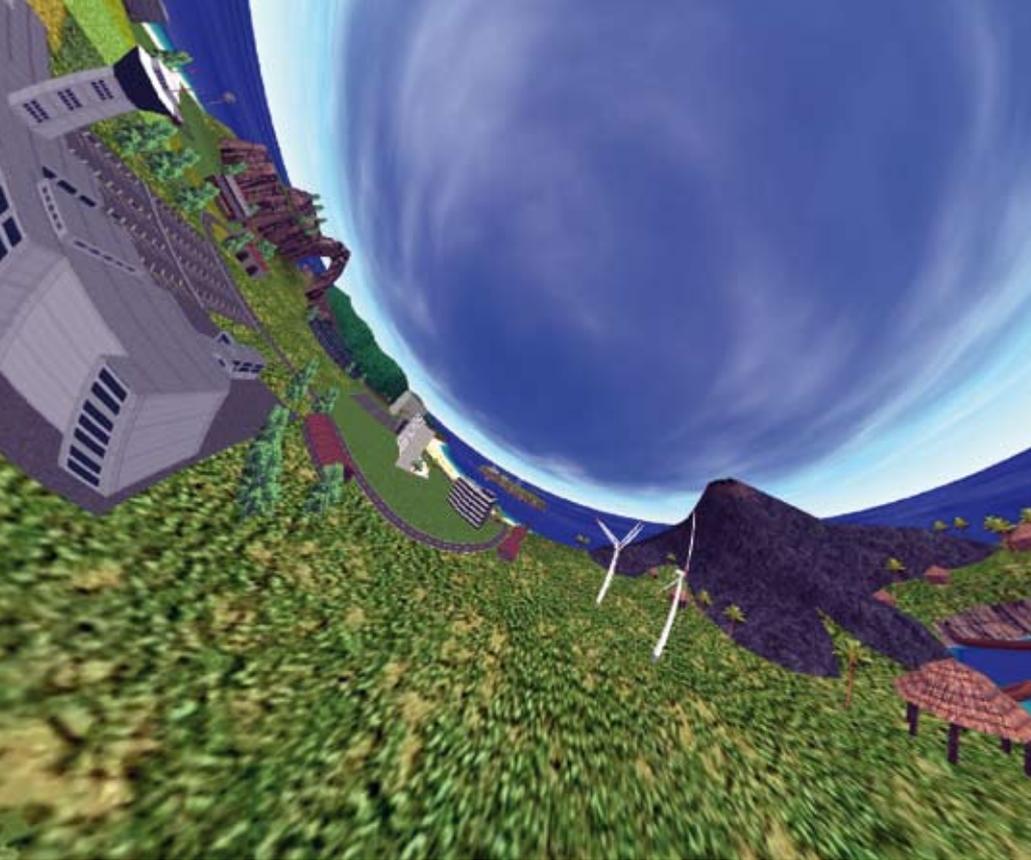
Zu diesem Exponat gehört eine Kamera, die den Ausstellungsbereich filmt. In der Simulation wird zwischen die Kamera und die gefilmten Besucher oder Gegenstände ein Schwarzes Loch gesetzt. Auf dem Bildschirm sieht man live, wie deren Aussehen verzerrt wird (Abb. 5). Per Mausklick kann man die Position oder die Masse des Schwarzen Lochs variieren oder statt des Kamerabilds eine von vier astronomischen

▲ Abb. 2: Das relativistische Fahrrad. (a) Mit dem Trimmrad wird gelenkt, beschleunigt und gebremst; (b) in der Projektion erscheint die Straße in Echtzeit so, wie sie bei fast lichtschneller Bewegung aussehen würde. (Aus [8])

▼ Abb. 3: Die Tübinger Marktgasse, wie sie (a) dem ruhenden Betrachter, (b) dem bewegten Betrachter bei 95 Prozent der Lichtgeschwindigkeit erscheint. Beide Bilder sind am selben Ort aufgenommen. (Aus [1])



Computersimulation: M. Borchers



Computersimulation: M. Borchers

◀ Abb. 4: Der relativistische Flugsimulator ist auch für erfahrene Computerspieler eine echte Herausforderung.

