Visualisierung relativistischer Effekte

Fast lichtschnell durch die Stadt

Ute Kraus, Marc Borchers

Physik in unserer Zeit
Heft 2/2005

Visualisierung relativistischer Effekte

Fast lichtschnell durch die Stadt

Ute Kraus und Marc Borchers

Fast lichtschnell unterwegs? Was wir in Wirklichkeit nicht können, ermöglicht die Computersimulation. Eine Spritztour durch die Tübinger Altstadt illustriert, was wir bei einer solchen Geschwindigkeit sehen würden.

Die Spezielle Relativitätstheorie beschreibt Raum, Zeit und Bewegung. Relativistische Effekte werden allerdings erst bei Bewegungen mit annähernd Lichtgeschwindigkeit deutlich. Da die Lichtgeschwindigkeit rund eine Milliarde Stundenkilometer beträgt, entziehen sich so schnelle Bewegungen unserer Alltagserfahrung. Mit Computern lassen sich aber relativistische Geschwindigkeiten simulieren und auf diese Weise doch „erleben“. Wir stellen hier eine Simulation vor, bei der wir ein detailliertes dreidimensionales Modell von Tübingen verwenden und die Lichtgeschwindigkeit in diesem „virtuellen Tübingen“ auf 30 km/h heruntersetzen: So können wir bequem mit annähernd Lichtgeschwindigkeit durch die Altstadt radeln.

Einer der grundlegenden Effekte der Speziellen Relativitätstheorie ist die Längenkontraktion. In Einsteins Originalarbeit von 1905 [1] heißt es (V bezeichnet hier die Lichtgeschwindigkeit):

„Ein starrer Körper, welcher in ruhendem Zustande ausgemessen die Gestalt einer Kugel hat, hat also in bewegtem Zustande – vom ruhenden System aus betrachtet – die Gestalt eines Rotationsellipsoides mit den Achsen

$$R\sqrt{1-\left(\frac{v}{V}\right)^2},\ R,\ R\quad .$$

Während also die Y- und Z-Dimension der Kugel (also auch jedes starren Körpers von beliebiger Gestalt) durch die Bewegung nicht modifiziert erscheinen, erscheint die X-Dimension im Verhältnis $1:\sqrt{1-(v/V)^2}$ verkürzt, also um so stärker, je größer v ist. Für $v=V$ schrumpfen alle bewegten Objekte – vom ‚ruhenden‘ System aus betrachtet – in flächenhafte Gebilde zusammen.“

Sieht also ein schnell vorbeifliegender Körper in Flugrichtung gestaucht aus? Wörtlich genommen bedeutet Einsteins Behauptung genau dies. Und so hat es der Physiker George Gamov auch in seinem erstmals 1940 herausgegebenen Buch „Mr. Tompkins in Wonderland“ beschrieben [2, 3]. Er erzählt von einer fiktiven Welt, in der die Lichtgeschwindigkeit nur 30 km/h beträgt, so dass bereits ein Radfahrer mit nahezu Lichtgeschwindigkeit fahren kann. Dieser Radfahrer sieht die Häuser am Straßenrand angeblich so wie in Abbildung 1 dargestellt, nämlich in Fahrtrichtung kontrahiert.

Abb. 1 Illustration von George Gamov [3]: Der Radfahrer (und mit ihm der Betrachter) fährt mit annähernd Lichtgeschwindigkeit durch die Straße und sieht die Häuser verkürzt.

