

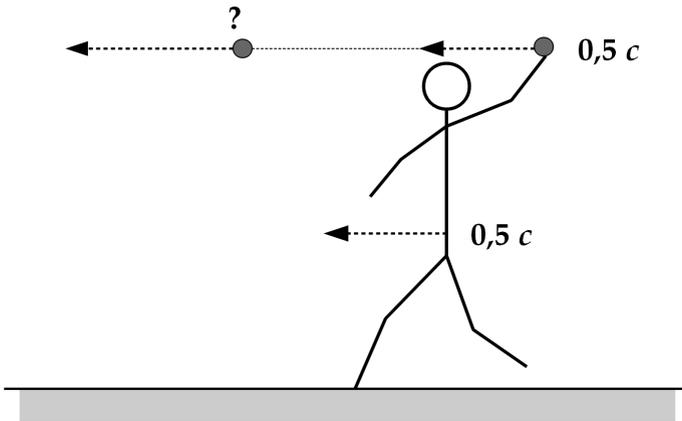
## 8 Spezielle Relativitätstheorie

Es ist ein sonniger Herbsttag, der zum Spazieren einlädt. Am Nachmittag gehen Sie mit Ihrer Familie hinunter an den nahen Fluss. Und dort fängt Ihr Nachwuchs an, mit den Kieselsteinen zu spielen und sie ins Wasser zu werfen. Der Kleine kommt allerdings noch nicht besonders weit. Da er aber unbedingt einmal sehen möchte, wie ein Stein den ganzen Fluss überquert, bittet er Sie, es doch auch einmal zu versuchen. Lange ist es her, seit Ihnen dies das letzte Mal gelungen ist. Ein passender Stein ist schnell gefunden, aber obwohl Sie ihn mit aller Kraft werfen, platscht er doch nur ins Wasser. Mit dem nächsten kommen Sie schon etwas weiter, aber noch immer fehlen ein paar Meter. Jetzt hat Sie der Ehrgeiz gepackt, aber wie können Sie die Wurfweite noch steigern? Sie nehmen ein paar Schritte Anlauf und mit dem zusätzlichen Schwung landet dieser Stein endlich am anderen Ufer.

Doch warum flog der letzte Stein am weitesten? Das liegt daran, dass sich Ihre Anlaufgeschwindigkeit und die Ausholbewegung Ihres Armes addiert haben. Deshalb war der Stein beim Abwurf schneller und die Flugstrecke dementsprechend länger. Ganz deutlich sehen wir dies bei allen Ballsportarten oder in der Leichtathletik. Egal ob beim Freistoß im Fußball, beim Kugelstoßen oder beim Speerwerfen, überall wird Anlauf genommen, um die Geschwindigkeit zu steigern. Doch gilt diese einfache Addition von Geschwindigkeiten immer?

In unserer Alltagswelt zumindest scheint das der Fall zu sein, doch hier sind die Geschwindigkeiten ja auch relativ klein. Zumindest sind sie das im Vergleich zur *Lichtgeschwindigkeit* mit  $300\,000\text{ km/s}$ , die wir ab jetzt wie üblich mit  $c$  bezeichnen. Nehmen wir einmal an, wir könnten einen Speer mit halber Lichtgeschwindigkeit werfen, also mit  $0,5c$ . Und stellen wir uns zusätzlich noch vor, dass wir auch eine Anlaufgeschwindigkeit von  $0,5c$  erreichen könnten. Dann flöge der Speer mit Lichtgeschwindigkeit, oder etwa nicht? Wenn wir uns noch steigern, dann sollte es möglich sein, dass der Speer sogar mit Überlichtgeschwindigkeit fliegt. Aber kann dies wirklich gelingen?

Ein einfaches Experiment wird uns gleich auf den Boden der Tatsachen zurückholen und etwas verwirren. Wir kappen die Spitze des Speers und bauen dort stattdessen einen kleinen Laserpointer ein. Den Speer legen wir auf den Boden und messen erst einmal sicherheitshalber die Geschwindigkeit des Lichts, das von unserem Laser abgestrahlt wird. Wie erwartet, erhalten wir  $c$ , die Lichtgeschwindigkeit. Nun geben wir den Speer einem Weltklassewerfer in die Hand und messen die



- 13 Wie addieren sich Geschwindigkeiten in der Nähe der Lichtgeschwindigkeit?

