

Der Marktplatz von Hildesheim aus der Vogelperspektive während eines Sturzfluges mit 99% der Lichtgeschwindigkeit.

## Animationen zur Relativitätstheorie

Mit Visualisierungen aus der Ich-Perspektive  
relativistische Phänomene sichtbar machen

Von Ute Kraus, Corvin Zahn und Sven Behrens

Unser erster unbefangener Eindruck von Naturphänomenen beruht auf unmittelbarer Sinneserfahrung. Insbesondere die visuellen Eindrücke prägen unsere intuitive Vorstellung von den Erscheinungen und Gesetzmäßigkeiten der Natur. Während viele Bereiche der Schulphysik mit der menschlichen Erfahrung verbunden sind, gilt das für Themen der modernen Physik in der Regel jedoch nicht. Unsere Sinne erlauben nun einmal keine unmittelbare Wahrnehmung, wenn Objekte mikroskopisch klein sind (z. B. Atome) oder sehr weit weg (z. B. entfernte Sterne). Sehr schnell ablaufende Vorgänge (z. B. ein Lichtsignal) oder sehr langsame (z. B. die Entwicklung von Galaxien) sind ebenfalls unserer direkten Beobachtung entzogen.

Die direkte Beobachtung lässt sich jedoch auf dem Computer simulieren. Im Rahmen der bekannten physikalischen Gesetze werden die Bilder berechnet, die ein Betrachter mit erweiterter Wahrnehmungsfähigkeit sehen würde. Zur Darstellung zeitlicher Abläufe werden aus einer großen Anzahl von Einzelbildern Animationen erstellt. Derartige Visualisierungen aus der Ich-Perspektive ermöglichen die Begegnung mit den Phänomenen, bevor physikalische Begriffe, Modelle und die mathematische Beschreibung eingeführt werden.

In diesem Beitrag zeigen wir, wie Visualisierungen aus der Ich-Perspektive bei einer ersten Einführung in die Spezielle Relativitätstheorie eingesetzt werden können. Vorkenntnisse in Relativitätstheorie werden dabei nicht vorausgesetzt. Die Schülerinnen und Schüler sollten mit dem Begriff der

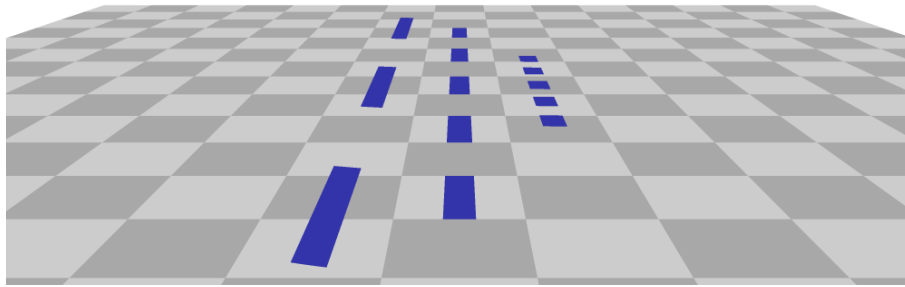


Abbildung 1: Stäbe. Links: Annäherung mit 70% der Lichtgeschwindigkeit; Mitte: ruhend; rechts: Wegflug mit 70% der Lichtgeschwindigkeit

Geschwindigkeit, mit der Sender-Empfänger-Vorstellung des Sehens sowie mit der Geradlinigkeit der Lichtausbreitung bereits vertraut sein. Sie lernen das Phänomen der Längenkontraktion kennen und vertiefen ihr Verständnis des Sehvorgangs, indem sie die Sender-Empfänger-Vorstellung im neuen und ungewöhnlichen Kontext fast lichtschneller Bewegungen anwenden.

Auf der Internetseite [1] stehen die in diesem Beitrag besprochenen Animationen sowie weitere Aufgaben für den Unterricht zur Verfügung.

## Fast lichtschnelle Bewegung

Das Thema Relativitätstheorie ist in manchen Bundesländern Teil des Lehrplans, jedoch nicht in allen. Typischerweise stehen Längenkontraktion und Zeitdilatation am Anfang. Diese Phänomene treten bei Bewegungen mit annähernd Lichtgeschwindigkeit auf.

