

Signalgeschwindigkeit und Wahrnehmung

Udo Backhaus, Universität Duisburg-Essen

17. März 2005

Wenn man einen sich bewegendem Körper hört oder sieht, nimmt man ihn nicht so wahr, wie er im Moment der Wahrnehmung „aussieht“, und nicht dort, wo er sich befindet. Die Wahrnehmung reicht vielmehr zurück in die Vergangenheit, weil die Signale, die uns die Information übermitteln haben, eine gewisse Zeit brauchen, um zu uns zu gelangen. Dieser Effekt spielt in der Akustik eine Rolle, führt aber insbesondere in der relativistischen Optik zu überraschenden Effekten, die lange Zeit übersehen wurden.

1 Das Flugzeug am Himmel

Jeder, der schon einmal bei ruhigem Wetter und klarem Himmel zu den Sternen geschaut hat, kennt den Effekt: Ganz deutlich ist ein Flugzeug zu hören, aber man kann es lange Zeit mit den Augen nicht finden. Wenn man es schließlich entdeckt hat, sieht man es nicht am erwarteten Ort, sondern – in Bewegungsrichtung des Flugzeugs – viel weiter vorn. Und wenn der Klang schließlich direkt von oben kommt, ist das Flugzeug, wenn es hoch genug fliegt, schon fast den Blicken entschwunden.

Das Phänomen ist beeindruckend, die Erklärung einfach: Der Schall braucht einige Zeit, um unser Ohr zu erreichen. Wir hören das Flugzeug dort, wo es den Schall, den wir gerade empfangen, ausgesendet hat. In der Zwischenzeit aber ist das Flugzeug weitergefliegen. Wir *sehen* es deshalb weiter vorn, als wir es *hören*. Der Effekt muss umso größer sein, je höher das Flugzeug fliegt und je schneller es ist.

Die Analyse der Situation ist besonders einfach in dem Moment, in dem wir das Flugzeug direkt über uns sehen (Abb. 1): Es entsteht ein rechtwinkliges Dreieck, das leicht zu konstruieren oder zu berechnen ist. Die Zeichnung macht deutlich, dass der Unterschied zwischen den beiden Wahrnehmungen umso größer ist, je höher und je schneller das Flugzeug ist. Den Zusammenhang kann man folgendermaßen berechnen (c =Schallgeschwindigkeit, v =Geschwindigkeit des Flugzeugs):

$$\begin{aligned}c^2 \Delta t^2 &= v^2 \Delta t^2 + h^2 \quad \implies \quad \Delta t^2 = \frac{h^2}{(c^2 - v^2)} \\ \Delta s^2 &= c^2 \Delta t^2 - h^2 = \frac{c^2 h^2}{c^2 - v^2} - h^2 = \frac{v^2 h^2}{c^2 - v^2} \quad \implies \quad \Delta s = \frac{h}{\sqrt{\frac{c^2}{v^2} - 1}}\end{aligned}$$

Der Winkel zwischen optischer und akustischer Wahrnehmung hängt allerdings nur davon ab, wie schnell das Flugzeug im Vergleich zur Schallgeschwindigkeit ist:

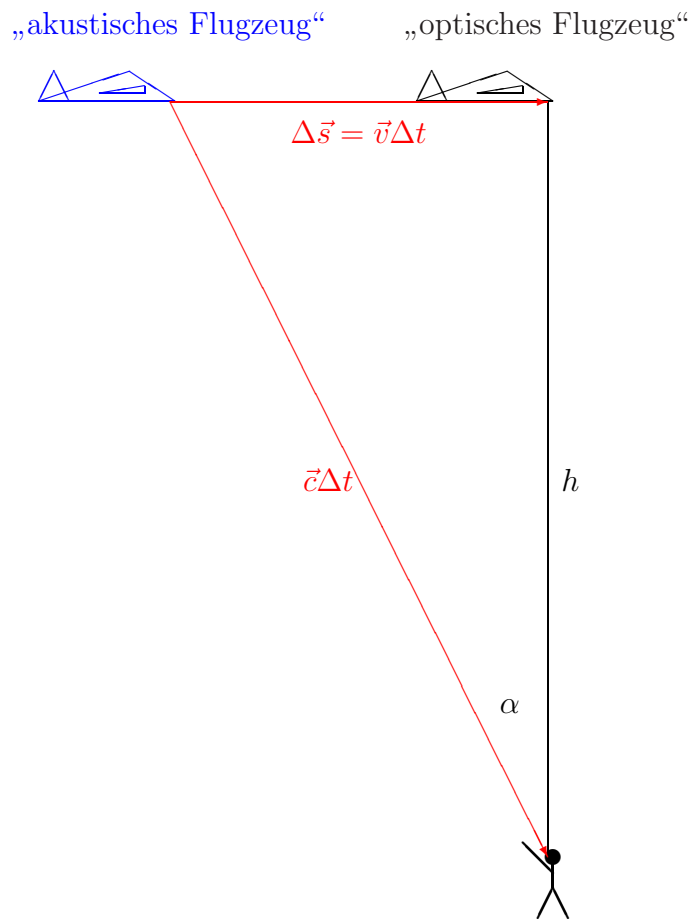


Abbildung 1: Zum Unterschied zwischen akustischer und optischer Wahrnehmung: In der Zeit Δt , die der Schall gebraucht, um den Beobachter zu erreichen, ist das Flugzeug um $\Delta \vec{s} = \vec{v} \Delta t$ weitergeflogen.

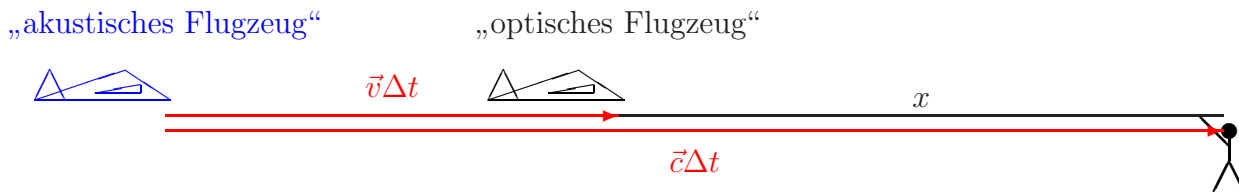


Abbildung 2: Ein herannahendes Flugzeug am Ort x wird akustisch weiter entfernt (am Ort x_s wahrgenommen).

$$\sin \alpha = \frac{v}{c}$$

Hier erkennt man deutlich, dass man ein überschallschnelles Flugzeug noch gar nicht hören kann, wenn es sich gerade senkrecht oberhalb befindet.

Wenn sich das Flugzeug direkt auf den Beobachter zubewegt (realistischer vielleicht bei einem pfeifenden ICE-Zug!), kann kein Unterschied zwischen den Wahrnehmungsrichtungen entstehen. Trotzdem aber hat die endliche Schallgeschwindigkeit einen bemerkenswerten Effekt (Abb. 2): Wir nehmen das Flugzeug mit den Ohren als weiter entfernt wahr, als es tatsächlich ist. Wenn es sich entfernt, ist es allerdings umgekehrt: Wir hören es näher, als wir es sehen (x =tatsächlicher Ort, x_s =scheinbarer Ort des Flugzeugs).

$$\begin{aligned} x - x_s &= v\Delta t = -v\frac{x_s}{c} \\ \implies x_s &= \frac{x}{1 - \frac{v}{c}} \end{aligned}$$

(Das Vorzeichen entsteht dadurch, dass die x -Achse, beginnend beim Beobachter, nach rechts zeigt.)