Geschwindigkeit des Lichts, das von dem auf uns zu fliegenden Speer stammt. Es ist wieder exakt  $c$ , und kein bisschen mehr.

Egal wie sehr wir die Empfindlichkeit unseren Apparaturen auch steigern, wir messen niemals eine größere Geschwindigkeit. In unserer Verzweiflung versuchen wir nun das Gegenteil. Wir drehen den Speer um und schleudern ihn von den Messgeräten weg. Nun müsste die Geschwindigkeit doch nach dem gesunden Menschenverstand kleiner sein als  $c$ . Doch wieder Fehlanzeige, es kommt immer noch exakt  $c$  als Messergebnis heraus. Sind Sie nun etwas verstört und vielleicht sogar ratlos? Dann ergeht es Ihnen wie den Physikern zwischen den Jahren 1887 und 1905.

Die Vorstellung, dass Licht eine Welle ist, war im 19. Jahrhundert fest etabliert. Doch zu dieser Denkweise gehörte es auch, dass eine Welle immer auf ein Medium angewiesen ist. In diesem Medium schwingen die Lichtwellen hin und her. Nur durch dieses Medium können sie sich überhaupt fortbewegen. Bei allen bekannten Wellenerscheinungen wie beispielsweise Wasser- oder Schallwellen ist dies schließlich so. Etwas anderes war demzufolge zur damaligen Zeit nicht vorstellbar. Deshalb musste auch Licht von einem Medium abhängig sein, obwohl man dieses bisher noch nicht nachgewiesen hatte. Man bezeichnete dieses Medium nach dem griechischen Wort für Himmel als *Äther*.

Nur durch diesen Äther konnte sich Licht ausbreiten, und daher musste der Äther auch den gesamten Weltraum ausfüllen, denn sonst könnten wir weder die Sonne noch die Sterne sehen. Man stellte sich den Äther als eine ganz schwach verdünnte Flüssigkeit oder ein Gas vor. Und durch diesen Äther musste sich alles hindurchbewegen, auch die Planeten auf ihrem Weg um die Sonne. Folglich musste der Lauf der Erde um die Sonne mit immerhin 30 Kilometern pro Sekunde einen

gewaltigen Wind im Äther verursachen. Genau diesen Ätherwind mit seinen Verwirbelungen versuchte man mit immer ausgeklügelteren Verfahren zu messen.

Doch wie oben bei unserem Speer hat man niemals eine Abweichung von dem festen Wert der Lichtgeschwindigkeit gemessen. Im Jahr 1887 hatte man endlich eine besonders trickreiche Versuchsanordnung, mit deren Empfindlichkeit man auch die Geschwindigkeit der Erddrehung nachweisen können sollte. Doch auch die zusätzliche Geschwindigkeit von 500 m/s am Äquator und vor allem ihre Änderung mit dem Tagesverlauf waren nicht nachweisbar. Morgens sollte die Geschwindigkeit des Sonnenlichts um diesen Betrag größer und abends entsprechend kleiner sein.

Doch diesmal waren die Ergebnisse wirklich eindeutig. Die Geschwindigkeit des Sonnenlichts war mit und gegen die Drehung der Erde immer exakt dieselbe. Aber wie kann man diese Messungen mit dem benötigten Äther unter einen Hut bringen? Die Physiker wurden nun wirklich kreativ und erfanden allerlei Zusatztheorien, warum man gerade *keine* Bewegung bezüglich des Äthers nachweisen kann. Anfangs lief es darauf hinaus, dass die Erde den Äther vollständig mitführt und deshalb die Geschwindigkeit des Äthers am Erdboden genau null ist.

In den 1890er Jahren wurde jedoch eine Äthertheorie entwickelt, bei der der Äther sogar *immer* in Ruhe war. Er konnte gar nicht durch einen sich bewegenden Körper mitgerissen werden. Die Lichtgeschwindigkeitsmessungen erklärte man sich in dieser Theorie durch merkwürdige Effekte des ruhenden Äthers auf die sich bewegende Versuchsanordnung. Überraschenderweise hatten diese Effekte schon genau dieselbe mathematische Struktur wie bei der späteren Relativitätstheorie. Nur den entscheidenden Schritt war keiner bereit zu gehen. Der Äther war immer noch da. Nachweisen konnte man ihn zwar nicht, aber man hatte ja nun eine Erklärung parat, warum dies auch so sein musste. Der Äther war ein Phantom, und die Theorie erklärte auch noch, warum man es nicht sehen konnte. Doch vorerst stellte niemand seine Existenz infrage.

