Didaktisches Material

zu

Bewegung am kosmischen Tempolimit

– Visualisierung relativistischer Effekte –

Sterne und Weltraum, August 2005, S. 40 - 46

Ute Kraus

Thema: Wir beobachten (virtuell) Objekte, die sich fast so schnell bewegen wie das Licht - wie sehen sie aus?

Lernziele: Die Längenkontraktion ist nicht ohne weiteres sichtbar; Warum Objekte scheinbar Überlichtgeschwindigkeit haben können (Astronomische Beobachtung: Quasarjets); Warum ein fast lichtschnelles Objekt i.a. verzerrt und verdreht aussieht.

Vorkenntnisse: Längenkontraktion

Inhalt: Einfache Rechnungen sowie Übungsaufgaben ergänzend zum Heftbeitrag.

Bezüge – Fach: Physik, Fachgebiet: Relativitätstheorie, Stichworte: Längenkontraktion, Lichtlaufzeiten, Messen vs. Sehen – Fach: Astronomie, Stichwort: Quasare

Infos im Internet: `http://www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de`

Kontakt: ute.kraus@uni-tuebingen.de - Ich freue mich über Kommentare und Erfahrungsberichte.

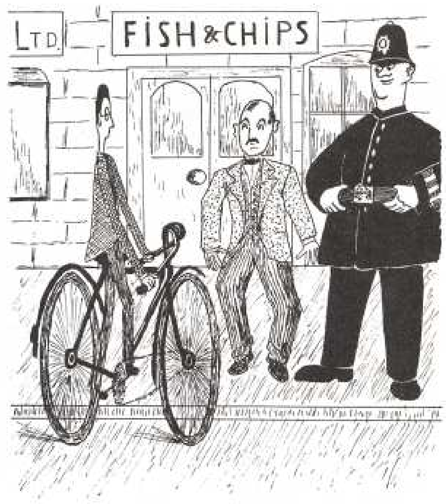
Inhaltsverzeichnis

1 Längenkontraktion - der Gamowsche Radfahrer

Es ist eine der grundlegenden Aussagen der Speziellen Relativitätstheorie, dass schnell bewegte Objekte in Flugrichtung verkürzt sind: Die am bewegten Objekt gemessene Länge l in Flugrichtung hängt mit der am ruhenden Objekt gemessenen Länge l' zusammen über

$$l = l'\sqrt{1 - v^2/c^2}, \tag{1}$$

wobei v die Geschwindigkeit des Objekts ist und c die Lichtgeschwindigkeit.
In vielen älteren (und auch manchen neueren) Büchern über die Spezielle Relativitätstheorie versuchen die Autoren die Längenkontraktion zu veranschaulichen, indem sie schildern, wie kontrahierte Objekte verkürzt *aussehen*: eine Kugel zum Ellipsoid abgeplattet, ein Zug gestaucht etc.
Als Beispiel für eine solche Darstellung zeigt Abb. 1 ein Bild aus “Die seltsamen Reisen des Mr. Tompkins durch Kosmos und Mikrokosmos” von George Gamow aus dem Jahr 1940. Mr. Tompkins befindet sich hier in einer Welt, in der die Lichtgeschwindigkeit nur 30 Kilometer pro Stunde beträgt. Damit ist bereits ein Radfahrer fast so schnell wie das Licht. Mr. Tompkins schaut vom Straßenrand aus einem vorbeifahrenden Radfahrer zu und sieht ihn “unglaublich verkürzt”.



Unglaublich verkürzt

Abb. 1: Angebliches Aussehen eines Radfahrers, der sich in einer Welt, in der die Lichtgeschwindigkeit nur 30 Kilometer pro Stunde beträgt, fast lichtschnell bewegt. Bild entnommen aus [1].

Aufgabe 1: Längenkontraktion
Wie schnell ist der Radfahrer in Abb. 1? (Hinweis: Hier ist nur die Längenkontraktion dargestellt; Lichtlaufzeiteffekte sind nicht berücksichtigt.)