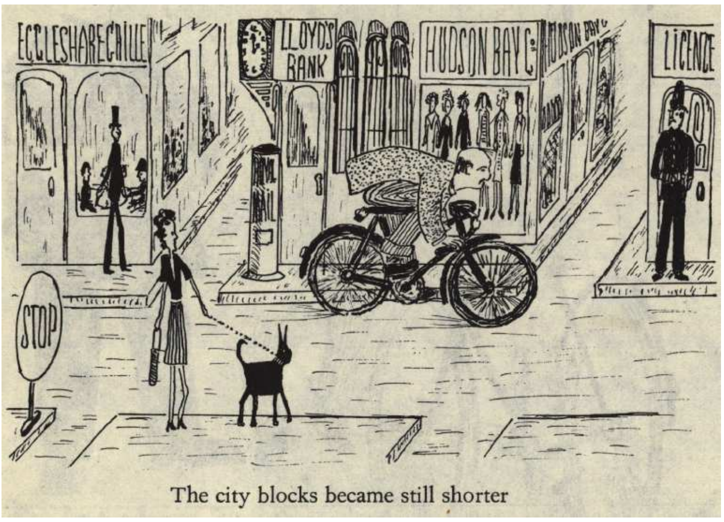

Abb. 2 Häuser auf dem Tübinger Marktplatz. So sieht sie ein Radfahrer, der viel langsamer als c von links nach rechts vorbeifährt und über die linke Schulter zur Seite blickt.

Dieses Bild ist allerdings völlig falsch. Gamov hat nämlich die Auswirkungen der endlichen Lichtlaufzeit nicht bedacht. Im täglichen Leben dürfen wir wegen der im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit stets kleinen Relativgeschwindigkeiten durchaus so tun, als sei die Lichtgeschwindigkeit unendlich groß. Bei fast lichtschneller Bewegung ist das selbstverständlich nicht mehr gerechtfertigt. Was wir dann sehen würden, wäre sogar wesentlich davon beeinflusst, dass Licht sich mit einer endlichen Geschwindigkeit ausbreitet.

Wie ein fast lichtschneller Radfahrer tatsächlich die Häuser am Straßenrand sehen würde, zeigen die Abbildungen 2 bis 4 (in den Bildunterschriften bezeichnen wir auch die auf 30 km/h reduzierte Lichtgeschwindigkeit wie üblich mit c). In Abbildung 2 sieht man die Häuser so, wie sie ein ruhender oder langsam bewegter Betrachter wahrnimmt. Bei einer fast lichtschnellen Relativgeschwindigkeit wären die Häuser, wenn man ihre Gestalt *ausmessen* würde, längenkontrahiert wie von Einstein beschrieben. Ihren Anblick im Sinne Gamovs zeigt Abbildung 3. Wenn jedoch der fast lichtschnelle Radfahrer die Häuser *anschaut*, dann sieht er sie gedreht und verzerrt (Abbildung 4)!

Dass wegen der endlichen Lichtlaufzeit ein fast lichtschneller Betrachter seine Umgebung verzerrt sieht, ist erst erstaunlich spät erkannt worden. Schließlich weiß man seit Olaf Römers Arbeiten von 1676, dass Licht sich mit einer endlichen Geschwindigkeit ausbreitet. Aber erst 1924 wurde der Lichtlaufzeiteffekt von Anton Lampa [4] erstmals beschrieben. In der Folge waren die Arbeiten von Roger Penrose [5] und James Terrell [6] aus dem Jahr 1959 der Ausgangspunkt für zahlreiche weitere Untersuchungen ([7] gibt eine Literaturübersicht).

Spritztour durch die Marktgasse

Wie führt nun die endliche Lichtgeschwindigkeit zu solchen überraschenden optischen Eindrücken? Um diese Frage systematisch anzugehen, betrachten wir dieselbe Szene bei immer höheren Geschwindigkeiten, die sich unserer „Tübinger Lichtgeschwindigkeit“ von 30 km/h schrittweise annähern.

Wenn wir zunächst in Ruhe in der Marktgasse neben der Alten Kunst stehen und auf das Stadtmuseum blicken, das am Ende der Gasse in der quer verlaufenden Kornhausstraße steht, dann haben wir den Anblick von Abbildung 5a vor uns. Wir drehen nun mit dem Fahrrad einige Runden in der Altstadt und kommen dabei immer wieder bei der Alten Kunst vorbei, jedesmal mit höherer Geschwindigkeit. Immer wenn wir exakt den Ort passieren, an dem Abbildung 5a entstanden ist, machen wir einen Schnappschuss mit Blick in Fahrtrichtung.

