

Bewegung am kosmischen Tempolimit

Visualisierungen zur Speziellen Relativitätstheorie

VON UTE KRAUS

Die Geschwindigkeit von Licht im Vakuum – 299 792 458 Meter pro Sekunde oder rund eine Milliarde Kilometer pro Stunde – ist das naturgesetzliche Tempolimit. Verglichen mit Licht bewegen wir uns im Alltag nur extrem langsam fort. Aber auch wenn wir hohe Geschwindigkeiten selbst nicht erreichen können, wissen wir doch theoretisch hervorragend über sie Bescheid. Computersimulationen im Rahmen der Speziellen Relativitätstheorie erlauben es uns, fast lichtschnelle Objekte einfach mal anzuschauen.

Aus Beobachtungen der Jupitermonde hat Olaf Römer 1676 geschlossen, dass die Lichtgeschwindigkeit endlich sein muss. In der Zeit, in der Sie diesen Satz gelesen haben, sagen wir gut drei Sekunden, hat ein zügig laufender Fußgänger vor Ihrem Haus fünf Meter zurückgelegt, ein Auto im Stadtverkehr 40 Meter und ein Lichtblitz eine Million Kilometer – eine Strecke, die 25-mal um den Äquator führt. Die Lichtgeschwindigkeit, knapp 300 000 Kilometer pro Sekunde, ist so extrem viel größer als jede andere Geschwindigkeit in unserem Alltag, dass wir für alle praktischen Zwecke so tun dürfen, als sei sie unendlich groß.

Anders in der Astronomie: Ein Gamma-Burst erzeugt einen Feuerball, der sich annähernd mit Lichtgeschwindigkeit in das interstellare Medium hinein ausbreitet. Und in den Jets von Quasaren wird Material fast mit Lichtgeschwindigkeit in den Raum geschleudert. Wenn wir diese extrem schnellen Materieströmungen beobachten, kommt die endliche Geschwindigkeit des Lichts zum Tragen und wirkt sich auf verblüffende Weise aus.

Die Lichtgeschwindigkeit ist aber nicht einfach nur eine hohe Geschwindigkeit. In Albert Einsteins Spezieller Relativitätstheorie von 1905 kommt zum Ausdruck, dass sie eine Grenzgeschwindigkeit ist: Sie ist das kosmische Tempolimit, das von keinem massebehafteten Objekt erreicht oder gar überschritten

werden kann. Bei Annäherung an dieses Tempolimit werden relativistische Effekte wichtig, die bei Alltagsgeschwindigkeiten unmessbar klein sind. Wieviel Zeit zwischen zwei Ereignissen vergeht, beispielsweise, ist dann eine Frage des Standpunkts: Zwei Beobachter, die sich relativ zueinander mit hoher Geschwindigkeit bewegen, werden unterschiedliche Antworten geben.

Dasselbe gilt für die Größe eines Objekts: Die Ausdehnung in Flugrichtung ist am größten für den Beobachter, der sich mit dem Objekt mitbewegt; alle anderen Beobachter, die eine Messung am bewegten Objekt durchführen, messen eine kleinere Länge. Ein Auto von fünf Metern Länge beispielsweise ist bei 100 Stundenkilometern um 2×10^{-14} Meter kürzer als in Ruhe; diese Strecke ist 10 000-mal kleiner als ein einzelnes Atom. Bei 90 Prozent der Lichtgeschwindigkeit dagegen wäre ein fünf Meter langes Gefährt auf 2,20 Meter verkürzt.

Sieht ein fast lichtschnelles Objekt verkürzt aus?

Einmal angenommen, wir würden über Raumschiffe verfügen, die annähernd Lichtgeschwindigkeit erreichen können – würden sie dann im Flug gestaucht aussehen, je schneller, desto kürzer? Nun, ganz so einfach ist es nicht, wie erstmals von Anton Lampa im Jahr 1924 gezeigt wurde [1]. Eine Computersimulation zeigt, was Lampa berechnete (Abb.

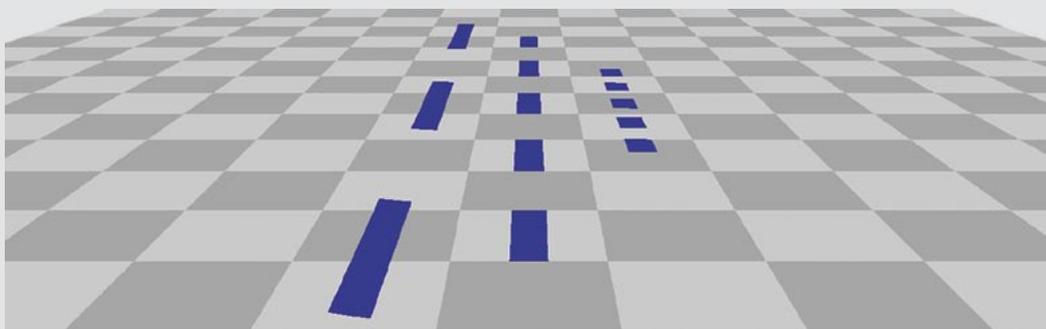
1): Maßstäbe, die sich fast lichtschnell nähern (links, 70 % der Lichtgeschwindigkeit), sehen wesentlich länger aus als Maßstäbe, die sich mit der gleichen Geschwindigkeit entfernen (rechts). Ja, sie scheinen sogar länger zu sein als ruhende Maßstäbe (Mitte). Dabei sind alle diese Maßstäbe, wenn sie ruhend abgemessen werden, gleich lang. Sie haben dann genau die Länge eines der Karos auf dem Untergrund. In Abb. 2 blicken wir von der Seite auf dieselbe Szene. Alle bewegten Stäbe erscheinen verkürzt!

Um das Aussehen der bewegten Maßstäbe zu verstehen, muss man sich bewusst machen, wie das Gesehene (oder photographierte) Bild entsteht. Das Bild eines Objekts entsteht dadurch, dass Licht vom Objekt ausgehend in die Kamera gelangt. Dabei legt das Licht den Weg zwischen Objekt und Kamera mit einer zwar sehr großen, aber doch endlichen Geschwindigkeit zurück. Da verschiedene Objektpunkte verschieden weit von der Kamera entfernt sind, ist das Licht je nach Ursprungsort verschieden lange unterwegs.