2 Lichtlaufzeiteffekt - warum die Längenkontraktion i.a. nicht sichtbar ist

Tatsächlich ist das Aussehen fast lichtschneller Objekte viel verblüffender, als es eine simple Stauchung in Bewegungsrichtung wäre. Je nach Bewegungs- und Blickrichtung kann so ein Objekt verkürzt, verlängert oder verdreht aussehen und dabei auch noch verzerrt erscheinen. Es sind Lichtlaufzeiteffekte, die, zusammen mit der Längenkontraktion, hier die bestimmende Rolle spielen. Im Heftbeitrag ist das anhand von Maßstäben illustriert (Abb. 1 und 2 im Heft) und anschaulich erklärt (Abb. 3 im Heft). Für den Spezialfall, dass sich ein solcher Stab genau längs der Sichtlinie auf die Kamera zu bewegt (Abb. 2), kann man die Länge die man *sehen* würde, auf einfache Weise berechnen. (Genau genommen muss man schräg von oben auf die Stäbe blicken, damit man ihre Länge sehen und im Vergleich mit der Breite der Untergrundkaros richtig einschätzen kann. Wenn man sehr flach über den Untergrund peilt, sieht man aber ungefähr die Längen, die hier berechnet werden.)

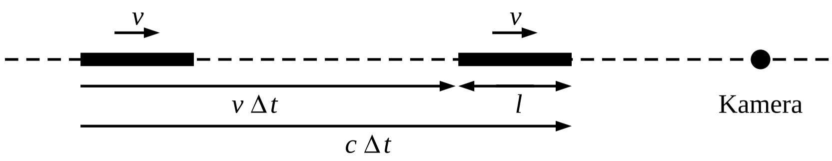


Abb. 2: Ein Stab nähert sich mit der Geschwindigkeit v der Kamera, die ihn photographiert. Ein Lichtstrahl, der zum Zeitpunkt t_1 (links) vom Stabende emittiert wird, erreicht die Kamera gleichzeitig mit einem Lichtstrahl, der zum Zeitpunkt $t_1 + \Delta t$ (rechts) von der Stabspitze startet.

Wie lang der Stab von Abb. 2 aussieht, läßt sich aus den beiden äußersten Strahlen schließen, die von der Spitze bzw. vom Ende des Stabs stammen. Wir verfolgen zunächst Licht, das zum Zeitpunkt t_1 am Stabende in Richtung Kamera emittiert wird. Da das Licht auf jeden Fall schneller ist als der Stab, setzt es sofort zum Überholen an und erreicht nach einer gewissen Zeit Δt die Stabspitze. Unter all den Lichtstrahlen, die ständig von der Stabspitze in alle Richtungen emittiert werden, verfolgen wir jetzt denjenigen, der genau beim Eintreffen des Strahls vom hinteren Ende, d. h. zum Zeitpunkt $t_1 + \Delta t$, in Richtung Kamera losläuft. Da er gleich schnell ist wie der erste Strahl, laufen die beiden miteinander weiter und treffen gleichzeitig bei der Kamera ein. Wird die Kamera in diesem Augenblick ausgelöst, dann bildet sie einen Stab ab, der scheinbar vom Herkunftsort des ersten Strahls (Stabende zur Zeit t_1) bis zum Herkunftsort des zweiten Strahls (Stabspitze zur Zeit $t_1 + \Delta t$) reicht: $L = c\Delta t$. Zur Bestimmung von Δt liest man aus der Skizze ab, dass

$$c\Delta t = v\Delta t + l$$

gilt, wobei l die Länge des bewegten Stabs ist. Daraus folgt, daß das Licht vom Stabende die Zeit $\Delta t = l/(c-v)$ braucht, um bis zur Stabspitze zu gelangen. Die gesuchte scheinbare Länge ist also

$$L = c\Delta t = l/(1-v/c).$$

Um die gesehene Länge L mit der Ruhelänge l' zu vergleichen, kann man noch Gl. 1 heranziehen und erhält

$$L = l'\sqrt{\frac{1+v/c}{1-v/c}}$$

(wobei $1 - v^2/c^2 = (1+v/c)(1-v/c)$ eingesetzt wurde). Der heranfliegende Stab sieht also in Bewegung länger aus, als wenn er ruht! Die scheinbare Länge kann beliebig groß sein, wenn die Geschwindigkeit nur nahe genug bei der Lichtgeschwindigkeit liegt.

Aufgabe 2: Lichtlaufzeiteffekt
Wie lang sieht ein Stab aus, der sich längs der Sichtlinie von der Kamera entfernt?