▶ Abb. 5: Spiel mit dem Schwarzen Loch: In der Simulation befindet sich zwischen der Kamera (oben in der Mitte des Rahmens) und den gefilmten Besuchern oder Gegenständen ein Schwarzes Loch. Auf dem Bildschirm sieht man live, wie deren Aussehen durch die Lichtablenkung am Schwarzen Loch verzerrt wird. Interaktiv kann man die Masse des Schwarzen Lochs verändern (Mausklick auf die schwarzen Kreisscheiben links) und statt des Kamerabildes eine von vier astronomischen Aufnahmen als Hintergrundbild wählen (Mausklick auf die Bilder unten).

Stimmen aus den Schulen

Bei den Jüngeren war die relativistische Fahrradfahrt durch Tübingen der Renner; insbesondere Jungengruppen waren kaum vom Flugsimulator wegzubekommen...

Zur großen Eröffnungsfeier wurde außer dem Fahrrad auch der Flugsimulator in einem großen Raum mit Beamer betrieben, das war vor allem für Väter der Magnet!

...und an zwei Nachmittagen war die Öffentlichkeit eingeladen. Insbesondere der zweite Nachmittag fand viele Besucher, die ihre Freude an den Simulationen hatten.

...ein relativistischer Flugsimulator, der auch erfahrene Computerspieler zur Verzweiflung brachte.

Die Erklärungen sind so anschaulich gehalten, dass sie bei entsprechender Anleitung ab der 9. Klasse problemlos zu verstehen sind.

Wir haben es so organisiert, dass immer zwei 13.-Klässler, die Physik als Neigungskurs gewählt hatten, eine Einführung in die Ausstellung gaben und als Experten für die Schüler zur Verfügung standen. Die 13.-Klässler haben im Physikunterricht die Ausstellung vorbereitet. Sie haben sich die Theorie erarbeitet (...), Plakate, eine Einführung und einen Fragebogen zum Thema Relativitätstheorie vorbereitet.

Am Schulfest (Tag der offenen Tür) war die Ausstellung öffentlich zugänglich. Wegen des großen Andrangs und

riesigen Interesses wurden die Öffnungszeiten verlängert.

...auch Öffnung vor dem Unterricht und in den Pausen, viel genutzt von Schülern der Klasse 5 (interaktive Stationen).

Ein Seminarkurs »Einstein« wird in der Oberstufe zum nächsten Schuljahr angeboten, für den sich zwei Drittel der Schülerinnen und Schüler gemeldet haben (drei Betreuungslehrer: Physik, Erdkunde, Geschichte).

Wer hätte vor einem Jahr gedacht, dass Traunsteins Jugend und Öffentlichkeit (...) scharenweise und freiwillig zu einer Ausstellung über Relativitätstheorie kommen würde?

Auch in den beiden Klassen 5 und 6 waren sehr viele Schüler von der Ausstellung begeistert.

Wir haben die Ausstellung durch eigene Exponate ergänzt: Schülerinnen und Schüler haben Schaukästen und Poster gestaltet, unter anderem zum lichtelektrischen Effekt und zu GPS.

Wir haben noch einen Ausdruck der Einstein-Vita (freie Enzyklopädie Wikipedia) aufgehängt, um größeren Gruppen eine Beschäftigung während des Wartens zu bieten. Diese Texte wurden gerne gelesen.

Die Ausstellung wurde von Schülermentoren betreut. Diese wurden am ersten Tag eingewiesen und haben dann in Zweiergruppen weitgehend selbstständig gearbeitet: Aufsicht führen, Erklärungen

geben, abends Rechner herunterfahren und morgens alles starten.

Da die Schülermentoren für alles zuständig waren, auch für die Erklärungen zur Physik, haben Klassen nicht nur mit ihren Physiklehrern, sondern auch in anderen Fächern (Deutsch, Ethik und Wissenschaft, Kunst) die Ausstellung besucht.