Erst Albert Einstein war radikal genug, die korrekten Schlussfolgerungen zu ziehen. Seinen Originalartikel aus dem Jahr 1905 habe ich mir einmal für einen Seminarvortrag kopiert. Er liest sich auch heute noch flüssig und beschreibt klar, von welchen Voraussetzungen Einstein ausging. Obwohl er die Experimente kannte, näherte er sich dem Problem doch von einer ganz anderen Seite. Mit genau zwei Voraussetzungen krepelte er die bis dahin bestehenden Vorstellungen von Raum und Zeit um.

Die erste war die Annahme, dass die Gültigkeit von physikalischen Gesetzen nicht davon abhängen darf, wie sich eine Person oder ein Experiment bewegt. Man nennt diese Voraussetzung das *Relativitätsprinzip*, auf das wir gleich genauer eingehen werden. Die zweite Grundannahme ist die experimentelle Tatsache, dass die *Lichtgeschwindigkeit* unabhängig von der Bewegung der Lichtquelle oder des

Beobachters *immer denselben Wert* besitzt. Einstein hat damit die scheinbar widersprüchlichen Messungen zum Naturgesetz erhoben und dann untersucht, welche *Folgerungen* sich daraus ergeben.

Das Relativitätsprinzip hat Einstein für diese Theorie auf gleichförmige, also kräftefreie Bewegungen eingeschränkt. Damit ist eine geradlinige Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit gemeint, wie beispielsweise die eines Zug auf gerader freier Strecke, wo der Zug weder beschleunigt noch bremst. Wegen dieser Beschränkung trägt die erste von Einsteins Relativitätstheorien den Zusatz speziell. Die zweite, bei der er auch beschleunigte Bewegungen zuließ, wird dagegen als allgemeine Relativitätstheorie bezeichnet.

Bleiben wir bei dem Beispiel mit dem Zug, das auch Einstein selbst gerne verwendet hat. So wie in einem fahrenden Zug alle mechanischen Gesetze dieselben sind, so sollen auch die elektromagnetischen Gesetze unverändert gelten. Ein Beispiel für mechanische Gesetzmäßigkeiten ist ein Tischtennispiel. Solange der Zug seine Geschwindigkeit nicht ändert, wird ein Spiel im Zug genauso ablaufen, wie wir das gewohnt sind. Würden wir etwa die Fenster verdunkeln und wäre auch kein Fahrgeräusch zu hören, so könnte niemand unterscheiden, ob sich der Zug überhaupt bewegt. Tatsächlich ist es völlig egal, ob der Zug durch die Landschaft fährt oder die Landschaft an einem stehenden Zug vorbei rauschen würde. Einzig und allein die *relative* Geschwindigkeit zwischen den beiden sogenannten Bezugssystemen zählt.

Man kann die spezielle Relativitätstheorie mit einem einzigen Satz zusammenfassen: Alles hat seinen Preis. Die Rahmenbedingung, dass ein jeder Beobachter unabhängig von seinem Bewegungszustand immer dieselbe Lichtgeschwindigkeit misst, kostet uns unser Bauchgefühl für die Addition von Geschwindigkeiten und noch vieles mehr. Und wir zahlen diesen Preis genau deshalb, weil die Lichtgeschwindigkeit einen festen Wert besitzt und nicht unendlich groß ist.

Doch wie gelangte Einstein eigentlich zu seinen Folgerungen? Er startet seine Analyse mit etwas, was uns auf den ersten Blick völlig trivial erscheint. *Zeit* vergeht für ihn nicht einfach so, sondern muss mit Hilfe von *Uhren* gemessen werden. Aber auch die Innereien einer Uhr unterliegen dem Relativitätsprinzip und der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, und genau das ist der Haken.