Das Ergebnis zeigen die Abbildungen 5b bis 5d: Je schneller wir sind, desto weiter scheint das Stadtmuseum in die Ferne zu rücken. Die Alte Kunst, die sich seitlich neben uns befindet, sehen wir immer weiter vor uns. Bei 80% der Lichtgeschwindigkeit rückt das Nachbarhaus, das in Ruhe außerhalb unseres Blickfelds lag, mit seinem Torbogen ins Blickfeld. Bei 95% der Lichtgeschwindigkeit sehen wir zusätzlich das Fenster und die Tür neben dem Torbogen und bei 99% der Lichtgeschwindigkeit schließlich noch ein weiteres Haus, während die Alte Kunst in der Ferne kaum noch zu erkennen ist. Bei zunehmender Geschwindigkeit nehmen wir die Häuser zudem merklich verzerrt wahr.

Alle vier Aufnahmen sind am selben Ort entstanden. Dort erreichen die bewegte Kamera dieselben Lichtstrahlen, die auch bei einer ruhenden Kamera eintreffen würden. Warum entsteht trotzdem nicht dasselbe Bild?

Abb. 3 Perspektivischer Blick auf die längenkontrahierten Häuser im Sinne Gamovs. Die Relativgeschwindigkeit beträgt $0{,}9\,c$.

Abb. 4 So sieht ein Radfahrer die Häuser auf dem Tübinger Marktplatz, wenn er mit $0{,}9\,c$ von links nach rechts vorbeifährt und dabei über die linke Schulter zur Seite blickt.

Der Grund dafür ist die Aberration: Sie beschreibt die Tatsache, dass es vom Bewegungszustand des Beobachters abhängt, welche Richtung ein Lichtstrahl (oder eine andere Bewegung) seiner Ansicht nach hat. Anhand einer Lochkamera kann man sich leicht klarmachen, dass es Aberration geben muss, wenn Licht sich mit endlicher Geschwindigkeit ausbreitet. Wir stellen uns also vor, dass wir für die Aufnahmen in der Marktgasse eine solche Lochkamera verwenden (Abbildung 6).

Zwei Faktoren führen dazu, dass die bewegte Lochkamera (Abbildung 7) ein anderes Bild produziert als die ruhende:

1. Die bewegte Lochkamera ist in Bewegungsrichtung um den Faktor $\sqrt{1-v^2/c^2}$ längenkontrahiert (v bezeichnet hier die Geschwindigkeit der Kamera). Bei alltäglichen Geschwindigkeiten ist dieser Faktor praktisch gleich Eins: Bei $v = 100\,\mathrm{km/h}$ beträgt er zum Beispiel $1 - 4 \cdot 10^{-15}$. Bei 90% der Lichtgeschwindigkeit ist die Lochkamera aber immerhin auf 44% ihrer Ruhelänge verkürzt. Der verkürzte Abstand zwischen Lochblende und Bildfeld bewirkt, dass Objekte verkleinert abgebildet werden.

2. Das Licht braucht eine gewisse Zeit, um von der Lochblende bis zum Bildfeld zu gelangen. In dieser Zeit bewegt sich die Lochkamera weiter. Abbildung 7 illustriert, dass die Kamerabewegung den Lichtweg zum Bildfeld noch weiter verkürzt und dadurch das Bild zusätzlich verkleinert.

Die verkleinerte Abbildung von Objekten in der bewegten Kamera erweckt den Eindruck einer größeren Entfernung: Sie erklärt, warum das Stadtmuseum am Ende der Gasse in den Abbildungen 5b bis 5d immer weiter in die Ferne zu rücken scheint.