Um sich die Längenkontraktion als Phänomen ansehen zu können, müsste man die Bewegung eines fast lichtschnellen Objekts beobachten. So etwas liegt weit jenseits unserer technischen Möglichkeiten. Sollte sich beispielsweise ein Auto mit 90% der Lichtgeschwindigkeit bewegen, dann müsste es eine kinetische Energie von ca.  $10^{20}$  J haben, wenn man für die Masse des ruhenden Autos eine Tonne annimmt. Das ist etwa das Siebenfache des Primärenergiebedarfs von Deutschland im Jahr 2012. Auch die direkte visuelle Beobachtung der Fahrt wäre uns nicht möglich: Um einen 300 Meter breiten Platz zu überqueren, würde das Auto eine Millionstel Sekunde benötigen.

Wenn man nun den Anblick einer fast lichtschnellen Fahrt auf dem Computer simulieren möchte, dann muss man folglich die Zeitskala so wählen, dass sich die Bewegung verfolgen lässt. Wir versetzen dazu die Szene in eine virtuelle Welt, in der die Lichtgeschwindigkeit reduziert ist, so dass sie im Bereich alltäglicher Geschwindigkeiten liegt. Die relativistischen Phänomene treten dann bereits bei Alltagsgeschwindigkeiten auf.

Die im Folgenden vorgestellten Animationen [1] zeigen am Beispiel der Längenkontraktion, wie man ein Phänomen in einer auf dem Computer simulierten Animation ansehen und dadurch kennenlernen kann. An eine solche Einführung könnte dann die übliche Darstellung von Zeitdilatation und Längenkontraktion anschließen.

## Wie sieht ein fast lichtschneller Stab aus?

### Beobachtung des Phänomens

Zur virtuellen Beobachtung einer fast lichtschnellen Bewegung ist es sinnvoll, mit einer klaren und einfachen geometrischen Form zu beginnen. Ein dünner langer Stab zeigt bereits die wichtigsten Phänomene, ohne aber durch eine Vielzahl von Effekten zu verwirren.

Als Orientierung für das Auge dient eine mit quadratischen Fliesen belegte ebene Fläche, über die Stäbe hinweggleiten. Abbildung 1 zeigt ein Standbild aus der entsprechenden Animation: In der Bildmitte liegen fünf Stäbe unbewegt auf der Ebene. Man erkennt, dass die ruhenden Stäbe gerade genauso lang sind wie die Fliesen. Links im Bild bewegen sich fünf Stäbe hintereinander auf

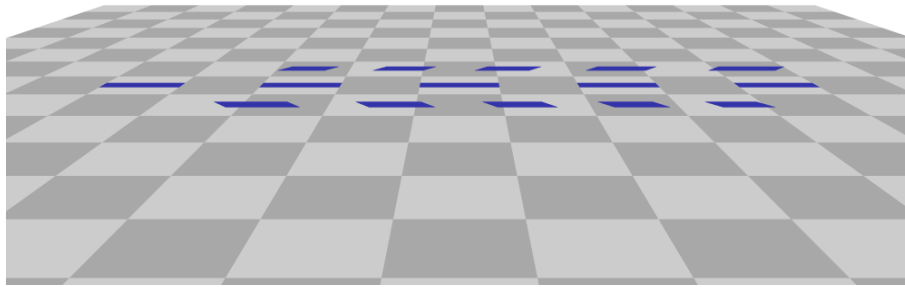


Abbildung 2: Dieselbe Szene wie in Abbildung 1, von der Seite gesehen. Die hinteren Stäbe bewegen sich nach links, die vorderen nach rechts

uns zu (nur drei sind gerade im Bild), rechts bewegen sich fünf weitere Stäbe von uns weg. Alle bewegten Stäbe haben dieselbe Geschwindigkeit: 70% der Lichtgeschwindigkeit. Alle dargestellten Stäbe sind, wenn sie ruhend abgemessen werden, gleich lang, nämlich so lang wie die Kante einer Fliese. Sie sehen in der Bewegung jedoch ganz unterschiedlich lang aus: Die herankommenden Stäbe erscheinen deutlich verlängert, die wegfliegenden stark verkürzt. Dies steht in klarem Gegensatz zu unserer Alltagserfahrung mit Autos oder Zügen, die in Bewegung weder länger noch kürzer erscheinen als in Ruhe.