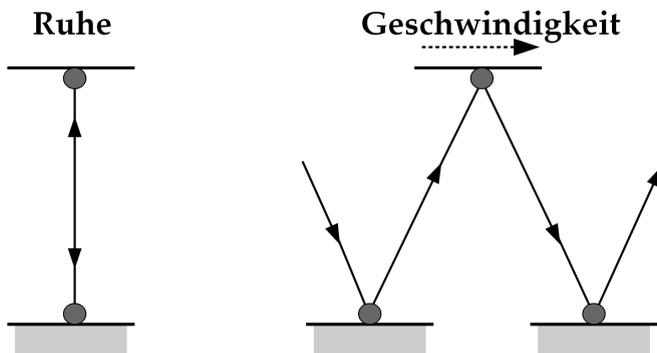
Nehmen wir zum Beispiel eine Lichtuhr, bei der ein Lichtstrahl zwischen zwei Spiegeln hin und her geworfen wird. Jedes Mal wenn der Strahl auf den unteren Spiegel trifft, soll die Uhr um eine Einheit weiter zählen. Nun hat aber der Lichtstrahl bei einer bewegten Uhr einen längeren Weg zurückzulegen und genau deshalb geht diese Uhr von einem ruhenden Beobachter aus gesehen langsamer. Dieser relativistische Effekt ist übrigens wie alle anderen absolut symmetrisch. Jeder, der

eine Uhr anschaut, die sich relativ zu ihm bewegt, wird bei genauem Hinsehen feststellen, dass seine eigene schneller geht.

Doch nicht nur bewegte Uhren laufen langsamer, auch bewegte *Längen* erscheinen kürzer. Dies liegt ebenso daran, dass auch eine Länge, zum Beispiel die Länge eines Stabes, erst einmal gemessen werden muss. Und dazu muss Licht von beiden Enden des Stabes zu einem Beobachter gelangen, wofür es wiederum Zeit benötigt. Wenn Sie jetzt denken, dass Sie sich damit noch ganz gut anfreunden können, dann kommt es jetzt noch dicker.

Wir machen folgendes Gedankenexperiment: In der Mitte eines Zuges wird ein Blitz ausgelöst und sowohl am Anfang und Ende registriert. Da sich das Blitzgerät genau in der Mitte befindet, wird ein Beobachter im Zug der festen Meinung sein, dass der Blitz zu genau der gleichen Zeit vorne und hinten ankommt. Ein anderer Beobachter jedoch, der auf einem Bahnsteig steht und den Blitz innerhalb des vorbei fahrenden Zuges wahrnimmt, sieht etwas anderes. Er wird der Überzeugung sein, dass das Licht hinten etwas früher ankommt als vorne. Denn schließlich bewegt sich das Zugende auf den Blitz zu und der Zuganfang vom Blitz weg. Wer hat nun aber recht?

Nach Einstein haben *beide* Beobachter recht, denn beide Standpunkte sind gleichberechtigt. Das heißt aber in letzter Konsequenz, dass die *Gleichzeitigkeit* von Ereignissen vom relativen Bewegungszustand der Beobachter abhängt. Im Zug erfolgt das Auftreffen der Blitze an beiden Enden gleichzeitig, vom Bahnsteig aus gesehen dagegen zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Gleichzeitigkeit wird relativ. Dabei ist es egal, ob man die Ereignisse nur mit seinen Augen beobachtet, oder mit exakten Uhren wirklich ausmisst. Der Grund ist auch hier wieder derselbe: Will man eine bewegte Uhr in einem Zug mit einer ruhenden Uhr auf einem Bahnsteig synchronisieren, so müssen dazu Lichtsignale ausgetauscht werden, die wie immer eine gewisse Zeit benötigen.



14 Eine bewegte Lichtuhr geht langsamer als eine ruhende, weil das Licht einen weiteren Weg zurücklegen muss.

Doch wirklich widersinnige Effekte schließt die spezielle Relativitätstheorie aus. Für jedes Ereignis, das die *Ursache* für ein zweites, darauf folgendes Ereignis darstellt, dreht sich diese Reihenfolge niemals um. So schnell sich ein Beobachter auch bewegen mag, das erste Ereignis wird für ihn stets vor dem zweiten geschehen. Damit bleibt das Prinzip von Ursache und Wirkung auch bei relativen Bewegungen stets erhalten. Lediglich eine Bewegung mit Überlichtgeschwindigkeit wäre in der Lage diese Gesetzmäßigkeit zu durchbrechen. Wir werden aber gleich sehen, wie die Natur diese fatalen Konsequenzen wirkungsvoll verhindert.