Internet

Animationen und viel Material zu relativistischen Geschwindigkeiten

www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de

Nähere Informationen zum Modell von Tübingen

vr.tuebingen.mpg.de

Der zweite Faktor ist auch für die beobachteten Verzerrungen verantwortlich. Je schräger nämlich ein Strahl in die Kamera eintritt, desto länger ist er bis zum Bildfeld unterwegs. Bei einer längeren Laufzeit wirkt sich die Kamerabewegung stärker aus und der Auftreffpunkt verschiebt sich weiter in Richtung der Bildmitte. Bildet also eine ruhende Kamera eine senkrechte Hauskante als gerade Linie ab (Abbildung 5a), dann zeigt die bewegte Kamera diese Linie gekrümmt: Die äußeren Punkte sind überproportional stark in Richtung Bildmittelpunkt verschoben. Mit wachsender Geschwindigkeit krümmt sich die Linie immer stärker.

Wechseln wir nun ins Bezugssystem der bewegten Kamera. Aus dem Auftreffpunkt eines Lichtstrahls kann man auf den Winkel schließen, unter dem dieser Strahl in die Kamera eingetreten sein muss (Abbildung 8). Wir stellen fest, dass ein gegebener Strahl für den bewegten Beobachter stets steiler von vorne kommt als für den ruhenden: Dies ist das Phänomen der Aberration. Der Zusammenhang zwischen den beiden Richtungen ist natürlich unabhängig davon, ob die Lichtstrahlen mit einer Lochkamera oder auf andere Weise, etwa im Auge, registriert werden.

Die vier Aufnahmen der Tübinger Marktgasse sind alle am selben Ort entstanden, neben der Alten Kunst. Bei hohen Geschwindigkeiten sehen wir auch die angrenzenden Häuser, die sich seitlich neben unserer momentanen Position oder sogar dahinter befinden. Wie gelangt Licht von diesen Häusern in die Kamera, die ja nach vorne gerichtet ist? Abbildung 9 zeigt, dass eine bewegte Lochkamera tatsächlich nach hinten schauen kann, und zwar umso weiter, je schneller sie ist. Im Internet kann man eine Animation dieser Grafik anschauen („Internet“, [8]).

Abb. 5 a) Die Tübinger Marktgasse mit Blick in Richtung Stadtmuseum, aus der Ruhe aufgenommen. Die Kamera hat einen Öffnungswinkel von 60° in vertikaler und 75° in horizontaler Richtung.

Abb. 5 b) $0{,}8\,c$, selber Ort wie a), Blick in Fahrtrichtung.

Abb. 6 LOCHKAMERA
Das Licht, das durch die Lochblende eintritt, erzeugt auf der hinteren Wand der Lochkamera ein Bild.

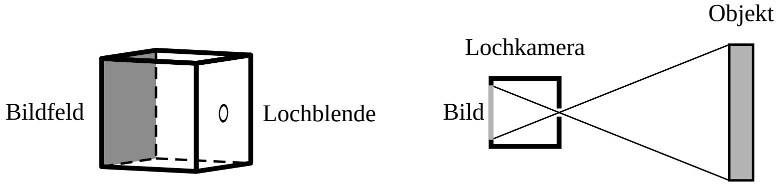

Abb. 7 Bildentstehung in einer mit $0{,}9c$ bewegten Lochkamera. Zwischen dem Eintritt des Lichts durch die Lochblende (oben) und seinem Auftreffen auf das Bildfeld (unten) bewegt sich die Kamera weiter.

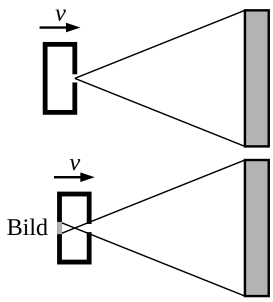

Abb. 8 Eine ruhende Kamera (links) und eine bewegte Kamera (rechts, hier bewegen wir uns mit) haben dasselbe Objekt von derselben Position aus aufgenommen. Mit wachsender Geschwindigkeit empfängt die Kamera die Lichtstrahlen von dem Objekt aus einem immer kleineren Winkelbereich.