Die Schülermentoren haben den anderen gerne und viel erklärt.

Die jüngeren Schüler (5. Klassen) sind nur in der Pause durch die Ausstellung gegangen, die älteren waren im Unterricht dort.

Der Besuch ist schon ab Klasse 5 sinnvoll. Die Ziele, mit denen man eine Klasse durch die Ausstellung führt, sind natürlich für jede Klassenstufe andere. Bei den Jüngeren soll durch die Animationen das Interesse an der Physik geweckt werden.

Die 7. Klasse kann mit den Erklärungsfilmern noch nichts anfangen, die motorischen Sachen (Flugsimulator, Fahrrad) kommen aber gut an. Ab der 8. Klasse dürften die Filme für Interessierte zugänglich sein. Es haben sich auch Schülerinnen und Schüler ansprechen lassen, die ansonsten an der Physik nicht so sehr interessiert sind.

Das Einsteinmobil war an unserer Schule Bestandteil einer regionalen Lehrerfortbildung, zu der sich dann mehr als fünfzig Lehrkräfte aus ganz Oberbayern angemeldet haben.



H. Brüser, aus [8]



▲ Abb. 6: An den Filmstationen arbeiten die Schülerinnen und Schüler meist in kleinen Gruppen (aus [8]).



◀ Abb. 7: Filmstation »Spezielle Relativitätstheorie«: Mit Hilfe von Animationen werden Zeitdilatation und Längenkontraktion auf anschauliche Weise erklärt.

Aufnahmen als Hintergrundbild wählen. Mit einem simulierten Schwarzen Loch vor einem astronomischen Hintergrundbild können Sie auch im Internet spielen, siehe [3].

◀ Abb. 8: Filmstation »Relativistisch sehen«: Anhand einfacher geometrischer Objekte wird Schritt für Schritt erklärt, wie das verzerrte Aussehen bei schneller Bewegung zustandekommt.

Die Filme

Drei Filmstationen mit insgesamt elf kurzen Filmen liefern die Erklärungen zu den interaktiven Exponaten und führen darüber hinaus in die Grundlagen der Speziellen und der Allgemeinen Relativitätstheorie ein.

Diese Filme sind ursprünglich im Hinblick auf das Einsteinjahr 2005 entstanden. In Sonderausstellungen zu Albert Einsteins Leben und Werk sollten in diesem Jahr seine physikalischen Arbeiten, darunter die Spezielle und die Allgemeine Relativitätstheorie, auf allgemeinverständliche Weise dargestellt werden – keine leichte Aufgabe bei der weithin bekannten Schwierigkeit vor allem der Allgemeinen Relativitätstheorie, die eine sehr abstrakte und mathematisch anspruchsvolle Theorie ist. Die Filme sind das Ergebnis einer Zusammenarbeit zwischen der Abteilung Theoretische Astrophysik an der Universität Tübingen und dem Historischen Museum Bern. Physiker und Historiker setzten sich zusammen, um die erklärenden Filme zu erarbeiten, die jetzt in »Einstein on Tour« zu sehen sind. In langen Diskussionen wurde von der einen Seite die größtmögliche Verständlichkeit eingefordert, während die andere Seite auf inhaltlicher Korrektheit bestand. Die Vorgaben waren, dass vom physikalischen Kenntnisstand Vierzehnjähriger auszugehen war und



◀ Abb. 9: Filmstation »Allgemeine Relativitätstheorie«: Vier Filme behandeln gekrümmten Raum, gedehnte Zeit und Lichtablenkung im Schwerfeld.

dass kurze Filme von zwei bis vier Minuten Dauer entstehen sollten.