3 Scheinbare Geschwindigkeit - Überlichtgeschwindigkeitsquasare

In der Animation (der Film kann unter `http://www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de` angesehen werden) sieht man herankommende, ruhende und wegfliegende Stäbe. Alle Stäbe haben dieselbe Ruhelänge; dass sie verschieden lang aussehen, ist wie oben beschrieben eine Folge von Längenkontraktion und Lichtlaufzeiten. Die bewegten Stäbe sind außerdem alle gleich schnell: Sie fliegen mit 70% der Lichtgeschwindigkeit. Dass sie bei weitem nicht gleich schnell aussehen, ist ebenfalls ein Lichtlaufzeiteffekt.
Das Prinzip kann man sich an folgendem Beispiel klarmachen: Ein Raumschiff fliegt mit 60% der Lichtgeschwindigkeit an der Sonne vorbei geradewegs auf die Erde zu. Von der Sonne zur Erde sind 150 Millionen Kilometer zurückzulegen. Licht braucht dazu acht Minuten und 18 Sekunden, das Raumschiff ist ein wenig langsamer und benötigt 13 Minuten und 51 Sekunden. Wenn nun das Raumschiff um 12:00 Uhr die Sonne passiert, dann sieht ein Zuschauer auf der Erdstation den Vorbeiflug erst um 12:08:18 Uhr, wenn das Licht vom Vorbeiflug eintrifft. Das Raumschiff selber überfliegt die Station um 12:13:51 Uhr. Der Zuschauer *sieht* also, wie das Raumschiff in nur 5 Minuten und 33 Sekunden von der Sonne zur Erde gelangt: scheinbar schneller als das Licht!

Aufgabe 3: Scheinbare Geschwindigkeit – I
Ein Raumschiff fliegt mit 60% der Lichtgeschwindigkeit von der Erde zur Sonne – welche Geschwindigkeit *sieht* ein Zuschauer auf der Erde?

Für den Spezialfall, dass sich ein Objekt längs der Sichtlinie auf die Kamera zu bewegt, die es photographiert (Abb. 3), kann man die scheinbare Geschwindigkeit leicht berechnen. (Hier gilt derselbe Vorbehalt wie bei der Berechnung der scheinbaren Länge im vorigen Abschnitt: Die Geschwindigkeit der Stäbe kann man in diesem Spezialfall eigentlich nicht beurteilen, weil man dazu den Vergleich mit den Untergrundkaros braucht. Wenn man aber flach über den Untergrund peilt, sieht man ungefähr die Geschwindigkeiten, die hier berechnet werden.)

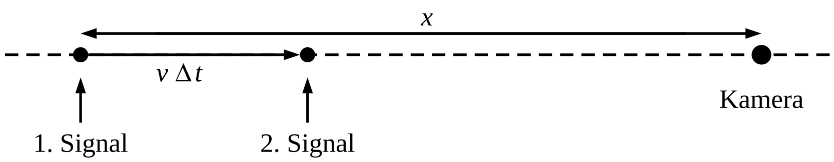


Abb. 3: Ein Objekt nähert sich der Kamera mit Geschwindigkeit v. Ein Objektpunkt sendet im Abstand x von der Kamera ein erstes Signal (links) und eine Zeit Δt später ein zweites (rechts).

Wir betrachten einen beliebigen Objektpunkt. Licht, das zum Zeitpunkt t_1 ausgesandt wird, wenn der Objektpunkt die Entfernung x von der Kamera hat, erreicht die Kamera zum Zeitpunkt

$$\tilde{t}_1 = t_1 + x/c.$$

Im Zeitraum Δt legt das Objekt die Strecke $v\Delta t$ zurück und befindet sich danach noch in der Entfernung $x - v\Delta t$ von der Kamera. Licht, das hier ausgesandt wird, verlässt das Objekt zum Zeitpunkt $t_1 + \Delta t$ und erreicht die Kamera zum Zeitpunkt

$$\tilde{t}_2 = t_1 + \Delta t + (x - v\Delta t)/c.$$

Die Kamera registriert folglich, daß die Strecke $v\Delta t$ im Zeitraum $\tilde{t}_2 - \tilde{t}_1$ zurückgelegt wurde. Mit

$$\tilde{t}_2 - \tilde{t}_1 = \Delta t(1 - v/c)$$

schließt man also auf die Geschwindigkeit

$$V = v\Delta t/(\tilde{t}_2 - \tilde{t}_1) = v/(1 - v/c).$$

Die scheinbare Geschwindigkeit ist stets größer als die wahre und kann beliebig groß sein, wenn die Objektgeschwindigkeit nahe genug bei der Lichtgeschwindigkeit liegt.