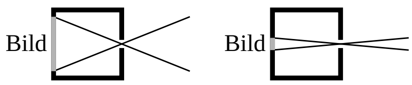

Abb. 9 Eine Lochkamera bewegt sich mit $0{,}95c$. Ein Photon, das schräg von hinten vor die Kamera läuft, kann von der Blende eingefangen und auch noch vom Bildfeld eingeholt werden. Je schneller die Kamera ist, desto weiter kann sie hinter sich schauen.

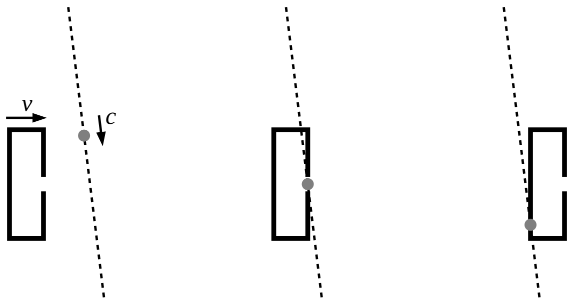

Abb. 5 c) $0{,}95c$, selber Ort wie a), Blick in Fahrtrichtung.

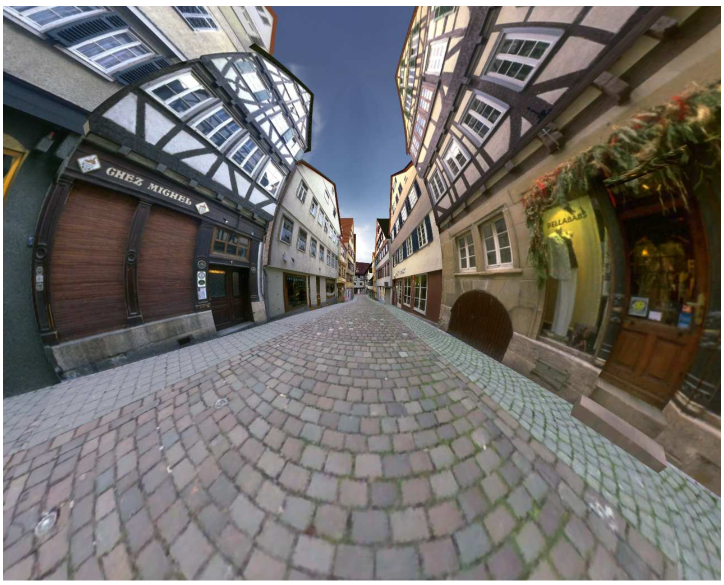

Abb. 5 d) $0{,}99c$, selber Ort wie a), Blick in Fahrtrichtung.

Kommen wir an dieser Stelle noch einmal auf unser erstes Beispiel zurück. Wenn der langsame Fahrradfahrer an den Häusern auf dem Tübinger Marktplatz vorbeikommt, sieht er beim Blick zur Seite die Giebelseiten (Abbildung 2). Dem fast lichtschnellen Fahrradfahrer erscheinen diese Häuser verzerrt und gedreht, wenn sie in seinem seitlichen Blickfeld liegen (Abbildung 4); zusätzlich zu den Giebelseiten ist auch die ganze Längsseite des äußeren Fachwerkhauses sichtbar. Wie kommt es, dass der schnelle Radfahrer diese Hauswand sieht, der langsame Radfahrer aber nicht?

Der Grund liegt darin, dass wir hier zwei Bilder vergleichen, auf denen *dieselben* Häuser zu sehen sind: Dafür müssen sich der langsame und der schnelle Beobachter jedoch *an verschiedenen Orten* befinden. In dem Augenblick, in dem der schnelle Radfahrer beim Blick zur Seite diese Häuser sieht, ist er schon an ihnen vorbei. Er hat die Häuser im Rücken und das äußere Fachwerkhaus wendet ihm die Längsseite zu. Dass die Häuser gleichwohl in seinem Blickfeld liegen, ist wiederum eine Folge der Aberration.