Auch in diesem Fall ist der Effekt umso größer, je weiter der Zug entfernt ist und je schneller er fährt. Wenn allerdings der Zug gerade an uns vorüber fährt, gibt es keinen Unterschied zwischen optischer und akustischer Wahrnehmung. Das heißt aber: Der auf uns zukommende Zug scheint (akustisch wahrgenommen) in derselben Zeit eine größere Strecke zurückgelegt zu haben, also schneller zu sein als in Wirklichkeit:

$$v_s = \frac{v}{1 - \frac{v}{c}}$$

Entsprechend hören wir einen Zug verlangsamt, wenn er sich von uns entfernt:

$$v_s = \frac{v}{1 + \frac{v}{c}}$$

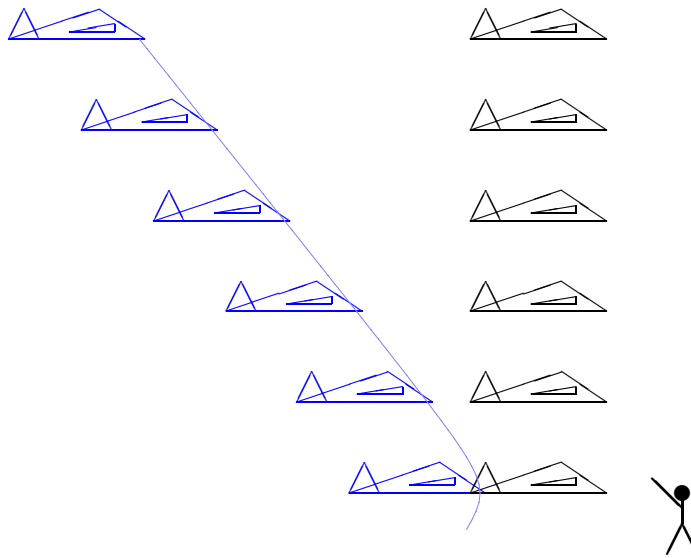


Abbildung 3: Aus einem linearen Formationsflug wird bei akustischer Wahrnehmung eine gebogene Linie.

Bei einem vorbeifahrenden ICE könnte der Effekt durchaus wahrnehmbar sein¹: Bei einer Geschwindigkeit von $v = 250 \frac{km}{h} \approx 0,2c$ ist bei Herannahen $v_{s1} = \frac{5}{4}c$ und beim Wegfahren $v_{s2} = \frac{5}{6}c$, also $\frac{v_{s1}}{v_{s2}} = \frac{3}{2}$. Der Zug scheint also um die Hälfte schneller heranzukommen als sich zu entfernen!

Welche Wirkung müsste dieser Effekt haben, wenn, z.B. bei einer Flugschau, statt eines Flugzeuges mehrere in linearer Formation flögen und wir sie akustisch auseinander halten könnten? Wenn sie (beinahe) auf uns zuflögen, hätten sie scheinbar einen um den Faktor $\frac{1}{1-\frac{v}{c}}$ vergrößerten Abstand voneinander. Wenn sie aber statt hintereinander nebeneinander flögen, nähmen wir statt der Gerade eine krummlinige Formation wahr (Abb. 3)!

2 Ein fast lichtschneller Stab

Bisher haben wir noch nicht berücksichtigt, dass auch das Licht etwas Zeit benötigt, um zu uns zu gelangen. Das war bisher auch gerechtfertigt, weil die Lichtgeschwindigkeit c_{Licht} , sie wird von nun an nur mit c bezeichnet, viel größer als die Schallgeschwindigkeit c_{Schall} ist (etwa um den Faktor $10^7 = 10.000.000!$) und Züge und Flugzeuge sich noch viel langsamer bewegen.

Welchen Einfluss hätte die endliche Lichtgeschwindigkeit auf die optische Wahrnehmung bei Körpern, die sich fast mit Lichtgeschwindigkeit bewegen?

Wenn man die momentane Position und Form eines sich sehr schnell bewegenden Körpers *messen* will, misst man die Positionen vieler Teile des Körpers gleichzeitig. Wenn man sich den Körper aber *ansieht* oder ihn *fotografiert*, registriert man Licht, das gleichzeitig in das Auge (oder die Kamera) fällt. Bei einem Objekt, das sich schnell bewegt, ist das aber nicht dasselbe: Wenn das Objekt eine große Ausdehnung hat, braucht das Licht

¹Noch auffälliger ist dabei allerdings ein anderer Effekt: Der Pfeifton ist bei Herannahen des Zuges höher als beim Entfernen.