Um die Sache weiter zu untersuchen, wird die Blickrichtung geändert. Abbildung 2 zeigt dieselbe Szene von der Seite. Die hintere Stabreihe bewegt sich nach links, die mittlere ruht, die vordere bewegt sich nach rechts. Nun sehen alle bewegten Stäbe gleich lang aus, jedoch kürzer als die ruhenden.

Wenn man sich die Animation als Film ansieht (s. [1]), fällt sofort auf, dass die heranfliegenden Stäbe wesentlich schneller erscheinen als die wegfliegenden. Der seitliche Vorbeiflug liegt dazwischen und erscheint in beiden Richtungen gleich schnell.

## Lichtlaufzeiten

Um den Anblick der schnell bewegten Stäbe zu verstehen, muss man sich bewusst machen, wie unser optischer Eindruck zustandekommt: Licht geht vom Objekt aus und gelangt in das Auge. Das Licht legt den Weg vom Objekt zum Auge mit einer sehr großen, aber doch endlichen Geschwindigkeit zurück. Es braucht für diesen Weg deshalb eine gewisse Zeit. Verschiedene Punkte auf dem Objekt sind unterschiedlich weit von unserem Auge entfernt; das Licht ist deshalb unterschiedlich lang unterwegs.

Der springende Punkt ist nun, dass unser optischer Eindruck von Licht bewirkt wird, das zu einem bestimmten Zeitpunkt, also *gleichzeitig* in das Auge trifft. Stellt man sich vor, dass das Bild von einer Kamera aufgenommen wird, dann entsteht das Bild durch Licht, das ankommt, wenn der Verschluss der Kamera gerade kurzzeitig geöffnet ist. Das Licht war aber je nach Ursprungsort verschieden lange unterwegs. Gleichzeitig eintreffendes Licht wurde also während einer gewissen Zeitspanne nach und nach emittiert. Wenn sich das Objekt nun während dieser Zeitspanne bewegt, dann resultiert ein verzerrtes Bild.

In Kasten 1 finden sich zwei Aufgaben, mittels derer sich die Schülerinnen und Schüler mit der Auswirkung von Lichtlaufzeiten auf die Wahrnehmung bewegter Objekte beschäftigen können.

## Längenkontraktion

Blickt man von der Seite auf die schnellbewegten Stäbe (s. Abb. 2), dann sind die Lichtwege von den beiden Stabenden zum Auge in etwa gleich lang. Ganz genau gilt das für einen Stab, der sich bei der Aussendung des Lichts gerade in der Bildmitte befindet. In diesem Fall gelangt Licht, das von den beiden Stabenden gleichzeitig ausgesandt wurde, auch gleichzeitig in das Auge. Wir sehen also die tatsächliche Länge des bewegten Stabs. Wie Abbildung 2 allerdings zeigt, sind die bewegten Stäbe jedoch kürzer als die ruhenden.