Farbe und Helligkeit

Die simulierten Bilder von der Fahrradfahrt durch ein Tübingen, in dem Tempo 30 für Licht gilt, sind durchweg farbig. Tatsächlich würden wir jedoch wegen des Doppler-Effekts ganz andere Farben und auch ganz andere Helligkeiten sehen. Zum Beispiel wäre beim Blick nach vorn und bei 95% der Lichtgeschwindigkeit der Wellenlängenbereich, der im Straßensystem zwischen 2,5μm und 5 μm liegt, ins Sichtbare verschoben – wir sähen also die Straße im Infraroten. Beim Blick zurück würden dagegen Wellenlängen aus dem ultravioletten Spektralbereich (65 - 130 nm) sichtbar werden. Mit der Verschiebung ist immer eine Skalierung des Spektrums verbunden: Beim Blick nach vorn ist die Intensität vergrößert, beim Blick zurück verringert.

Die wahrgenommene Helligkeit ändert sich also erstens, weil das Spektrum skaliert wird und zweitens, weil ein anderer Spektralbereich ins Sichtbare rückt. Im Allgemeinen ist die Änderung der Helligkeit weit dramatischer als die Farbänderung und führt dazu, dass die Umgebung beim Blick nach vorne gleißend hell und zur Seite hin zunehmend dunkler erscheint.

Da wir für die Tübinger Altstadt keine Spektren zur Verfügung haben, können wir Farbe und Helligkeit nicht realistisch simulieren. Abbildung 13 illustriert deshalb nur qualitativ, wie sich der Intensitätseffekt auswirkt.

Weitere Sehenswürdigkeiten

Die bisherigen Beispiele haben gezeigt, dass wir Objekte stark verzerrt sehen, wenn wir sie mit annähernd Lichtgeschwindigkeit und geringem Abstand passieren. Diese Regel hat aber eine bemerkenswerte Ausnahme. Um sie zu illustrieren, haben wir eine fiktive Skulptur in Form einer Kugel in die Kirchgasse gesetzt (Abbildung 11).

Diese Kugel trägt wie ein Globus ein Netz aus Längengraden und Breitenkreisen. Wir fahren mit 90 % der Lichtgeschwindigkeit vorbei und machen eine Aufnahme, wenn wir uns gerade auf Höhe der Kugel befinden. Wie erwartet sehen wir die Kugel vor uns und nehmen das Gitternetz verzerrt wahr. Trotzdem bleibt der Umriss der Kugel kreisförmig!

Man kann allgemein zeigen, dass eine Kugel immer mit kreisförmigem Umriss gesehen wird; das gilt bei jeder Geschwindigkeit und für jeden Abstand [9].

Wir beschließen die Stadrundfahrt mit einem Flug und schauen aus der Vogelperspektive auf den Marktplatz hinunter. Abbildung 12 zeigt seinen Anblick während eines Sturzfluges mit 90 % der Lichtgeschwindigkeit; dieser Schnappschuss entsteht in einer Höhe von 10 m über dem Erdboden.

Abb. 10 Die Marktgasse bei $0{,}95\,c$, vom selben Ort aus aufgenommen wie in Abbildung 5. Hier ist nun auch der Intensitätseffekt berücksichtigt.