Aufgabe 4: Scheinbare Geschwindigkeit – II
a) Ein Objekt nähert sich längs der Sichtlinie und scheint genau Lichtgeschwindigkeit zu haben. Wie schnell

ist es?
b) Ein Objekt entfernt sich längs der Sichtlinie mit Geschwindigkeit v von der Kamera. Wie schnell scheint es zu sein? Können auch wegfliegende Objekte beliebig schnell aussehen oder gibt es für ihre scheinbare Geschwindigkeit eine obere Grenze?

Aufgabe 5: Scheinbare Geschwindigkeit – III: Quasarjet
Ein leuchtender Knoten im Jet eines Quasars entfernt sich mit Geschwindigkeit v vom Quasarzentrum. Ein weit entfernter Betrachter beobachtet die Bewegung des Knotens unter dem Sichtwinkel θ (Abb. 4).

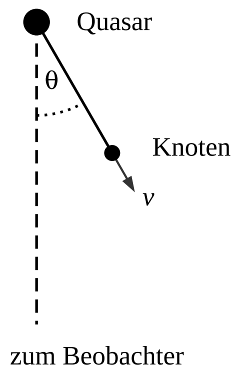


Abb. 4: Zu Aufgabe 5.

Der Beobachter sieht, wie die Entfernung des Knotens vom Quasarzentrum im Lauf der Zeit anwächst (siehe Abb. 4 im Heftbeitrag). Diese beobachtete Entfernung ist aber nicht der tatsächliche Abstand zwischen dem Knoten und dem Quasarzentrum, sondern die Entfernung an der Himmelskugel, also die Projektion des Abstands in eine Ebene senkrecht zur Blickrichtung. Wir sehen nur die Querbewegung; Dass sich der Knoten auch längs der Blickrichtung vom Quasar entfernt, ist unbeobachtbar. Im folgenden soll berechnet werden, mit welcher Geschwindigkeit der *gesehene* Abstand zwischen Knoten und Quasarzentrum anwächst.
a) Der Knoten sendet zu den Zeitpunkten t_1 und $t_1 + \Delta t$ je ein Lichtsignal aus. Wie weit bewegt er sich während Δt in Querrichtung?
b) Wieviel Zeit vergeht zwischen der Ankunft des ersten und der Ankunft des zweiten Signals beim Beobachter? (Da der Beobachter sehr weit weg ist, verlaufen die Lichtstrahlen in Richtung Beobachter praktisch parallel.) Der Beobachter *sieht*, dass in dieser Zeit die in a) berechnete Strecke zurückgelegt wird. Wie groß ist die beobachtete Geschwindigkeit?
c) Die in b) berechnete Geschwindigkeit hängt davon ab, unter welchem Sichtwinkel der Beobachter auf den Jet blickt. Bei welchem Winkel θ ist die beobachtete Geschwindigkeit am größten? Welchen Wert hat die Maximalgeschwindigkeit? Wie hoch muss die Geschwindigkeit v des Knotens mindestens sein, damit ein Beobachter Überlichtgeschwindigkeit sehen kann?

4 Scheinbare Drehung - wie der Gamowsche Radfahrer wirklich aussehen würde

Wenn ein Stab nicht längs, sondern quer zur Blickrichtung fliegt, dann sehen wir ihn entsprechend der Längenkontraktion verkürzt (siehe Abb. 2 im Heft). Das gilt ganz exakt nur für den Augenblick, in dem wir genau auf die Stabmitte blicken: Dann sind nämlich beide Stabenden gleich weit von der Kamera entfernt, also ist gleichzeitig von ihnen eintreffendes Licht auch gleichzeitig gestartet und wir sehen dieselbe Länge, die wir auch messen würden. Bevor der quer fliegende Stab die Sichtlinie kreuzt, erscheint er ein wenig länger, danach ein wenig kürzer (siehe Abb. 2 im Heft).
Man könnte also vermuten, dass fast lichtschnelle Objekte zumindest dann einfach nur gestaucht aussehen, wenn sie sich quer zur Sichtlinie bewegen. Tatsächlich ist das bei räumlich ausgedehnten Objekten aber nicht der Fall, wie Abb. 5 am Beispiel eines Würfels illustriert.