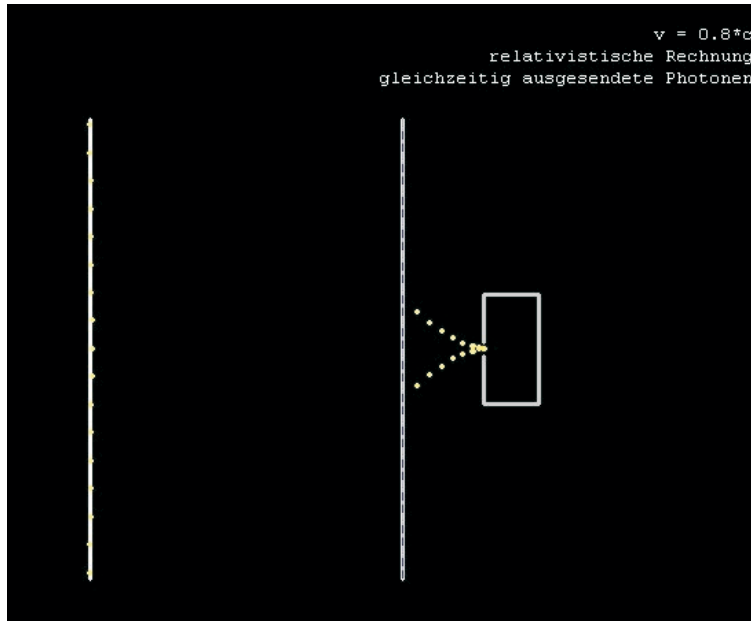


Abbildung 4: Licht, das gleichzeitig an der Position 1 ausgesendet wurde, trifft zu unterschiedlichen Zeiten bei der Kamera ein, wenn sich der Stab bis zur Position 2 weiterbewegt hat ($v = 0,8c$).

von verschiedenen Teilen unterschiedlich lange, um registriert zu werden. Bei einer kurzen Verschlusszeit wird nur ein Teil davon in die Kamera gelangen (Abb. 4). Umgekehrt muss Licht, das gleichzeitig beim Beobachter ankommt, zu verschiedenen Zeiten ausgesendet worden sein – und das heißt bei einem sich bewegenden Objekt: an verschiedenen Stellen seiner Bahn! Da wir aber die Teile des Objektes dort sehen, wo sie das Licht ausgesendet haben, erscheint es uns, wie die Flugzeugformation, nicht nur an einem anderen Ort, sondern auch mit verzerrter Form (Abb. 5).

Ein auf den Beobachter zukommender Stab sieht wie zu einem Bogen gekrümmt aus. Die Krümmung ist umso stärker, je schneller sich der Stab bewegt. Es kann sogar vorkommen, dass der Beobachter, ohne sich umzudrehen, die Rückseite des Stabes sehen kann. Allerdings geschieht das erst, wenn der Stab bereits vorbei ist, seine Ränder aber so aussehen, als befänden sie sich noch vor dem Beobachter (Abb. 6).

3 Ein fast lichtschneller Würfel

Wie hintereinander fliegende Flugzeuge, die auf einen Beobachter zukommen, akustisch einen vergrößerten Abstand zu haben scheinen (s.o.), so muss die Länge eines Objektes, das sehr schnell auf einen Beobachter zukommt, durch die endliche Lichtgeschwindigkeit vergrößert erscheinen.

Allerdings ist bei Geschwindigkeiten in der Nähe der Lichtgeschwindigkeit ein wichtiges Ergebnis der speziellen Relativitätstheorie zu berücksichtigen, die so genannte **Lorentz-Kontraktion**: Wenn man die Positionen von Vorder- und Rückseite eines sich bewegen-