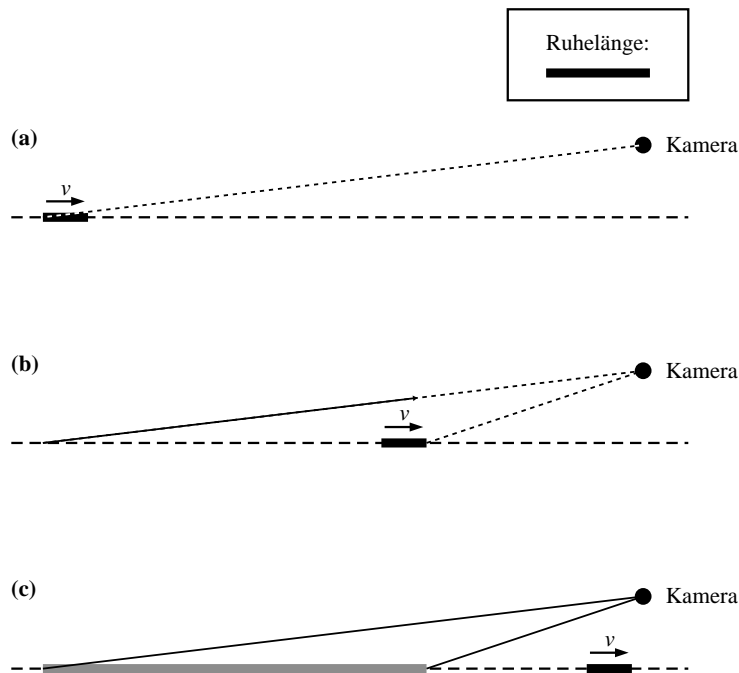


Abbildung 3: Zur scheinbaren Längenänderung eines Stabes, der sich einer Kamera nähert. Der Stab bewegt sich in Längsrichtung. Dargestellt sind zwei Lichtstrahlen, die vom Stabende (a) bzw. der Stabspitze (b) herkommen und gleichzeitig in die Kamera eintreten (c). Die Ursprungsorte der beiden Strahlen begrenzen den optisch wahrgenommenen Stab. Durchgezogenen Linien markieren zurückgelegte Lichtwege, punktierte Linien noch zurückzulegende Lichtwege.

Dies hat nun nichts mehr mit der Laufzeit der Lichtsignale zu tun. Was man hier sieht, ist die relativistische Längenkontraktion, eine der fundamentalen Aussagen der Speziellen Relativitätstheorie: Ein bewegtes Objekt ist in Bewegungsrichtung verkürzt. Nicht nur die Beobachtung von der Seite, jede Messung der Länge würde dieses Ergebnis liefern.

Im Gedankenexperiment könnte man die Länge beispielsweise messen, indem man die Positionen der beiden Enden des bewegten Stabs *zum selben Zeitpunkt* auf der karierten Fläche markiert und anschließend den Abstand zwischen den Markierungen ausmisst. Dieser Abstand wäre dann um so kleiner, je schneller sich das Objekt bewegt. Tabelle 1 gibt einige Zahlenwerte dafür an:

Geschwindigkeit $v$	Länge $100 \text{ cm} \sqrt{1 - v^2/c^2}$
0	100 cm
100 km/h	100 cm minus ein zehntausendstel Atomdurchmesser
100 Mio. km/h	99,6 cm
1 Mrd. km/h (0,93 c)	37 cm

Tab. 1: Längenkontraktion mit zunehmender Geschwindigkeit ( $c$ : Vakuumlichtgeschwindigkeit)

## Der Hildesheimer Marktplatz

Neben einfachen geometrischen Figuren, die vor allem klare Bilder liefern, sind realistische, alltagsnahe Szenen bei relativistischen Geschwindigkeiten von besonderem Interesse, beispielsweise Fahrten durch eine Stadt.