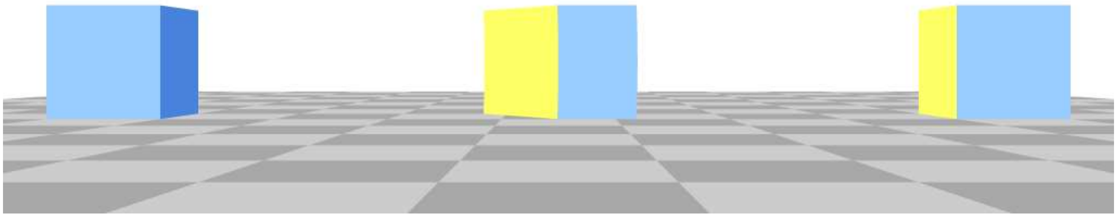


Abb. 5: Der Würfel in der Bildmitte bewegt sich mit 70% der Lichtgeschwindigkeit von links nach rechts über die karierte Plattform. Er ist gleich ausgerichtet wie die ruhenden Würfel rechts und links im Bild und ist (in Ruhe vermessen) auch gleich groß wie diese.

Zwar erscheinen die waagrechten Kanten der hellblauen Seitenfläche verkürzt, aber da die Rückseite sichtbar ist, interpretieren wir dies unwillkürlich als Drehung des Wüfels. Im Heftbeitrag ist anschaulich erklärt, wie es sein kann, dass Licht von der Rückseite des bewegten Würfels zur Kamera gelangt (Abb. 6 im Heft). Um welchen Winkel der Würfel gedreht erscheint, kann man auf einfache Weise berechnen, wenn die Aufnahme aus großer Entfernung gemacht wird. Die Strahlen, die in Richtung Kamera ausgesandt werden, sind dann praktisch parallel. Abb. 6 illustriert, wie aus Licht, das zum selben Zeitpunkt bei der Kamera ankommt (und also nach und nach emittiert wurde), das Bild des bewegten Würfels entsteht.

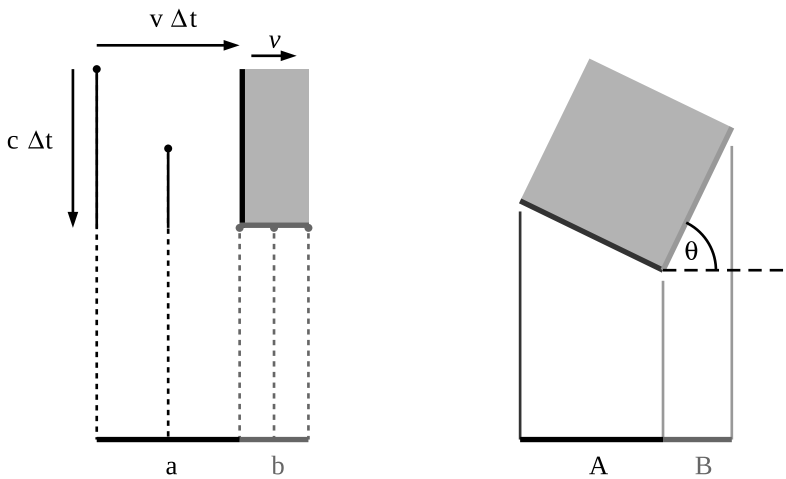


Abb. 6: Die eingezeichneten Lichtstrahlen von einem schnell bewegten Würfel (links) kommen gleichzeitig bei einer weit entfernten Kamera an. Diese macht ein Bild, das sich als gedrehter Würfel deuten lässt (rechts).