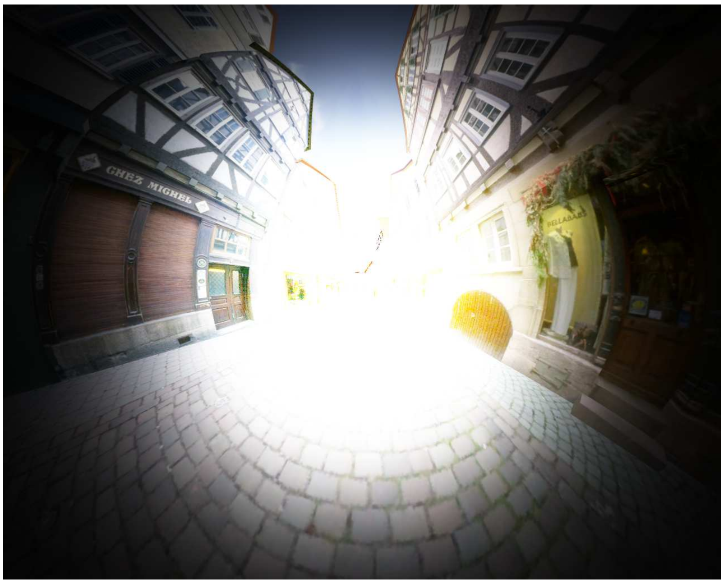

Abb. 11 Vorbeifahrt an einer fiktiven Skulptur in Form einer Kugel mit Gradnetz. Wir fahren mit $0{,}9\,c$ und blicken in Fahrtrichtung.

Simulation der relativistischen Radfahrt

Zur Simulation der relativistischen Radfahrt wird zunächst die komplette Umgebung aus der Sicht eines ruhenden Beobachters dargestellt. Dieser befindet sich an derselben Position wie der virtuelle Radfahrer. Dazu wird eine sogenannte Cubemap erzeugt: sechs Bilder auf den Seiten eines Würfels, die den Blick in die sechs Raumrichtungen wiedergeben. In einem zweiten Schritt wird daraus das Bild berechnet, das der bewegte Radfahrer sieht. Für jeden darzustellenden Bildpunkt wird die zugehörige Richtung vom Bezugssystem des Radfahrers in das Bezugssystem des gedachten ruhenden Beobachters umgerechnet. Dies geschieht mit der Formel für relativistische Aberration. Anschließend wird aus der Cubemap die Farbe für den Bildpunkt bestimmt.

Die relativistische Fahrradfahrt gibt es auch in interaktiver Form. Gefahren wird auf einem Trimmrad, mit dem man lenken, beschleunigen und bremsen kann. Vor dem Trimmrad steht eine Leinwand, auf die in Echtzeit der Anblick der Straße projiziert wird. Bei der Echtzeitsimulation muss die Cubemap jeweils für die momentane Position des Radfahrers neu erzeugt werden. Für jedes Bild wird die Umgebung mit etwa 20000 Polygonen und 200 Megabyte Daten für die sogenannte Bildtextur sechsmal gezeichnet. Ein einzelner High-End Rechner schafft dies in weniger als 10 ms und erzeugt dabei eine Cubemap mit 6 Millionen Bildpunkten. Die relativistische Umrechnung benötigt weniger als 2 ms, so dass Bildraten von über 60 Bildern pro Sekunde möglich sind.

Relativistisches Radeln für Alle

Eine relativistische Fahrradfahrt ist natürlich dann am schönsten, wenn man selber fährt. Interaktiv durch Tübingen radeln kann man vom 7.5. bis zum 31.12.2005 im Deutschen Museum in München in der „Sonderausstellung Albert Einstein“.

Abb. 12 Der Tübinger Marktplatz, gesehen bei einem Sturzflug mit $0{,}9\,c$. Die momentane Höhe über dem Erdboden beträgt 10 m. Wir bewegen uns senkrecht nach unten und blicken in Flugrichtung.

Im Historischen Museum Bern haben Besucher die Möglichkeit, in der „Sonderausstellung Albert Einstein“ vom 16.6.2005 bis zum 17.4.2006 interaktiv und fast lichtschnell Einsteins Weg von seiner Wohnung bis zu seiner Arbeitsstelle im Berner Patentamt zu folgen.