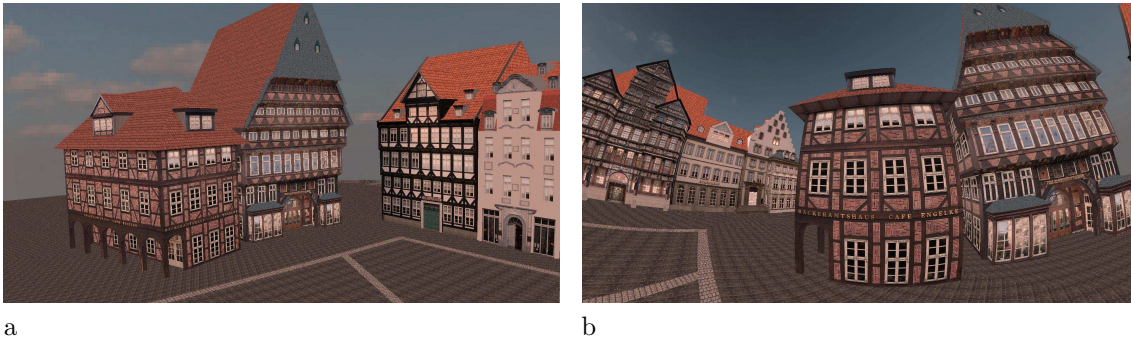


Abbildung 4: Fachwerkhäuser auf dem Marktplatz von Hildesheim, aus der Ruhe (a) und aus der Bewegung gesehen (b, 90% der Lichtgeschwindigkeit). Links im Vordergrund das Bäckeramtshaus mit dem Arkadengang, bei dessen Durchquerung die Schnappschüsse in Abb. 5 entstehen

Wir versetzen dazu den Marktplatz der Stadt Hildesheim in eine virtuelle Welt, in der die Lichtgeschwindigkeit nur 30 km/h beträgt. Abbildung 4a zeigt den Blick über den Marktplatz auf das Bäckeramtshaus (links) und das Knochenhaueramtshaus (Bildmitte) aus der Ruhe. Einen Schnappschuss von einer Fahrt in Richtung Bäckeramtshaus mit 27 km/h zeigt Abbildung 4b. Die Fassaden der Häuser sehen nun gewölbt aus.

## Längenänderung bei relativistischen Geschwindigkeiten

Im Folgenden soll am Beispiel des Marktplatzes noch einmal der visuelle Längeneindruck bei schneller Bewegung untersucht werden. Dazu durchfahren wir in der Animation mehrfach und mit zunehmender Geschwindigkeit den Arkadengang des Bäckeramtshauses der Länge nach. Abbildung 5 zeigt den Anblick des Arkadengangs jeweils im Augenblick des Eintritts in den Gang. Aus der Ruhe (Abb. 5a) sind auf der linken Seite fünf der sechs Säulen im Blickfeld, auf der rechten Seite erkennt man gerade noch einen Türrahmen der Eingangstür. Bei 50% der Lichtgeschwindigkeit (Abb. 5b), scheint das Ende des Ganges weiter in der Ferne zu liegen; zudem ist mehr als die Hälfte der Eingangstür sichtbar. Die Veränderung des Anblicks setzt sich bei 80% der Lichtgeschwindigkeit (Abb. 5c) in derselben Weise fort, bis bei 90% der Lichtgeschwindigkeit (Abb. 5d) die sechste Säule ins Blickfeld gelangt und die Haustür ganz sichtbar ist. Das Ende des Ganges scheint in weite Ferne gerückt zu sein.

Die Schülerinnen und Schüler können sich mit den Veränderungen bei zunehmender Geschwindigkeit mithilfe der Aufgabe in Kasten 2 beschäftigen.

## Vertiefungen

In der Marktplatzszene fallen neben der scheinbaren Längenänderung noch andere Effekte fast lichtschneller Bewegung auf. So erscheinen ebene Flächen gewölbt und gerade Kanten der Häuser sowie des Bodenmusters gebogen. Alle diese Phänomene kann man als Folge von Lichtlaufzeiteffekten verstehen. Die Überlegungen sind ähnlich wie die bei Abbildung 3 (s. Kasten 1) zur scheinbaren Stablänge angestellten und werden in [2] im Einzelnen erläutert.

Man könnte nun einwenden, dass das Beobachten bewegter Stäbe und die Fahrt über den Marktplatz doch zwei grundverschiedene Dinge sind: Im einen Fall bewegt sich das Objekt, im anderen der Betrachter. Aufgrund des Relativitätsprinzips gilt aber: Ob der Betrachter an einem Haus vorbeifährt oder das Haus am Betrachter vorbeifliegt, ist egal: Was der Betrachter sieht, ist in beiden Fällen dasselbe, wenn nur die Relativgeschwindigkeit dieselbe ist. Dennoch kann man die Beobachtungen natürlich auch vom Standpunkt eines bewegten Beobachters erklären und zeigen, weshalb die eigene schnelle Bewegung dazu führt, dass man die Umgebung verzerrt wahrnimmt. Diese Überlegungen sind in [3] detaillierter ausgeführt.