Die Lichtstrahlen von der Seitenfläche des Würfels starten gleichzeitig; die Seitenfläche wird also mit ihrer kontrahierten Länge

$$b = l\sqrt{1 - v^2/c^2} \tag{2}$$

abgebildet, wobei l die am ruhenden Würfel gemessene Seitenlänge ist und v die Geschwindigkeit des Würfels, die senkrecht zur Sichtlinie gerichtet ist.
Licht von der Rückseite kann die Kamera erreichen, weil der Würfel schnell genug "den Weg frei macht". Licht von der hinteren Kante hat einen um die Strecke l längeren Weg zur Kamera und startet daher um $\Delta t = l/c$ früher als das Licht von der Seitenfläche. Zu diesem früheren Zeitpunkt befand sich der Würfel eine Strecke $v\Delta t = l\,v/c$ weiter links. Licht von der vorderen Kante startet gleichzeitig mit dem von der Seitenfläche. Die Rückseite erstreckt sich im Bild daher über die Strecke

$$a = l\,v/c. \tag{3}$$

Würden wir stattdessen einen gedrehten ruhenden Würfel aus großer Entfernung beobachten (Abb. 6 rechts), dann wäre die Seitenfläche im Bild

$$B = l \cos\vartheta \tag{4}$$

breit und die Rückseite

$$A = l \sin\vartheta. \tag{5}$$

Für

$$\sin\vartheta = v/c \tag{6}$$

ist das Bild identisch mit dem des bewegten Würfels.

Aufgabe 6: Der Gamowsche Radfahrer

Eines der Bilder b bis e von Abb. 7 zeigt, wie der Gamowsche Radfahrer von Abb. 1 wirklich aussehen würde. Welches ist das richtige Bild? (Tipp: Der Radfahrer bewegt sich, genau wie der Würfel in Abb. 5, quer durch die Sichtlinie.)

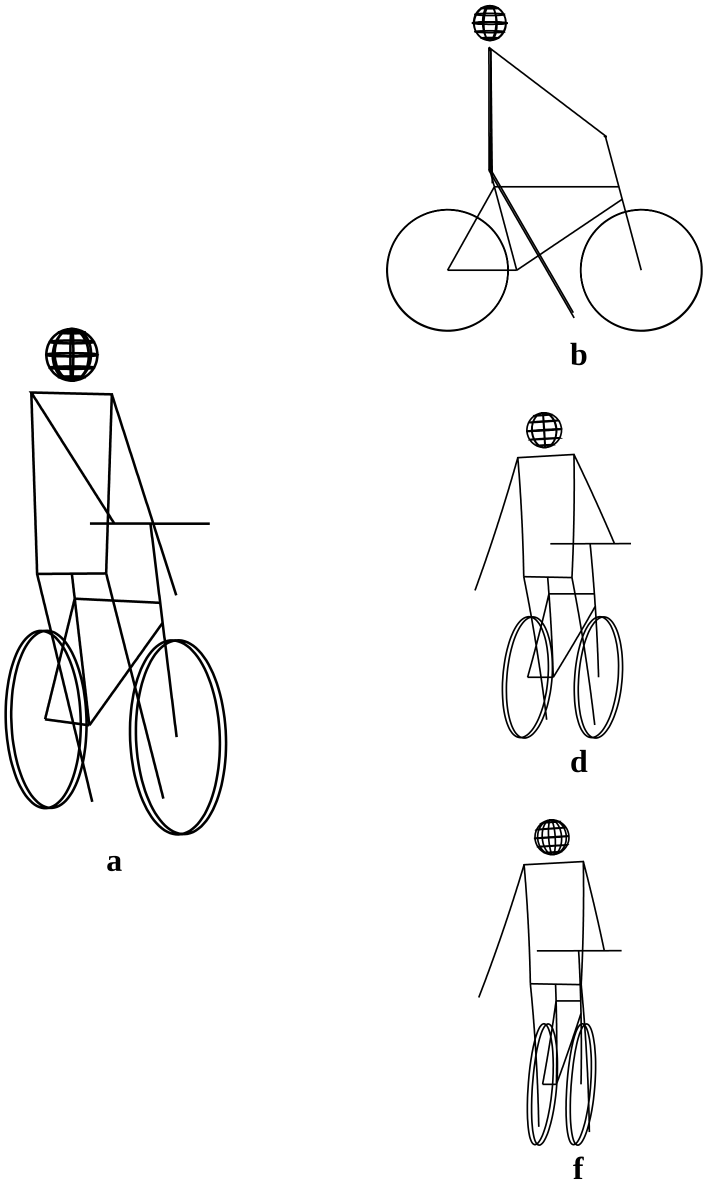


Abb. 7: a: “Drahtmodell” eines Radfahrers, aus der Ruhe betrachtet. (Die rechte Hand greift den Lenker, d.h. wir sehen den Radfahrer in Bild a schräg von vorn.) Der Radfahrer fährt von links nach rechts vorbei, wir photographieren ihn und blicken dabei genau senkrecht auf seine Bahn. Welches der Bilder b bis g ist das richtige, wenn der Radfahrer so schnell ist wie der Gamowsche Radfahrer in Abb. 1?