Die relativistische Fahrradfahrt illustriert, wie man seine Umgebung sieht, wenn man sich annähernd lichtschnell bewegt. Wie verhält es sich nun umgekehrt, wenn die Kamera ruht und ein Objekt fast lichtschnell vorbeifliegt? Aufgrund des Relativitätsprinzips ist klar: Ob wir das Objekt oder die Kamera als bewegt betrachten, ist egal; in beiden Fällen entsteht derselbe Film. Die Erklärung ist aber je nach Standpunkt verschieden. Für den Fall des bewegten Objekts beschreibt [10] wie Lichtlaufzeiteffekte bewirken, dass ein fast lichtschnell bewegtes Objekt verzerrt und gedreht wahrgenommen wird. Dazu gibt es auch Filmsequenzen im Internet (siehe „Internet“, [8]).

Danksagung

Wir danken Prof. H. Bülthoff für die freundliche Erlaubnis, das am MPI für biologische Kybernetik erstellte dreidimensionale Modell der Tübinger Altstadt für diese Simulationen zu nutzen. Diese Arbeiten wurden von der DFG gefördert (SFB 382, SFB TR7).

Zusammenfassung

Eine Computersimulation ermöglicht es uns, mit annähernd Lichtgeschwindigkeit durch die Tübinger Fußgängerzone zu fahren. Was wir dabei sehen, ist verblüffend: Die Häuser vor uns rücken umso weiter in die Ferne, je mehr wir beschleunigen; gleichzeitig erscheinen die Hauskanten in unserer Nähe immer stärker gekrümmt.

Der Grund für diese merkwürdigen Bilder ist die sogenannte Aberration: Ein und derselbe Lichtstrahl hat für den fahrenden Beobachter eine andere Richtung als für denjenigen, der am Straßenrand steht. Dieser Effekt ist im Alltag klein; wenn wir aber in der Simulation fast lichtschnell durch die Tübinger Altstadt rasen, ist er dramatisch groß.

Stichworte

Spezielle Relativitätstheorie, Längenkontraktion, Aberration.

Literatur

[1] A. Einstein, Annalen der Physik 1905, **17**, 891

[2] G. Gamov, Mr. Tompkins’ seltsame Reisen durch Kosmos und Mikrokosmos, Vieweg Verlag, Wiesbaden 1984

[3] G. Gamow, Mr. Tompkins in Paperback, Cambridge University Press, Cambridge 1967

[4] A. Lampa, Z. Physik 1924, **72**, 138

[5] R. Penrose, Proc. Cambr. Phil. Soc. 1959, **55**, 137

[6] J. Terrell, Phys. Rev. 1959, **116**, 1041

[7] U. Kraus, Am. J. Phys. 2000, **68**, 56

[8] C. Zahn, U. Kraus, www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de

[9] M. L. Boas, Am. J. Phys. 1961, **29**, 283

[10] U. Kraus et al., Physik Journal **1 (2002) Nr. 7/8**, 77

Die Autoren

Ute Kraus hat an den Universitäten Tübingen und Grenoble Physik studiert und 1992 promoviert. Danach Forschungsaufenthalt an der Pennsylvania State University (USA), 2003 Habilitation an der Universität Tübingen. Derzeit arbeitet sie am Institut für Theoretische Astrophysik in Tübingen sowie am MPI für Gravitationsphysik in Golm. Ihre Arbeitsgebiete sind relativistische Astrophysik, Visualisierung und Fachdidaktik.

Marc P. Borchers studierte Physik in Tübingen und Tucson. Er entwickelt Flugsimulationen und promoviert gerade am Institut für Theoretische Astrophysik und Computational Physics in Tübingen.

Anschrift:

Dr. Ute Kraus, Marc Borchers,
Theoretische Astrophysik,
Auf der Morgenstelle 10C,
72076 Tübingen,
kraus@tat.physik.uni-tuebingen.de,
borchers@tat.physik.uni-tuebingen.de