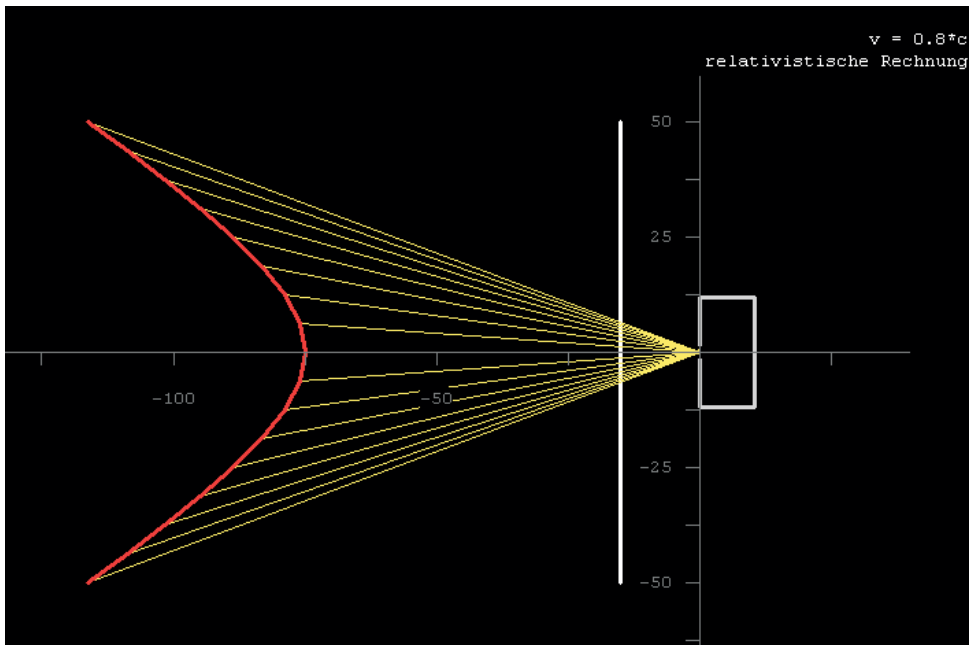


Abbildung 5: Licht, das gleichzeitig bei der Kamera eintrifft, ist zu unterschiedlichen Stellen ausgesendet worden ($v = 0,8c$).

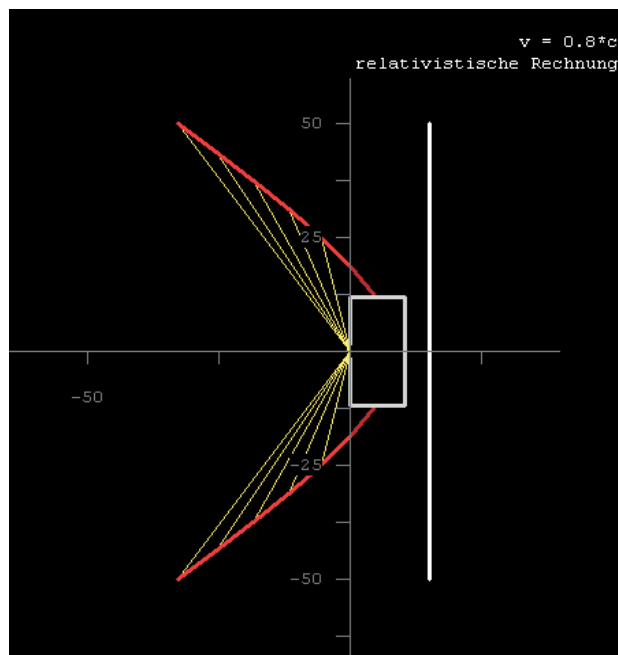


Abbildung 6: Wenn der Stab bereits an der Kamera vorbei ist, werden Teile der Rückseite des Stabes sichtbar ($v = 0,8c$).