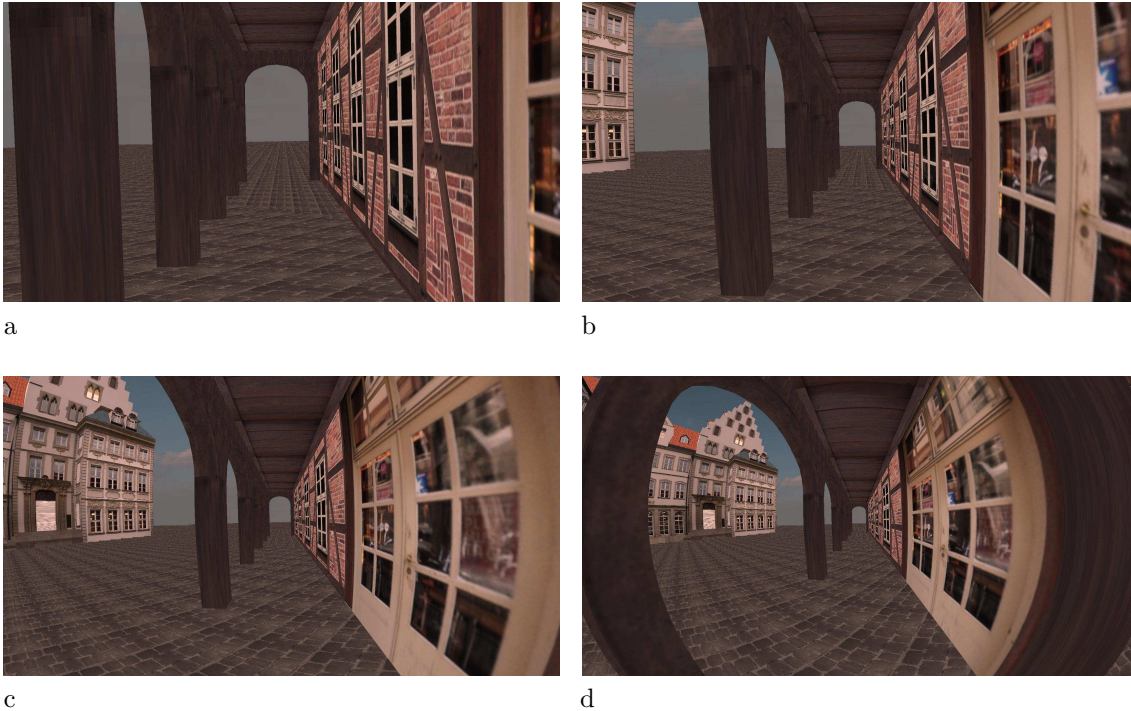


Abbildung 5: Schnappschüsse von Fahrten durch den Arkadengang des Bäckeramtshauses. Die Bilder entstehen im Augenblick des Eintritts in den Arkadengang. a) Geschwindigkeit null, b) 50% der Lichtgeschwindigkeit, c) 80% der Lichtgeschwindigkeit, d) 90% der Lichtgeschwindigkeit

## Resümee

Bei der Vermittlung relativistischer Physik sind Animationen auf zwei verschiedenen Ebenen hilfreich.

- Relativistische Phänomene kennen wir weder aus eigener Erfahrung, noch können wir sie im Schulversuch direkt beobachten. Animationen bieten physikalisch korrekt berechnete Bilder aus der Ich-Perspektive und ermöglichen so Beobachtungen in virtueller Form.
- Mithilfe animierter Grafiken werden z. B. die Konsequenzen aus der fast lichtschnellen Bewegung von Objekten deutlich. Hierbei sind die Vorteile von Animationen gegenüber dem Einsatz von Standbildern oder Bildfolgen oft beträchtlich.

Die Beispiele im Beitrag stellten Animationen beider Typen und deren möglichen Unterrichtseinsatz vor.