So entstanden die elf Filme für die Einstein-Ausstellungen im Stadthaus Ulm (2004) und im Historischen Museum Bern (2005/2006, in Teilen bleibend), die jetzt Bestandteil von »Einstein on Tour« sind. Wie die in den Schulen gesammelten Erfahrungen zeigen, werden die Filme je nach Interessenlage der Schülerinnen und Schüler im Allgemeinen ab der 9. Klasse gut verstanden und sind für manche der Älteren der interessanteste Teil der Ausstellung. An den Filmstationen wird meist in kleinen Gruppen gearbeitet (Abb. 6).

Die Filme wurden für die Schulausstellung in drei Filmstationen gruppiert: In der Filmstation »Spezielle Relativitätstheorie« (Abb. 7) werden mit Hilfe von Animationen die Zeitdilatation und die Längenkontraktion auf anschauliche Weise erklärt. Die Serie »Relativistisch sehen« (Abb. 8) erläutert die interaktiven Exponate Fahrrad und Flugsimulator. Anhand einfacher geometrischer Objekte wird Schritt für Schritt gezeigt, wie das verzerrte Aussehen bei schneller Bewegung zustandekommt (nachzulesen in [4] und [5], wobei diese Artikel über die Filme hinausgehen). Schließlich geht die Filmstation »Allgemeine Relativitätstheorie« (Abb. 9) auf gekrümmten Raum, gedehnte Zeit und die Lichtablenkung im Schwerfeld ein und liefert damit das Hintergrundwissen zum dritten interaktiven Exponat, dem Spiel mit dem Schwarzen Loch

(in [6] ist die Lichtablenkung an einem Schwarzen Loch ausführlich beschrieben; [7] diene als Vorlage für den in den Filmen gewählten Zugang zum Begriff des gekrümmten Raums).

»Einstein on Tour« an den Schulen

Träger des Projekts »Einstein on Tour« ist die Stiftung Interaktive Astronomie und Astrophysik, finanziert wird die Ausstellung durch Firmenspenden und die Heraeus-Stiftung. Die technische Realisierung liegt bei der Color-Physics GmbH, die didaktische Betreuung beim Institut für Astronomie und Astrophysik der Universität Tübingen.

Die Exponate kommen normalerweise für zwei Wochen an eine Schule. Nach Anlieferung und Aufbau gibt es eine Einführung für die Lehrerinnen und Lehrer; die Nutzung erfolgt dann in Eigenregie der Schule. Dabei beschreiten die einzelnen Schulen ganz verschiedene Wege (siehe auch den Kasten auf Seite 32). Üblicherweise geht das Angebot an Schüler, welche die Physikkurse der Oberstufe besuchen. Aber viele Schulen beziehen auch die Jüngeren ein, manche bereits die 5. Klasse. In zwei Dritteln der Fälle war die Ausstellung auch außerhalb des Unterrichts für die Schülerinnen und Schüler zugänglich. Häufig kamen Klassen von Nachbarschulen, und etwa die Hälfte der Schulen lud auch die interessierte Öffentlichkeit ein, zum Beispiel an einem Tag der offenen Tür oder beim Schulfest. Wenn Sie wissen möchten, ob und

wann »Einstein on Tour« in Ihre Gegend kommt, können Sie den Terminplan auf der Homepage des Projekts [9] einsehen. Und wenn Sie die Ausstellung für Ihre Schule reservieren möchten, finden Sie dort die Kontaktangaben. Im Jahr 2008 wird die Wanderausstellung weiter unterwegs sein; derzeit ist sie sechs bis neun Monate im voraus ausgebucht.

Aus den Schulen erfahren wir, dass sehr viele Schülerinnen und Schüler Interesse und Spaß am Besuch der Ausstellung zeigen. Bemerkenswerterweise wurde uns in 80 Prozent der Fälle berichtet, dass das Interesse bei Mädchen und Jungen gleich groß war, was bei Physik nicht eben die Regel ist. Auch waren nicht nur diejenigen angetan, die sich ohnehin für Physik interessieren; in ebenfalls 80 Prozent der Fälle war die Begeisterung für die Ausstellung unabhängig vom sonstigen Physikinteresse. Das Konzept der Ausstellung, die Besucher mit beeindruckenden Bildern, verblüffenden Simulationen und spielerischen Herausforderungen an die Relativitätstheorie heranzuführen, geht offensichtlich auf. □



Ute Kraus ist Privatdozentin am Institut für Astronomie und Astrophysik der Universität Tübingen. Ihre Arbeitsgruppe Physikdidaktik war an der Erstellung der Exponate von »Einstein on Tour« beteiligt und begleitet die Aus-

stellung mit didaktischen Materialien und durch Evaluation.