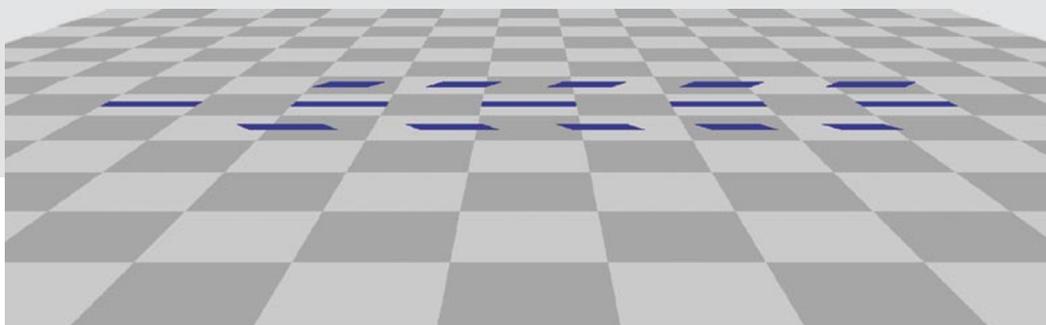
Wird der Auslöser betätigt, dann registriert die Kamera das Licht, das zu diesem Zeitpunkt gerade ankommt. Das gleichzeitig eintreffende Licht wurde aber, je nach Laufzeit, innerhalb eines gewissen Zeitraums nach und nach emittiert. Während dieses Zeitraums bewegte sich nun das Objekt ständig weiter. Abb. 3 illustriert am Beispiel eines einzelnen heranfliegenden Stabes, was das zur Folge hat: Das Licht, das zu einem Zeitpunkt in die Kamera eintritt, stammt von Punkten im Raum, die sich über mehr als eine Stablänge erstrecken; der Stab erscheint verlängert. Dieser Lichtlaufzeiteffekt ist so groß, dass er sogar die Längenkontraktion überwiegt.

Wenn sich umgekehrt der Stab von der Kamera entfernt, führt der Lichtlaufzeiteffekt zu einer scheinbaren Verkürzung, die zur Längenkontraktion noch

► Abb. 1: Blick auf ruhende und bewegte Maßstäbe. Links: Annäherung mit 70% der Lichtgeschwindigkeit, Mitte: ruhend, rechts: Wegflug mit 70% der Lichtgeschwindigkeit. Alle Maßstäbe sind gleich lang, wenn sie ruhend abgemessen werden. Eine Längenmessung der bewegten Maßstäbe ergibt 71% der Ruhelänge.



► Abb. 2: Dieselbe Szene wie in Abb. 1, von der Seite gesehen. Die hinteren Stäbe bewegen sich nach links, die vorderen nach rechts, die mittleren sind in Ruhe.



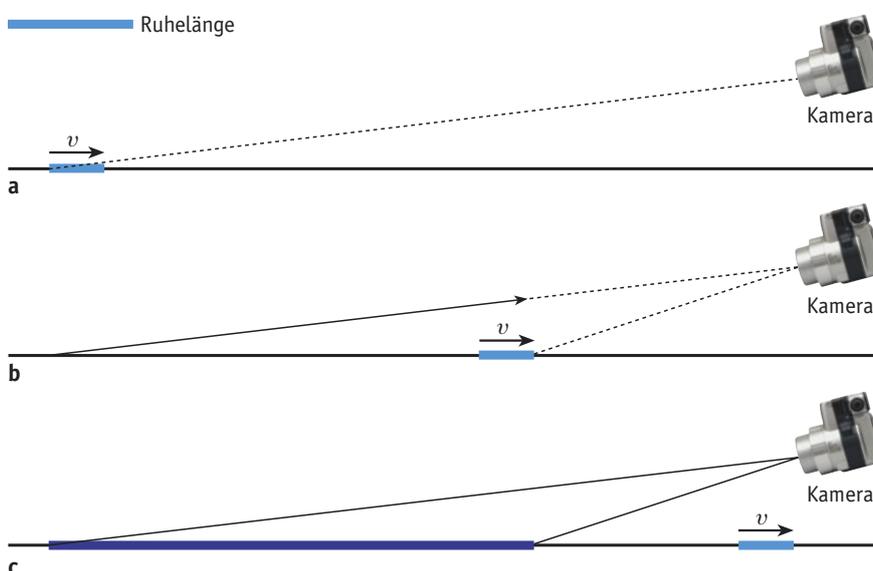
hinzukommt: Der Stab erscheint stark verkürzt.

Nur in dem einen Fall, in dem die Blickrichtung genau senkrecht zur Bewegungsrichtung ist, sind die Lichtlaufzeiten von beiden Stabenden gerade gleich lang und man sieht dieselbe Länge, die man auch misst. In der Bildmitte von Abb. 2 trifft das zu; der Vergleich mit den Karos des Untergrunds zeigt, dass die Maßstäbe gerade entsprechend der Längenkontraktion verkürzt erscheinen.

Nur scheinbar schneller als das Licht

Wenn heranfliegende Maßstäbe verlängert aussehen (Abb. 1, links), dann muss ihre Geschwindigkeit vergrößert erscheinen: Stellen wir uns vor, wir machen eine zweite Aufnahme, auf der alle bewegten Maßstäbe gerade um eine Position in der Reihe weitergerückt sind. Dann haben die heranfliegenden Stäbe scheinbar eine wesentlich größere Strecke zurückgelegt als die wegfliegenden, so als wären sie viel schneller. Wie verschieden die Geschwindigkeiten erscheinen, sieht man am besten im Film, zu finden auf der Internetseite [2].

► Abb. 3: Ein Stab nähert sich der Kamera mit 90% der Lichtgeschwindigkeit. Er ist entsprechend seiner Geschwindigkeit auf 44% seiner Ruhelänge kontrahiert. Unter den Lichtstrahlen, die gleichzeitig bei der Kamera eintreffen, ist derjenige von der Stabspitze zuletzt emittiert worden (a), derjenige von der Stabspitze zuletzt (b). Alle anderen Emissionspunkte liegen dazwischen, auf einer Linie, die länger ist als der Stab (c, dunkelblau eingezeichnet). Dünne durchgezogene Linien markieren zurückgelegte Lichtwege, punktierte Linien deren weiteren Verlauf.