Zu Beginn dieses Kapitels haben wir uns die Addition von Geschwindigkeiten angesehen und uns gefragt, wie sie sich in der Nähe der Lichtgeschwindigkeit verhält. Obwohl die einfache Summe bei geringen Geschwindigkeiten in sehr guter Näherung gilt, so ist zum Beispiel  $0,5c \gg 0,5c$  nicht etwa  $1c$ , sondern nur  $0,8c$ . Doch wie lässt sich dieses Ergebnis mit dem Energieerhaltungssatz vereinbaren? Wenn sich die aufgewendete *Energie* bei unserem Steinwurf nicht in der erreichten Geschwindigkeit wiederfindet, wo ist sie denn dann geblieben? So fantastisch es auch klingen mag, sie hat sich in zusätzliche *Masse* verwandelt. Der Stein ist nicht mehr um den gesamten Energiebetrag schneller geworden, sondern nur noch zu einem Teil. Der Rest wurde dafür verwendet, dass er nun schwerer ist. Der fliegende Stein wiegt also jetzt für einen ruhenden Betrachter mehr als vorher. Genau dies ist der Mechanismus, mit dem das Erreichen der Lichtgeschwindigkeit vereitelt wird.

Jeder Körper wird um so schwerer, je dichter er an die Lichtgeschwindigkeit heran kommt. Er kann zwar weiter beschleunigt werden, wird am Ende aber nur noch minimal schneller und dafür immer massiver. Man kann sich zwar der Lichtgeschwindigkeit beliebig nähern, sie aber ähnlich wie den absoluten Temperaturnullpunkt nie erreichen. Nur ein Photon und wenige andere Elementarteilchen bewegen sich genau mit Lichtgeschwindigkeit. Wie das Licht können auch sie niemals stillstehen. Könnte man sie abbremsen, so bliebe nichts von ihnen übrig. Dies drückt man dadurch aus, dass man ihnen eine Ruhemasse von null zuschreibt. Die Ruhemasse bezeichnet dabei dasjenige Gewicht, das ein Beobachter misst, der sich gegenüber dem Teilchen in Ruhe befindet. Und da man sich gegenüber Licht nicht in Ruhe befinden kann, so besitzt es auch keine Ruhemasse.

Wir halten also fest: Hat ein Teilchen keine Ruhemasse, so muss es sich immer exakt mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Im Gegensatz dazu kann ein Teilchen mit einer Ruhemasse niemals die Lichtgeschwindigkeit erreichen. Es wird auf dem Weg dorthin aber immer schwerer. All dies konnte Einstein mit einer Formel zusammenfassen, dem berühmten

$$E = m \cdot c^2.$$

Diese Gleichung beschreibt den Zusammenhang zwischen der Gesamtenergie  $E$  eines Körpers und seiner veränderlichen Masse  $m$ . Masse lässt sich direkt in Energie verwandeln und Energie andererseits in Masse umformen.

Alle diese relativistischen Effekte sind mittlerweile nachgewiesen und haben teilweise erhebliche Auswirkungen auf unser Leben. Bei Uhren, die in schneller Bewegung auf Satelliten transportiert werden, muss die Verlangsamung der Zeit berücksichtigt werden. Ansonsten würden unsere Satellitennavigationssysteme nicht korrekt funktionieren. Ein anderes Beispiel ist die Umwandlung von Masse in Energie. Sie treibt eine Atombombenexplosion genauso wie die Energieerzeugung unserer Sonne an. Und im Kapitel 13 über Teilchen und Beschleuniger werden wir sehen, wie die Massenzunahme ganz reale Kosten verursacht.

Eines jedoch hatte Einstein mit seiner speziellen Relativitätstheorie noch nicht in den Griff bekommen, und bis zum Knacken dieser Nuss sollten noch einmal 10 Jahre vergehen. Die Schwerkraft wurde noch immer mit dem newtonschen Gravitationsgesetz beschrieben. Und deshalb breitete sich ihre Wirkung in der speziellen Relativitätstheorie noch immer mit unendlicher Geschwindigkeit aus. Die Schwerkraft war demnach schneller als das Licht, und dies durfte nicht sein.

Erinnern Sie sich noch an den Vergleich mit dem Geschehen auf einer Bühne, mit der ich die klassische Mechanik charakterisiert habe? Dort hat sich ein klar festgelegter Ablauf auf einer unveränderlichen Bühne aus Raum und Zeit abgespielt. Mit der speziellen Relativitätstheorie verliert diese Bühne nun ihre Starrheit.