5 Lösungen der Aufgaben

Aufgabe 1: Längenkontraktion

Die Geschwindigkeit des Radfahrers erkennt man klar an der angeblichen Gestalt der Räder: Sie sind in horizontaler Richtung um den Faktor 0,37 gestaucht gezeichnet. Mit Gleichung (1) entspricht das der Geschwindigkeit $v = 0{,}93\,c$.

Aufgabe 2: Lichtlaufzeiteffekt

Wenn sich ein Stab mit Ruhelänge l' längs der Sichtlinie von der Kamera entfernt, ist seine gesehene Länge $L = l'\sqrt{(1-v/c)/(1+v/c)}$.
Zu diesem Ergebnis kommt man am schnellsten dadurch, dass man dem wegfliegenden Stab die negative Geschwindigkeit $-v$ zuordnet.
Aufschlussreicher ist es, das Argument von Abschnitt 2 für den wegfliegenden Stab zu wiederholen: Ein Lichtstrahl, der zur Zeit t_1 von der Stabspitze in Richtung Kamera emittiert wird, kommt nach einer gewissen Zeit Δt am Stabende vorbei: $c\Delta t = l - v\Delta t$. Alles weitere ist völlig analog zu der Rechnung, die in Abschnitt 2 ausgeführt ist ($L = c\Delta t$ und Längenkontraktion nach Gl. (1)).

Aufgabe 3: Scheinbare Geschwindigkeit - I

Wenn das Raumschiff um 12:00 mit 60% der Lichtgeschwindigkeit an der Erde vorbei Richtung Sonne fliegt, dann findet der Vorbeiflug an der Sonne um 12:13:51 statt, wird auf der Erde aber erst beobachtet, wenn um 12:22:09 das beim Vorbeiflug ausgesandte Licht eintrifft. Das Raumschiff scheint 22 Minuten und 9 Sekunden für die Strecke Erde-Sonne benötigt zu haben, 2,7mal so viel wie das Licht: Der Zuschauer auf der Erde *sieht* also, dass das Raumschiff mit 37% der Lichtgeschwindigkeit unterwegs ist.

Aufgabe 4: Scheinbare Geschwindigkeit - II

a) Ein Objekt, das sich längs der Sichtlinie nähert und genau Lichtgeschwindigkeit zu haben scheint, bewegt sich tatsächlich mit 50% der Lichtgeschwindigkeit.

b) Das wegfliegende Objekt scheint sich mit $V = v/(1+v/c)$ vom Betrachter zu entfernen. Seine scheinbare Geschwindigkeit ist immer kleiner als die halbe Lichtgeschwindigkeit.

Aufgabe 5: Scheinbare Geschwindigkeit - III: Quasarjet

a) Der Knoten legt in der Zeit Δt die Entfernung $v\Delta t$ zurückt, deren Komponente in Querrichtung $\Delta x = v\Delta t \sin\theta$ ist (Abb. 8).

b) Das erste Lichtsignal erreicht den Beobachter zur Zeit $\tilde{t}_1 = t_1 + D/c$, wobei D der Abstand zwischen dem Emissionspunkt und dem Beobachter ist. In der Zeit Δt nähert sich der Knoten dem Beobachter um die Strecke $v\Delta t\cos\theta$ (Abb. 8). Das zweite Lichtsignal hat also bis zum Beobachter die kürzere Entfernung $D - v\Delta t\cos\theta$ zurückzulegen und erreicht den Beobachter zur Zeit $\tilde{t}_2 = t_1 + \Delta t + (D - v\Delta t\cos\theta)/c$.
Die beobachtete Quergeschwindigkeit ist also $V = \Delta x/(\tilde{t}_2 - \tilde{t}_1)$; sie läßt sich in die Form

$$V = \frac{v\sin\theta}{1-(v/c)\cos\theta}$$

bringen.