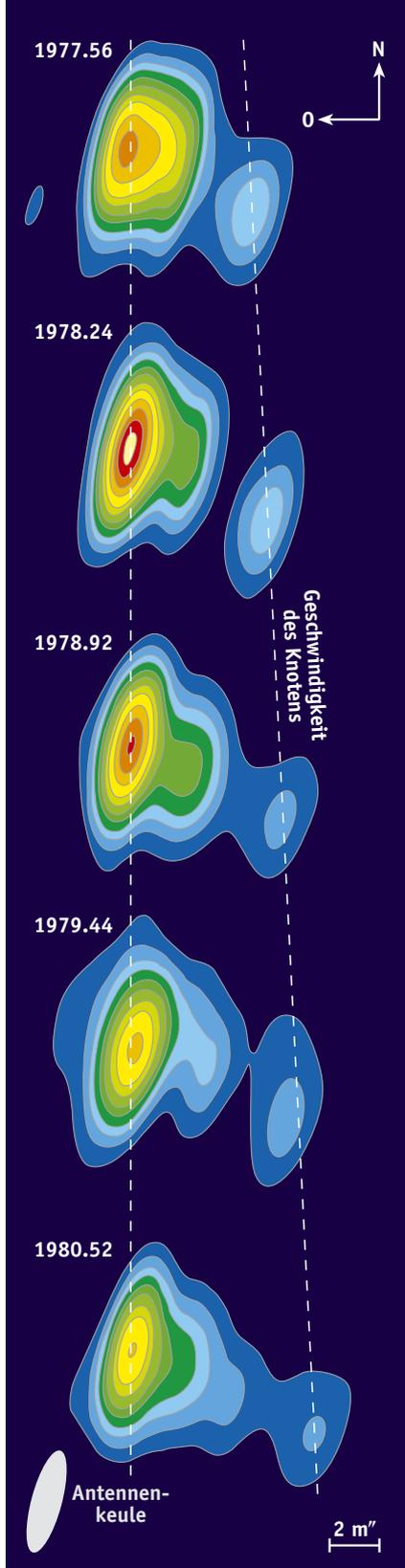


Der Grund dafür, dass wir verschiedene Geschwindigkeiten sehen, wo wir gleiche Geschwindigkeiten messen, ist wiederum die Laufzeit der Lichtsignale: Beim Anflug hat ein später ausgesandtes Signal einen kürzeren Weg und holt auf diese Weise einen Teil der Verspätung auf. Zwischen dem Aussenden der Signale ist also in Wirklichkeit mehr Zeit vergangen, als wir beim Betrachten des Objekts denken. Daher wird die Geschwindigkeit überschätzt. Umgekehrt wird die Geschwindigkeit beim Wegflug des Objekts systematisch unterschätzt, weil später ausgesandte Signale auch noch einen längeren Weg haben. So wie die scheinbare Stablänge beliebig groß werden kann, wenn der Stab nur schnell genug ist, kann auch die scheinbare Geschwindigkeit beliebig groß werden – sogar größer als die Geschwindigkeit des Lichts.

Solche scheinbaren Überlichtgeschwindigkeiten werden tatsächlich beobachtet. Im Jahr 1973 fand man im Kernbe-

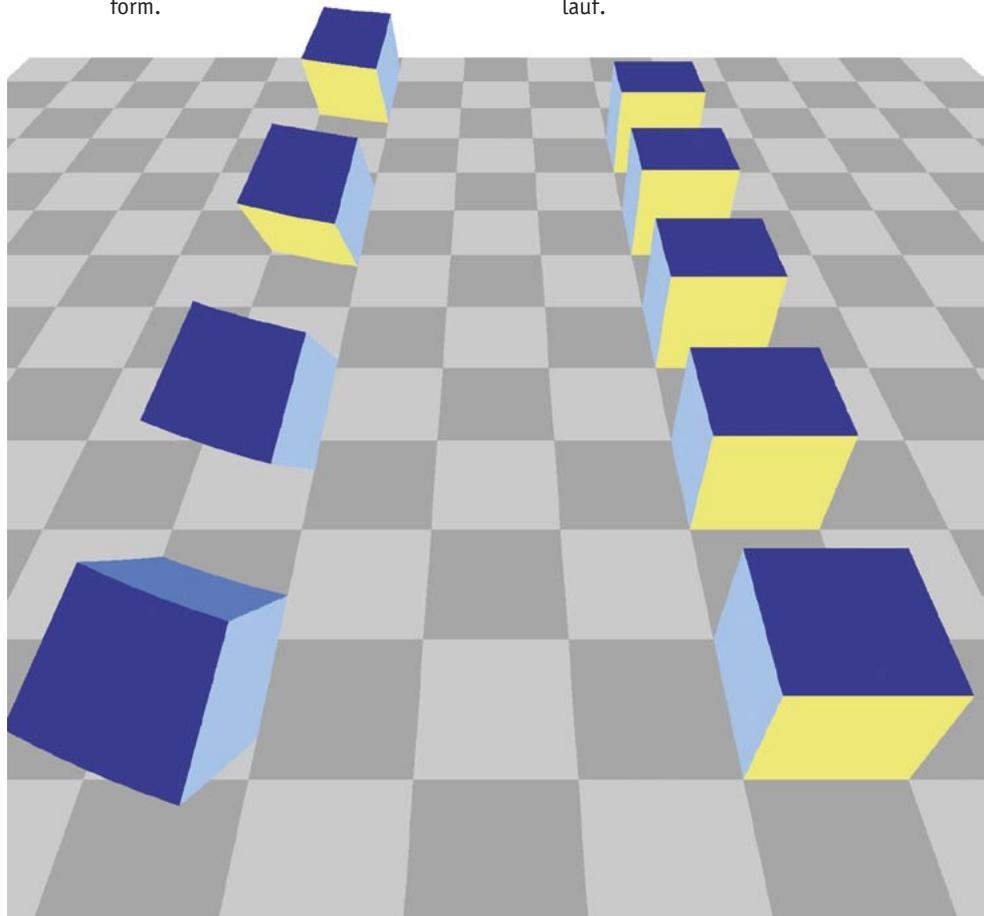
reich des Quasars 3C 279 Strukturen, die sich anscheinend mit zehnfacher Lichtgeschwindigkeit vom Zentrum des Quasars entfernen. Inzwischen sind eine ganze Anzahl solcher sogenannter Überlichtgeschwindigkeitsquasare bekannt, darunter der besonders gut untersuchte Quasar 3C 273. Abb. 4 zeigt einen Knoten im Jet dieses Quasars, der sich vom Zentrum des Quasars entfernt und dabei über drei Jahre hinweg eine dreiviertel Millibogensekunde pro Jahr an der Himmelskugel zurücklegt.

Aus der Rotverschiebung des Quasars schließt man auf eine Entfernung von etwa 2.6 Milliarden Lichtjahren [3]. Eine Strecke in dieser Entfernung, die sich für uns über eine dreiviertel Millibogensekunde erstreckt, ist über neun Lichtjahre lang. Der Knoten scheint also in nur einem Jahr eine Entfernung von mehr als neun Lichtjahren zurückzulegen: Damit wäre er mehr als neunmal so schnell wie das Licht. Dazu kommt, dass wir in der

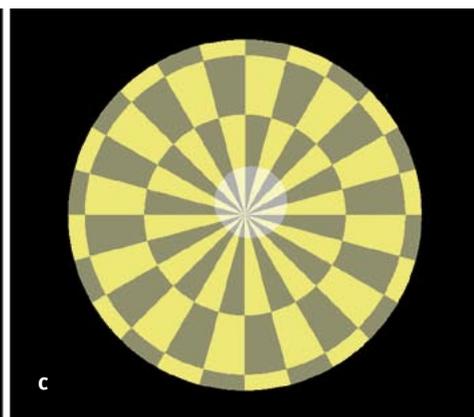
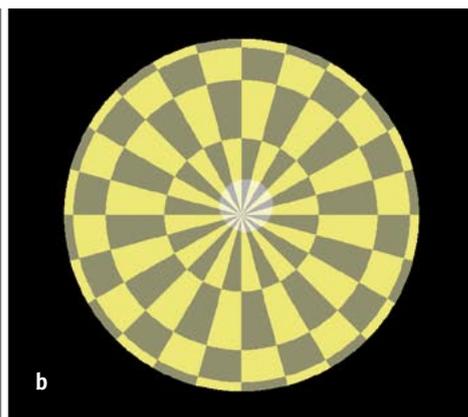
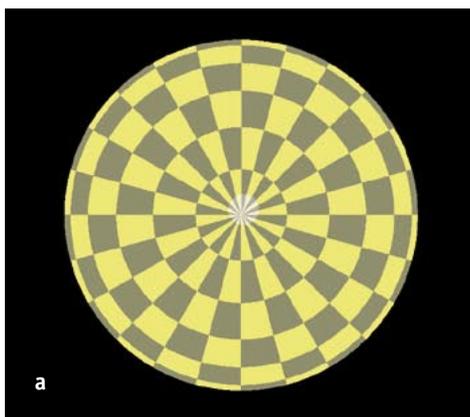