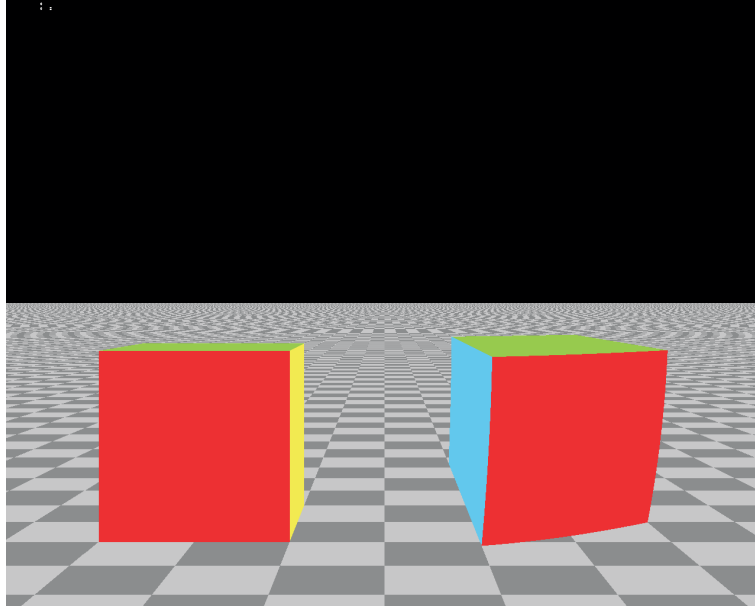


Abbildung 7: Die scheinbare Verlängerung des herannahenden Würfels (rechts) ist nur schwierig zu erkennen, aber der Vergleich mit dem ruhenden Würfel (links) und mit dem quadratisch gekachelten Boden macht den Effekt sichtbar.

den Objektes gleichzeitig misst, dann erweist es sich als kürzer, als wenn es in Ruhe wäre. Oder kurz:

Sich schnell bewegende Objekte sind in Bewegungsrichtung verkürzt.

Diese Verkürzung macht sich aber nur bei sehr großen Geschwindigkeiten bemerkbar. Zwischen der in Ruhe gemessenen Länge l_0 und der bei Bewegung gemessenen Länge l besteht nämlich der folgende Zusammenhang:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Wenn man dieses durch die Lorentz-Kontraktion verkürzte Objekt fotografiert, erscheint es durch die endliche Lichtlaufzeit wieder verlängert. *Welcher dieser beiden gegenläufigen Effekte überwiegt?* Man kann zeigen, dass die Antwort auf diese Frage davon abhängt, aus welcher Richtung man das Objekt beobachtet: Wenn man das Objekt von der Seite betrachtet, überwiegt die Lorentzkontraktion. Wenn man dem Objekt in einem bestimmten Winkel entgenseiht, heben sich beide Effekte gegenseitig auf. Aber:

Ein auf einen Beobachter zufliegendes Objekt erscheint durch den Laufzeiteffekt trotz der Lorentz-Kontraktion verlängert.

Allerdings ist diese Verlängerung nur schwierig zu erkennen, da bei der Ansicht von vorn die Länge des Objektes durch die Perspektive stark verkürzt erscheint (Abb. 7).



Abbildung 8: Ein Foto von Albert Einstein (links) wird bei schneller Annäherung (Mitte) anders verzerrt als bei einem Vorbeiflug (rechts).

4 Verallgemeinerungen

Ebenso wie ein Stab durch den Lichtlaufzeiteffekt verbogen erscheint, wird eine Fläche durch diesen Effekt gekrümmt. Die Krümmung tritt immer in Bewegungsrichtung auf, hat also bei einem sich nähernden Bild eine ganz andere Wirkung als bei einem Vorbeiflug (Abb. 8).

Bei bewegten räumlichen Objekten kommt zu der scheinbaren Verbiegung ihrer Kanten und der Krümmung ihrer ebenen Oberflächen noch die Veränderung der Länge hinzu. Da alle diese Effekte nicht nur von der Geschwindigkeit abhängen, sondern auch vom Winkel zwischen Bewegungs- und Beobachtungsrichtung, ergibt sich bei großen Körpern ein komplexes Zusammenspiel, das sich in unterschiedlichsten Verzerrungen und Verdrehungen äußert (Abb. 9).

Ein grundlegendes Postulat der Relativitätstheorie besagt, dass es bei Körpern, die sich gegeneinander mit konstanter Geschwindigkeit bewegen, unmöglich ist zu entscheiden, welcher der beiden Körper sich bewegt und welcher sich in Ruhe befindet. *Es ist unmöglich, zwischen dem Zustand der Ruhe und dem einer gleichförmigen Bewegung zu unterscheiden.* Die bisher besprochenen Effekte treten also ebenso auf, wenn sich nicht der fotografierte Körper bewegt, sondern der Beobachter mit seiner Kamera. In Abb. 9 bewegt sich deshalb statt des Objektes die Kamera. Diese Bewegung ist an der Verformung des quadratisch gekachelten Fußbodens zu erkennen.