## Danksagung

Hannes Geide war an der Erstellung des Computermodells vom Hildesheimer Marktplatz beteiligt. Für diese Arbeit wurde der relativistische Flugsimulator von Christoph Keller verwendet.

## Literatur

- [1] [http://www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de/up\\_anim/up\\_anim.html](http://www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de/up_anim/up_anim.html)
- [2] Kraus, U.: Bewegung am kosmischen Tempolimit. In: Sterne und Weltraum (2005), August, S. 40. <http://www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de/bewegung/bewegung.html>
- [3] Kraus, U., Borchers, M.: Fast lichtschnell durch die Stadt. In: Physik in unserer Zeit (2005), Nr. 2, S. 64. <http://www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de/tuebingen/tuebingen.html>

## Lichtlaufzeiten

### Aufgabe 1:

Wenden Sie die Überlegungen zu den Auswirkungen verschiedener Lichtlaufzeiten auf das Aussehen des in Abbildung 3 gezeigten schnell bewegten Stabes an, indem Sie im folgenden Text an den unterstrichenen Stellen die richtige Aussage wählen. Hilfreich ist auch die zugehörige Animation auf der Internetseite [http://www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de/up\\_anim/up\\_anim.html](http://www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de/up_anim/up_anim.html).

Ein Stab nähert sich der Kamera, die ein Bild von ihm aufnimmt. Eingezeichnet sind zwei Lichtstrahlen, die vom vorderen bzw. vom hinteren Stabende stammen und gleichzeitig in die Kamera gelangen. Die gleichzeitige Ankunft ist nur möglich, wenn das Licht vom entfernteren Stabende früher / später startet. Zu dem früheren / späteren Zeitpunkt war der Stab weniger weit / weiter von der Kamera entfernt. Die Punkte im Raum, von denen das Licht stammt, das die Stabenden ausgesandt haben, liegen deshalb weniger weit / weiter als eine Stablänge auseinander – der Stab sieht verkürzt / verlängert aus.

### Aufgabe 2:

Warum sehen die wegfliegenden Stäbe verkürzt aus? Übertragen Sie die obige Überlegung zu den Lichtlaufzeiten auf diesen Fall.

## Relativistische Längenänderungen

### Aufgabe 3:

Beschreiben Sie, wie die scheinbare Verlängerung des Arkadengangs mit der Fluggeschwindigkeit zusammenhängt. In Abbildung 6 sind Schnappschüsse von zwei Fahrten durch den Arkadengang des Bäckeramtshauses zu sehen, die im Augenblick des Eintritts in den Gang entstehen. Wie sind die Geschwindigkeiten im Verhältnis zu denen von Abbildung 5 einzuordnen?



a



b

Abbildung 6: Fahrten durch den Arkadengang bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten.

## Lösungen zu den Aufgaben

**Aufgabe 1:**

früher — früheren — weiter — weiter — verlängert

**Aufgabe 2:**

Bei einem wegfliegenden Stab ist die Stabspitze weiter vom Auge entfernt als das Stabende. Wenn Licht von der Stabspitze und vom Stabende gleichzeitig eintrifft, muss das Licht von der Spitze früher gestartet sein. In der Zeit bis zum Start des Lichts vom Stabende hat sich der Stab weiterbewegt. Dabei hat sich das Stabende dem Ort genähert, an dem das Licht von der Stabspitze ausgesandt wurde. Zwischen den beiden Startpositionen liegt deshalb weniger als eine Stablänge.

**Aufgabe 3:**

Je höher die Geschwindigkeit ist, desto länger scheint der Arkadengang zu sein. a) Die Geschwindigkeit ist noch höher als in Abbildung 5d, denn das Ende des Arkadengangs erscheint noch weiter in die Ferne gerückt. b) Der Arkadengang erscheint kürzer als beim Anblick aus der Ruhe (Abb. 5a). Wir entfernen uns also von der Arkade. Die Flugrichtung ist entgegengesetzt zu der in Abbildung 5.

Anschrift der Autoren:

Ute Kraus, Corvin Zahn, Sven Behrens  
Institut für Physik — Universität Hildesheim  
Marienburger Platz 22, 31141 Hildesheim