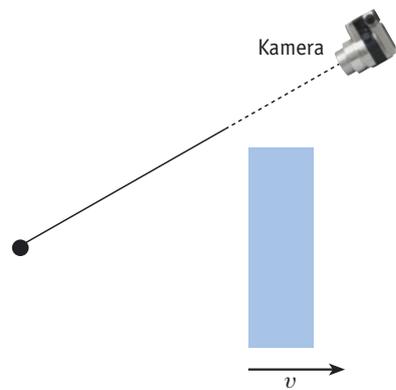
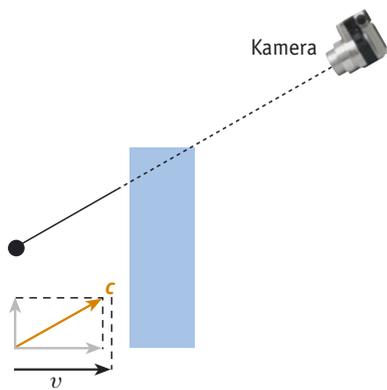
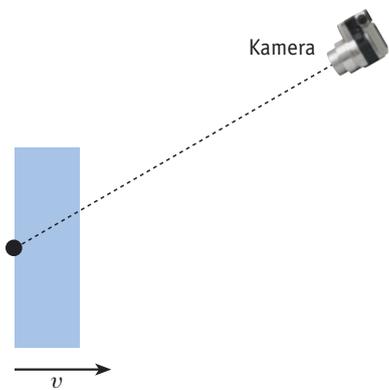
◀ Abb. 4: Ein leuchtender Knoten im Jet des Quasars 3C 273 entfernt sich um eine dreiviertel Millibogensekunde pro Jahr vom Zentrum des Quasars. Die Abbildung zeigt Höhenlinien der vom Quasar und Jet ausgehenden Radiostrahlung. Der Balken rechts unten gibt die Skala an, er ist in zwei Millibogensekunden lang ($1 \text{ Millibogensekunde} = 1^\circ / (3.6 \times 10^6)$). (Bild: nach [3])

▼ Abb. 5: Links: Würfel nähern sich mit 70% der Lichtgeschwindigkeit, rechts: ruhende Würfel. Alle Würfel haben die gleiche Größe (ruhend ausgemessen), die gleichen Farben und die gleiche Ausrichtung auf der karierten Plattform.



▶ Abb. 6: Wie man die Rückseite eines schnell bewegten Würfels zu Gesicht bekommt. Die Geschwindigkeit des Photons (oran- ger Pfeil) hat zwei Komponenten (grau), eine horizontale (in Flug- richtung des Würfels) und eine vertikale. Wenn die horizontale Komponente von der Würfel- geschwindigkeit v (schwarz) über- troffen wird, entweicht das Pho- ton: Der Würfel macht schnell genug den Weg frei. Der Würfel bewegt sich mit 95% der Licht- geschwindigkeit und ist daher in Flugrichtung auf 31% seiner Ruhelänge kontrahiert. Dünne durchgezogene Linien markieren zurückgelegte Lichtwege, punk- tierte Linien deren weiteren Ver- lauf.





Beobachtung nur die Geschwindigkeit quer zur Sichtlinie sehen. Zusätzlich hat der Knoten eine Geschwindigkeitskomponente von unbekannter Größe in Richtung der Sichtlinie.

Falls die unbekannte Komponente in Richtung der Sichtlinie fast Lichtgeschwindigkeit beträgt, tritt der Lichtlaufzeiteffekt auf, der oben anhand der Maßstäbe beschrieben wurde. Die Geschwindigkeit wird überschätzt und selbst die (kleinere) Komponente quer zur Sichtlinie kann dann noch größer als die Lichtgeschwindigkeit erscheinen. Die beobachtete Überlichtgeschwindigkeit des Knotens im Jet von 3C 273 kann man dadurch erklären, dass der Jet mehr als 99 Prozent der Lichtgeschwindigkeit hat und fast zentral auf uns gerichtet ist.

Die unerwartet sichtbare Rückseite

Man könnte nun vermuten, dass jedes fast lichtschnelle Objekt entweder verlängert oder verkürzt aussieht (je nach Blickrichtung), so wie die Maßstäbe in den Abb. 1 und 2. Tatsächlich sehen wir aber viel verblüffendere Bilder, sobald ein Objekt nicht völlig flach ist. Abb. 5 zeigt ein Beispiel dafür. Hier bewegen sich Würfel mit 70 Prozent der Lichtgeschwindigkeit über eine karierte Plattform auf uns zu (links). Die bewegten Würfel sind genau gleich ausgerichtet wie die ruhenden Würfel auf der rechten Bildseite – sehen aber verkippt aus!

Sollten sie nicht verlängert erscheinen, wie die Maßstäbe? Tatsächlich gibt es kei-

nen Widerspruch zwischen diesem Bild und den verlängerten Maßstäben: Auch die untere Seitenkante eines bewegten Würfels sieht verlängert aus, wenn wir dem Würfel entgegenblicken. Trotzdem empfinden wir die Würfel nicht als langgezogen. Viel auffälliger ist nämlich, dass die Vorderseite aus dem Bild verschwindet und die Rückseite sichtbar wird, wenn der Würfel in die Nähe der Kamera kommt.

Wie aber gelangt Licht von der Rückseite des Würfels in die Kamera? Der Würfel versperrt doch den Weg! Abb. 6 illustriert die Antwort: Der Würfel macht den Weg schnell genug frei. Die Geschwindigkeit eines Photons, das in Richtung Kamera läuft, kann in eine horizontale Komponente (in Flugrichtung des Würfels) und eine vertikale Komponente zerlegt werden. Jede Komponente für sich ist kleiner als die Lichtgeschwindigkeit. Deshalb kann die horizontale Komponente von der Würfelgeschwindigkeit übertroffen werden. Der Abstand zwischen Würfel und Photon wird dann immer größer, während der Würfel nach rechts läuft und das Photon schräg nach oben – das Photon entweicht.