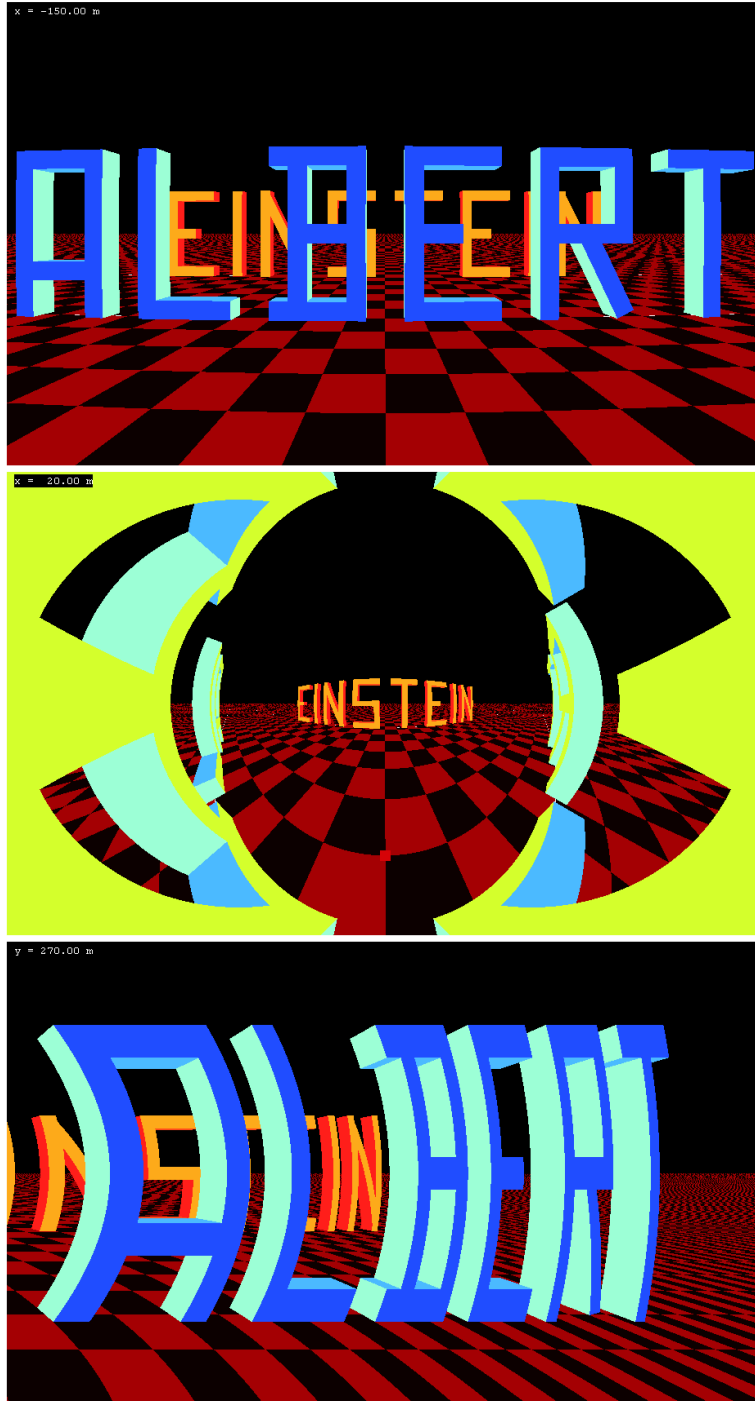


Abbildung 9: Eine Kamera bewegt sich mit 90% der Lichtgeschwindigkeit relativ zum Schriftzug „ALBERT EINSTEIN“ (oben) zu. Die Überlagerung von Lorentz-Kontraktion und Lichtlaufzeiteffekt führt bei Annäherung (Mitte) und bei Vorbeiflug (unten) zu unterschiedlichen Effekten.