c) Die Funktion $V(\theta)$ hat bei $\theta_{\mathrm{m}} = \arcsin\sqrt{1-(v/c)^2}$ ihr Maximum mit dem Wert $V_{\mathrm{m}} = v/\sqrt{1-(v/c)^2}$. Der Maximalwert V_{m} ist größer als die Lichtgeschwindigkeit, wenn $v > c/\sqrt{2}$ ist. Wenn also der Knoten etwa 71% der Lichtgeschwindigkeit hat, dann sieht ein Beobachter, der genau unter dem Winkel θ_{m} blickt, gerade Überlichtgeschwindigkeit. Wenn man mehrfache Lichtgeschwindigkeit beobachtet, wie im Fall von 3C273, dann muss die Knotengeschwindigkeit noch wesentlich höher sein.

Aufgabe 6: Der Gamowsche Radfahrer

Das richtige Bild ist d: Ganz analog wie bei dem Würfel in Abb. 5 scheint der Radfahrer gedreht zu sein, so dass er uns den Rücken zuwendet (erkenntlich daran, dass die rechte Hand am Lenker ist). Zudem haben die Räder genau die richtige Breite: Der Gamowsche Radfahrer ist mit 93% der Lichtgeschwindigkeit unterwegs (siehe Aufgabe 1) und alle Seitenflächen erscheinen entsprechend der Geschwindigkeit kontrahiert (siehe Abb. 6).

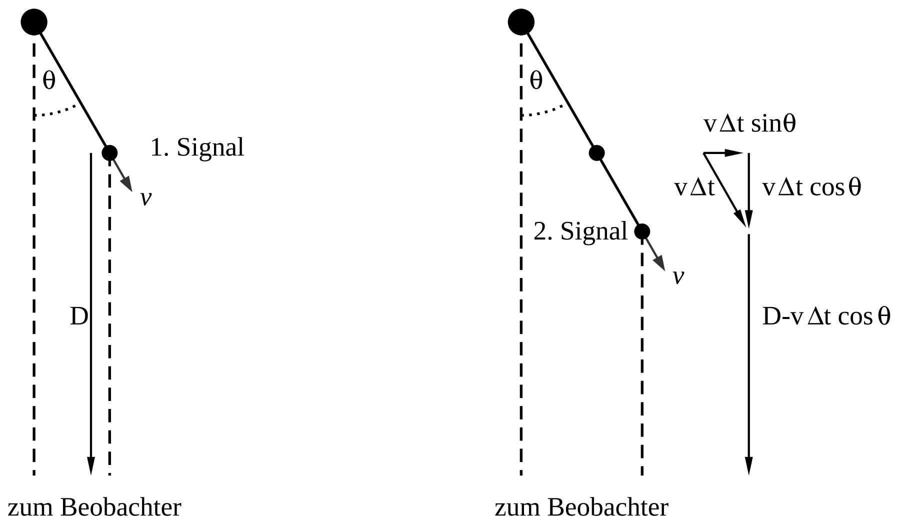


Abb. 8: Zu Aufgabe 5. Links: Aussenden des ersten Lichtsignals zur Zeit t_1 in einer Entfernung D vom Beobachter. Rechts: Aussenden des zweiten Lichtsignals zur Zeit $t_1 + \Delta t$: In der Zwischenzeit hat sich der Knoten weiterbewegt.

Die anderen Bilder zeigen:

b – Blick von der Seite auf das ruhende Rad,
c – Blick von der Seite auf ein längenkontrahiertes Rad (entspricht der Darstellung in Abb. 1),
e – Blick auf ein Rad, das mit 95% der Lichtgeschwindigkeit die Sichtlinie überquert (erkenntlich an der Breite der Räder),
f – Blick auf ein Rad, das mit 99% der Lichtgeschwindigkeit die Sichtlinie quert (erkenntlich an der Breite der Räder),
g – Blick auf ein Rad, das mit 99% der Lichtgeschwindigkeit rückwärts die Sichtlinie überquert (der Radfahrer erscheint so gedreht, dass er uns das Gesicht zuwendet).

Literatur

[1] George Gamow: Mr. Tompkins' seltsame Reisen durch Kosmos und Mikrokosmos, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 1984