Das umgekehrte gilt für die Vorderseite: Damit ein Photon entweichen kann, muss es in Flugrichtung des Würfels eine Geschwindigkeitskomponente haben, die größer als die Würfelgeschwindigkeit ist. Dazu darf das Photon nicht allzu weit zur Seite gerichtet sein. Die Richtungen aller entweichenden Photonen liegen in einem

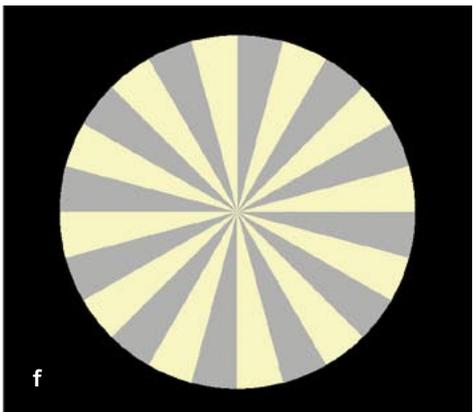
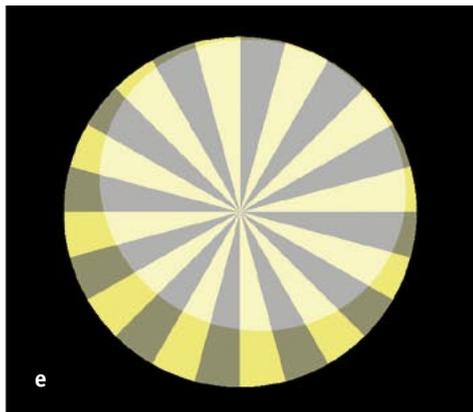
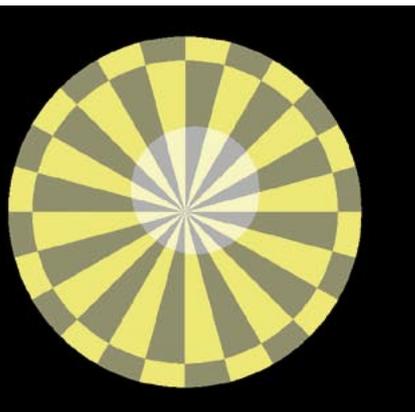
Kegel um die Flugrichtung des Würfels, der um so enger ist, je schneller sich der Würfel bewegt. Wenn die Photonen in diesem Kegel die Kamera verfehlen, dann ist die Vorderseite nicht sichtbar.

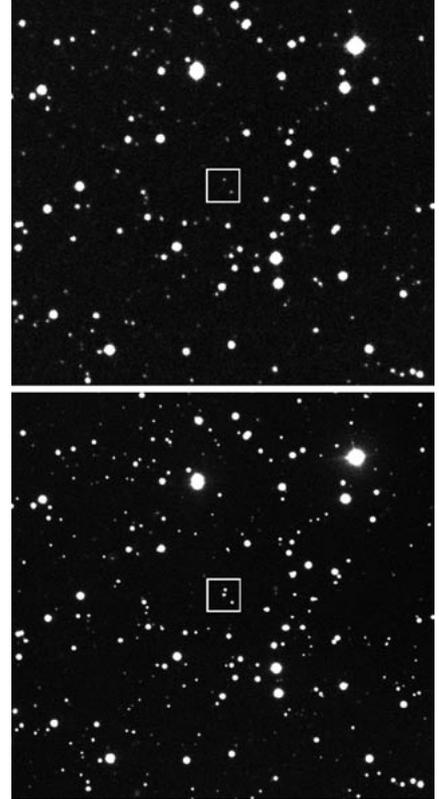
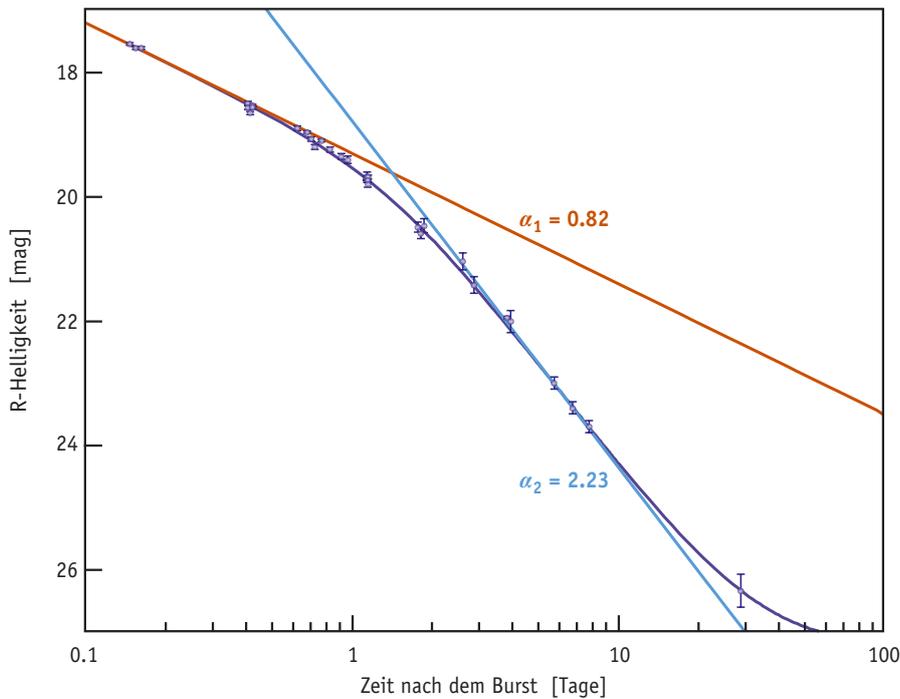
Die unsichtbare Vorderseite

Aus dem Alltag sind wir es gewohnt, dass wir die uns zugewandte Seite eines Objekts sehen können, solange uns nicht ein Hindernis die Sicht versperrt. Anders wenn wir fast lichtschnelle Objekte ansehen. Dass eine Seite des Objekts uns zugewandt und unverdeckt ist, heißt dann noch lange nicht, dass wir sie auch sehen. Dies illustrieren die Würfel in Abb. 5 und die folgende Computersimulation zeigt ein weiteres drastisches Beispiel.

Von einer Kugel sehen wir gewöhnlich die uns zugewandte Hälfte der Oberfläche (Abb. 7a). Wenn wir aber

Abb. 7: Blick auf Kugeln, die mit konstanter Geschwindigkeit expandieren. In Einheiten der Lichtgeschwindigkeit: a: Null, b: 50%, c: 70%, d: 90%, e: 99%, f: 99.9%. Zur Verdeutlichung tragen die Kugeln ein Muster aus $15^\circ \times 15^\circ$ großen Karos. Würde man statt der Kugel einen Jet beobachten, dessen Front den heller markierten Winkelbereich mit Öffnungswinkel 10° einnimmt, dann wäre dieser bei Geschwindigkeiten oberhalb von 99% der Lichtgeschwindigkeit nur teilweise sichtbar.