Isabel Rica Mendez promoviert zur Zeit an der Abteilung Theoretische Astrophysik der Universität Tübingen. Als Mitarbeiterin der Color-Physics GmbH ist sie an der Organisation des Projekts »Einstein on Tour« beteiligt.



Nach seinem Studium der Physik an der Universität Tübingen promoviert **Andreas King** dort in der Abteilung Theoretische Astrophysik. Er ist Mitarbeiter der Stiftung Interaktive Astronomie und Astrophysik.

Hinweise und Empfehlungen

- [1] **Ute Kraus und Marc Borchers:** Fast lichtschnell durch die Stadt. Physik in unserer Zeit, Heft 2/2005, S. 64.
- [2] **Homepage von »Virtual Tübingen«**, Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik: <http://vr.tuebingen.mpg.de/>
- [3] **Corvin Zahn und Ute Kraus:** Interaktives Schwarzes Loch, www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de/, Abschnitt Interaktives Schwarzes Loch
- [4] **Ute Kraus:** Bewegung am kosmischen Tempolimit – Visualisierungen zur Speziellen Relativitätstheorie, SuW 8/2005, S. 40.
- [5] **Ute Kraus:** Beobachtungen bei Hochgeschwindigkeitsflügen, Astronomie und Raumfahrt im Unterricht 2/2003, S. 35.
- [6] **Ute Kraus:** Reiseziel: Schwarzes Loch. Visualisierungen zur Allgemeinen Relativitätstheorie, SuW 11/2005, S. 46.

- [7] **Ute Kraus und Corvin Zahn:** Wir basteln ein Schwarzes Loch, www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de/, Abschnitt Wir basteln ein Schwarzes Loch
- [8] **Homepage des Hegel-Gymnasiums**, Stuttgart; <http://www.hgs.s.bw.schule.de/Aktuelles/sj0607/einstein07/einstein07.htm>. Dank an Herrn Brüser und die Schülerinnen und Schüler für die freundliche Erlaubnis, die Photos hier abzdrukken!
- [9] **Homepage von »Einstein on Tour«:** <http://www.einsteinmobil.de/>. Filme zu [1] sowie Online-Versionen von [4], [5] und [6] mit Filmen sind auf der Website <http://www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de/> zu finden. Eine CD-ROM dieser Website liegt diesem Heft auf der nebenstehenden Seite bei.



**STERNE UND
WELTRAUM**



**Institut für Astronomie
und Astrophysik
der Universität Tübingen**

präsentieren

Tempolimit Lichtgeschwindigkeit

Online-Artikel, Filme und Bastelbögen
der Physik-Didaktik-AG von Ute Kraus



Erkunden Sie die Offline-Version des Portals und besuchen Sie das Original im Internet unter www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de

► Spezielle Relativitätstheorie

- Bewegungen am kosmischen Tempolimit
- Fast lichtschnell durch die Stadt
- Das Aussehen relativistisch bewegter Objekte
- Relativistischer Fußball ...

► Astrophysik Röntgenpulsare

► Allgemeine Relativitätstheorie

- Reiseziel Schwarzes Loch
- Schritt für Schritt ins Schwarze Loch
- Der »richtige« Einsteinring

► Projekte Das Einsteinmobil

- Enthält 300 MByte Filme
- Seit 2002 online
- 20 000 Besucher im Monat
- Eigene Visualisierungen, durch neue didaktische Materialien aufbereitet