#### *Spezielle Relativitätstheorie:*

Das Geschehen im Universum ist im Vorhinein in allen Einzelheiten festgelegt. Von diesem Ablauf gibt es keine Abweichungen. Die Bühne aus Raum und Zeit, aber auch die Gegenstände darauf, werden gestreckt und gestaucht, je nachdem, wie sich ein Beobachter bewegt. Ereignisse, die Ursache und Wirkung darstellen, finden immer in der richtigen Reihenfolge statt. Voneinander unabhängige Ereignisse jedoch haben eine Abfolge, die vom Bewegungszustand des Beobachters abhängt. Bewegte Uhren gehen langsamer, bewegte Maßstäbe sind kürzer, und bewegte Massen sind schwerer. Masse und Energie sind gleichberechtigt.

Wenn man dies erst einmal alles verdaut hat, erscheint es einem vielleicht rückblickend fast ein wenig seltsam, wie man bei einer so erdrückenden Beweislast noch lange an einem Äther festhalten konnte. Wie konnte dies nur passieren, obwohl sich doch der Äther jedem Nachweis entzog? Er war offensichtlich gar nicht vorhanden, denn man konnte seine Existenz selbst mit den besten Methoden nicht feststellen. Und trotzdem glaubten die Physiker an ihn.

Ich versuche einmal zu skizzieren, warum das meiner Meinung nach geschehen ist. Jeder Mensch ist das Produkt seiner Zeit und seiner Kultur. Auch Sie und ich denken in einer ganz bestimmten Sprache mit Kategorien und Begriffen, die wir normalerweise kaum je hinterfragen. Wir alle tragen eine Vorstellung von der Welt mit uns herum, die die Summe unserer Erziehung, Ausbildung und Erfahrungen ist. Mit diesem Handwerkszeug meistern wir alle, auch die Naturwissenschaftler, unser Leben.

Kein Blick auf die Welt geschieht jedoch ohne Grundannahmen. Sie sind oft so einfach, dass sich nicht einmal ausformuliert werden: Keine Welle kann sich ohne ein Medium fortbewegen. Oder scheinbar noch viel trivialer: Die Welt ist einfach da. Wir *glauben* an diese Sätze, denn wir können nicht ständig alles infrage stellen. Und genau in diesem Sinne sehen wir nur das, was wir glauben und nicht die Welt an sich. Wenn wir einen Äther benötigen, weil das unsere Glaubensgrundsätze fordern, so muss er auch vorhanden sein.

Doch sollte sich eine dieser Grundannahmen als falsch erweisen, so heißt das noch lange nicht, dass das auch von irgendjemandem sogleich erkannt wird. Es muss erst ein möglichst Unvoreingenommener auf der Bildfläche erscheinen, der dann auch noch den Mut hat, über seinen Schatten zu springen.

Wir schauen nun ein letztes Mal unserem davon fliegenden Speer hinterher, denn wir benötigen noch eine wichtige Beobachtung, die ich bisher unterschlagen habe. Das Licht des Lasers ist zwar weder schneller noch langsamer, aber es ändert seine Farbe, wenn sich der Pointer bewegt. Es unterliegt demselben Dopplereffekt, den wir von einem fahrenden Auto mit einem Martinshorn kennen. Hier ist der Ton eines auf uns zu kommenden Fahrzeugs höher als bei einem stehenden. Die Schallwellen sind verkürzt, weil sie durch die Bewegung in schnellerer Folge auf unser Ohr treffen. Bewegt sich das Martinshorn dagegen von uns weg, so sind die Schallwellen länger und der Ton tiefer.

Auch bei einer Lichtquelle, die sich auf uns zu bewegt, finden wir eine kürzere Wellenlänge. Die Farbe des Lichts ist also in Richtung Blau gewandert. Den gegenteiligen Effekt erhalten wir, wenn der Speer von uns weg fliegt. Dann ist das Licht zum Roten hin verschoben. Damit hat sich nicht nur die Wellenlänge, sondern auch die Energie des Lichts geändert. Bei unserer Reise durch das Universum werden später ebenfalls einer Rotverschiebung begegnen. Nur bewegt sich hier nicht die Lichtquelle oder der Beobachter, sondern der Raum selbst.