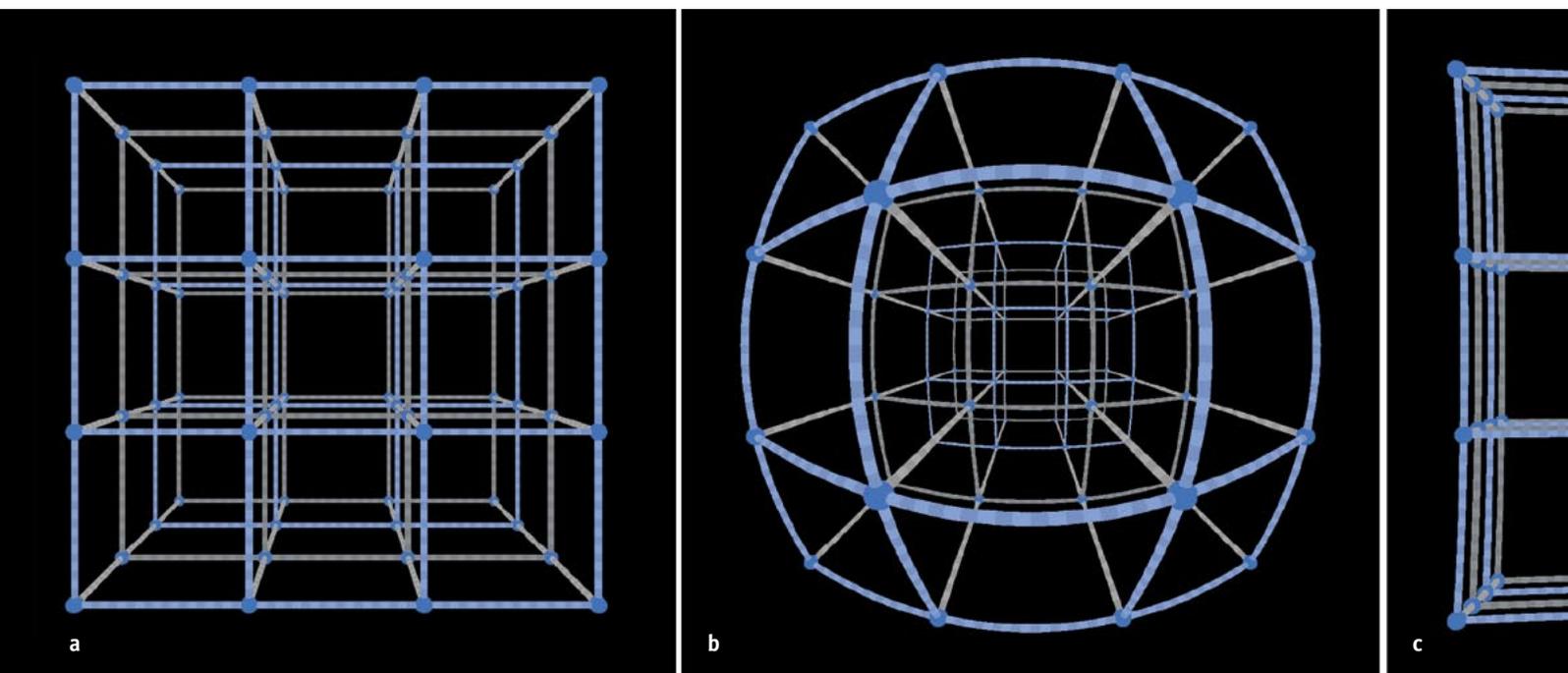
▲ Abb. 8: *Links*: Die Lichtkurve des optischen Nachleuchtens von Gamma-Burst GRB 990510 zeigt anfangs eine langsamere, nach etwa 1.3 Tagen dann eine schnellere Helligkeitsabnahme. Der Knick, der sogenannte »Jet-Break«, wird so gedeutet, dass die Strahlung von einem Jet stammt. (Bild: aus [4]). *Rechts*: Optische Aufnahme des Gamma-Bursts GRB 990510. Oben: Aufnahme von 1986 mit dem 1-m-Schmidt-Teleskop der ESO. Unten: Aufnahme mit dem Teleskop ANTU und der FORS 1-Kamera des Very Large Telescopes. (Bild: ESO)

eine Kugel anschauen, die sich mit hoher Geschwindigkeit radial ausdehnt, dann ist von dieser Hälfte nur der innere Teil sichtbar. Er ist um so kleiner, je schneller die Kugel expandiert (Abb. 7b bis f). Photonen erreichen uns nur von dem Teil der Oberfläche, auf den wir in fast senkrechter Richtung blicken. Denn nur in dieser Richtung kann ein Photon bei fast lichtschneller Expansion entweichen.

Dieses Phänomen spielt bei der Interpretation der Lichtkurven von Gamma-Burst-Quellen eine wichtige Rolle. Man nimmt heute an, dass die täglich beobachteten Gammastrahlungsausbrüche meist (oder vielleicht sogar immer) die Entstehung eines Schwarzen Lochs an-

zeigen. Nach einem Gammablitz, der Sekunden bis Stunden andauert, besteht über Tage hinweg ein Nachleuchten im Röntgen- bis Radiobereich.

In einem Gamma-Burst wird eine enorme Energiemenge freigesetzt. Nach dem heutigen Verständnis entsteht dabei ein sogenannter Feuerball aus fast lichtschnellen Teilchen, der expandiert, dabei das umgebende Medium aufregt, und allmählich abgebremst wird. Von der Grenze zwischen dem Feuerball und dem umgebenden Gas stammt das Nachleuchten. Man nimmt an, dass der Feuerball in vielen Fällen nicht eine Kugel, sondern ein kanalisierter Materieausfluss in Form eines schmalen Jets ist. Ein Indiz dafür findet sich in den Licht-



kurven des Nachleuchtens im sichtbaren Licht in Gestalt eines Knicks, des so genannten »Jet-Breaks« (Abb. 8).

Der Jet-Break wird auf das Phänomen der teilweise unsichtbaren Vorderseite zurückgeführt. Wenn ein leuchtender Gasball mit hoher Geschwindigkeit expandiert, sieht man nur einen kleinen Teil von ihm, nämlich den Zentralbereich um die Sichtlinie. Wird die Bewegung nach und nach langsamer, dann sieht man allmählich einen immer größeren Teil der Strahlungsquelle. Das hat Auswirkungen auf die Lichtkurve: Einerseits nimmt die Helligkeit mit der Zeit ab, andererseits wird der sichtbare Anteil größer. Insgesamt sinkt der beobachtete Strahlungsfluss, aber er sinkt nicht so schnell, wie man aufgrund der Helligkeitsabnahme allein erwarten würde.

Falls man nun in Wirklichkeit nicht auf eine leuchtende Kugel, sondern auf die Front eines schmalen Jets blickt (heller Teil der Kugeloberfläche in Abb. 7), dann ist auch diese Front anfangs nur teilweise sichtbar und das Absinken des Strahlungsflusses ist verzögert. Die Jet-front ist aber nach einer gewissen Abbremsung schon bald vollständig zu sehen. Von diesem Zeitpunkt ab sinkt der Strahlungsfluss dann deutlich schneller als zuvor, was sich in der Lichtkurve als Knick (als »Jet-Break«) äußert.

Schnelle Objekte aus nächster Nähe

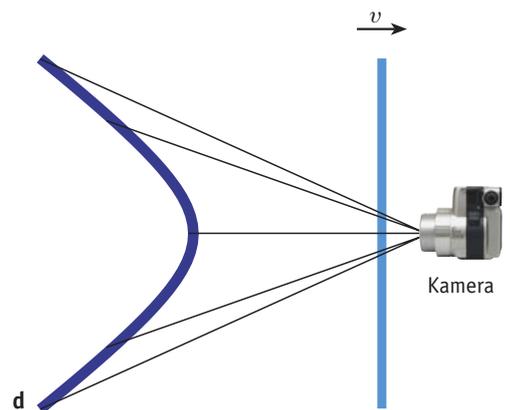
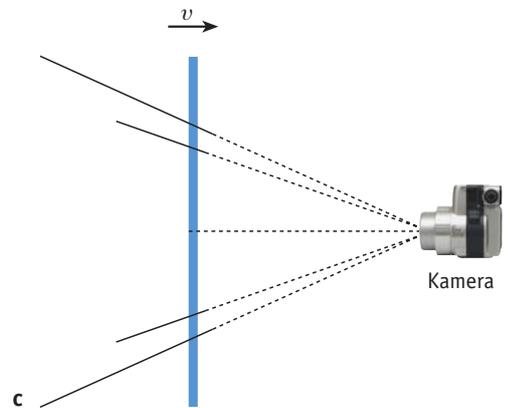
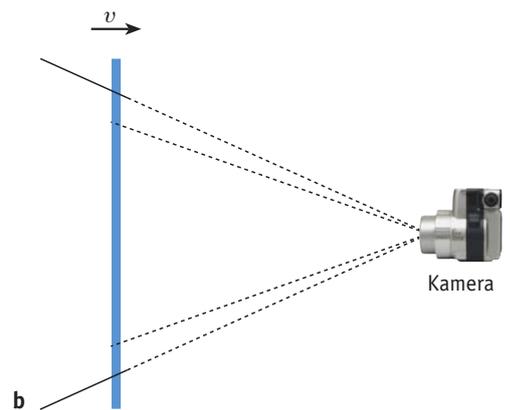
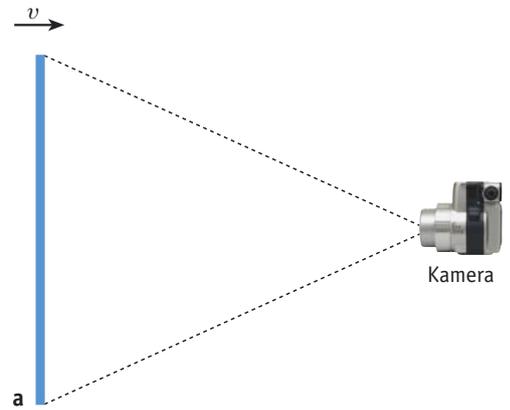
Wenn wir fast lichtschnelle Materieströmungen im Weltall beobachten, dann geschieht das immer aus sehr großer Entfernung. In der Computersimulation haben wir die Möglichkeit, auch ein-

mal aus nächster Nähe hinzusehen. Sehen wir uns beispielsweise ein Gitter an (Abb. 9a), wenn es mit 90 Prozent der Lichtgeschwindigkeit auf uns zu fliegt (Abb. 9b). Man erkennt deutlich die Verlängerung in Flugrichtung. Genau so auffällig: Die Gitterstäbe erscheinen gewölbt. Auch beim Wegflug (Abb. 9c) ist neben der erwarteten Verkürzung eine Wölbung der Stäbe zu erkennen. Aus der Nähe betrachtet erscheinen fast lichtschnelle Objekte also nicht nur gedehnt, gestaucht oder verkippt, sondern zusätzlich noch verzerrt.

Auch dies ist eine Folge der Lichtlaufzeiten vom Objekt zur Kamera, wie Abb. 10 am Beispiel eines einzelnen senkrechten Gitterstabs illustriert. Die Punkte im Raum, von denen das Licht stammt, das gleichzeitig in die Kamera eintritt, liegen aufgrund der Bewegung des Stabs auf einer gekrümmten Linie. Wie man relativ leicht nachrechnen kann, ist diese Linie eine Hyperbel. Da jeder in Querrichtung fliegende Stab als Hyperbel gesehen wird, erscheint eine Ebene senkrecht zur Flugrichtung als Hyperboloid. Das erklärt die scheinbare Wölbung der Gitterflächen.

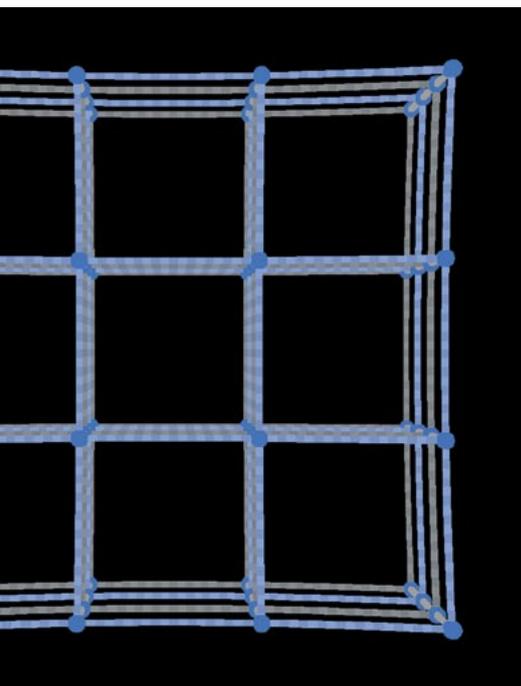
Farbe und Helligkeit

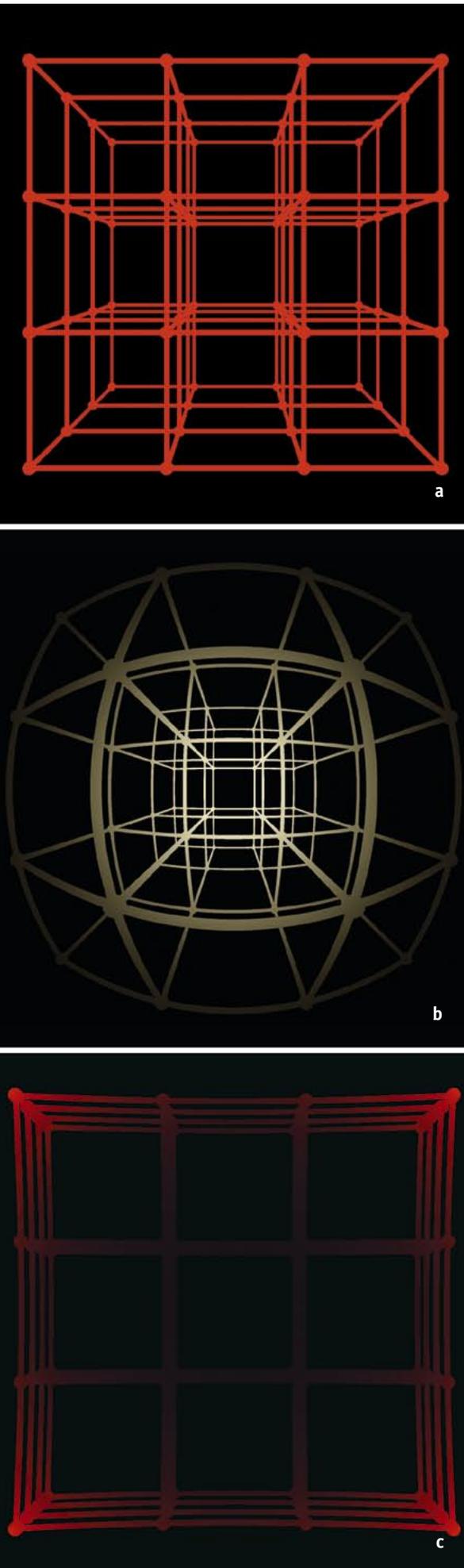
Die bisher gezeigten Abbildungen sind zwar farbig, realistisch sind die Farben aber nicht. Tatsächlich würden wir Objekte in fast lichtschneller Bewegung mit ganz anderen Farben und Helligkeiten sehen als in Ruhe. Der Grund dafür ist der Doppler-Effekt. Aus dem Alltag ist uns der akustische Doppler-Effekt vertraut: Das Martinshorn eines Einsatzwagens klingt höher, wenn sich der Wagen nähert, als wenn er sich entfernt.



◀ Abb. 9: Blick auf ein Gitter. a: Gitter ruht, b/c: Gitter nähert/entfernt sich mit 90% der Lichtgeschwindigkeit.

▶ Abb. 10: Ein Stab nähert sich der Kamera mit 90% der Lichtgeschwindigkeit. Unter den Lichtstrahlen, die gleichzeitig bei der Kamera eintreffen, sind diejenigen von den Stabenden zuerst emittiert worden (a), derjenige von der Stabmitte zuletzt (c). Die Emissionspunkte liegen auf einer gekrümmten Linie, welche die Form einer Hyperbel hat. Dünne durchgezogene Linien markieren zurückgelegte Lichtwege, punktierte Linien deren weiteren Verlauf.





◀ Abb. 11: Das Gitter aus Abb. 9, mit Doppler- und Intensitätseffekt simuliert. a: Gitter ruht, b/ c: Gitter nähert/entfernt sich mit 90% der Lichtgeschwindigkeit. Das Gitter emittiert thermische Strahlung mit einer Temperatur von 1000 °C. Bild b ist 1.7 Millionen mal heller zu denken als hier dargestellt, Bild c dagegen 4×10^{22} -mal schwächer.

Im Prinzip dasselbe passiert bei Licht: Wenn sich ein Objekt nähert, dann empfangen wir seine Strahlung zu kleineren Wellenlängen hin verschoben. Gleichzeitig ist das Spektrum als Ganzes mit einem Verstärkungsfaktor skaliert (siehe [5] für eine elementare Herleitung dieses Intensitätseffekts). Umgekehrt werden beim Blick auf ein wegfliegendes Objekt die Wellenlängen größer bei insgesamt geringerer Intensität. Durch die schnelle Bewegung des Objekts rückt für den ruhenden Betrachter also ein anderer Spektralbereich – Infrarot oder Ultraviolett – ins Sichtbare.

Ein realistisch simulierter Anblick des Gitters von Abb. 9 ist in Abb. 11 zu sehen. Hier ist das Gitter 1000 Grad Celsius heiß und emittiert thermische Strahlung. Das ruhende Gitter (Abb. 11a) sieht dann dunkelrot aus, etwa wie rotglühendes Metall. Bei einem thermischen Spektrum ist die Auswirkung des Doppler-Effekts besonders einfach zu beschreiben: Es ergibt sich wieder ein thermisches Spektrum, aber mit einer höheren oder tieferen Temperatur. Wenn das Gitter mit 90 Prozent der Lichtgeschwindigkeit herankommt (Abb. 11 b), ist die Temperatur stark erhöht. Am größten ist sie in der Bildmitte: Mit 5600 Kelvin ist das Gitter dort so hell wie die Sonne!

Zur Seite hin nimmt die gesehene Temperatur so schnell ab, dass die äußeren Teile kaum noch zu erkennen sind. Beim

Wegflug mit derselben Geschwindigkeit ist die Temperatur erniedrigt, am stärksten in der Bildmitte, wo das Gitter wie mit 20 Grad Celsius strahlt – wir empfangen die Wärmestrahlung eines Objekts bei Zimmertemperatur. Mit bloßem Auge ist das Gitter in dieser Situation unsichtbar.

Ausblick

Die Simulationen in diesem Beitrag zeigen, wie Objekte in fast lichtschneller Bewegung aussehen. Man kann sich die Frage stellen, wie es umgekehrt wäre: Könnten wir selbst fast lichtschnell unterwegs sein, wie würden dann ruhende Objekte aussehen? Die Antwort gibt das Relativitätsprinzip: Es ist egal, ob wir den Betrachter oder das Objekt als bewegt ansehen; bei derselben Relativgeschwindigkeit entsteht beim Vorbeiflug derselbe Film. Allerdings ist die Erklärung je nach Standpunkt verschieden. Warum ein bewegter Beobachter seine Umgebung verzerrt sieht, wird in [2, 6] und [7] genauer erläutert.

Am schönsten sind die Computersimulationen natürlich als Film. Filmsequenzen zu diesem Artikel und viele weitere Beispiele von Computersimulationen zur Relativitätstheorie sind im Internet zugänglich unter: <http://www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de/> □



Ute Kraus promovierte 1992 in Tübingen und habilitierte sich 2003 in Theoretischer Physik. Sie erforscht akkretierende Röntgenpulsare und hat sich der Didaktik der Relativitätstheorie verschrieben, wobei Sie versucht, die Effekte der Relativitätstheorie zu visualisieren.

Literaturhinweise

- [1] **A. Lampa:** Z. Physik **72**, 138 [1924].
- [2] **U. Kraus und C. Zahn:** <http://www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de/>
- [3] **T. J. Pearson et al:** Nature **290**, 365 [1981].
- [4] **S. Klose, J. Greiner, D. Hartmann:** SuW 4-5/2001, S. 335.
- [5] **U. Kraus:** Am. J. Phys. **68**, 56 [2000].
- [6] **U. Kraus und M. Borchers:** Physik in unserer Zeit **2** [2005].
- [7] **U. Kraus:** Astronomie + Raumfahrt im Unterricht **2**, 35 [2003].

Olaf Henkel: Einstein für Einsteiger, Einführung in die Spezielle Relativitätstheorie, Sterne und Weltraum 2-3, 4, 6, 10, 11/2000, 8/2002, 1/2003, S. 142, 241, 450, 856, 956; S. 41 und S. 42.

Peter Biermann, Arno Witzel: Der Quasar 1928+738: Ein sehr langer relativistischer Düsenstrahl, Sterne und Weltraum, 5/1988, S. 283.

Sylvio Klose, Jochen Greiner, Dieter Hartmann: Kosmische Gammastrahlenausbrüche, Sterne und Weltraum 3, 4-5/2001, S. 230 und S. 335.