

3

Die Lichtgeschwindigkeit

Wenn Sie eine Lampe anschalten – wie lange braucht dann das Licht, um von dort über die beleuchteten Gegenstände bis zu Ihrem Auge zu gelangen? Galileo Galilei scheint tatsächlich versucht zu haben, diese Zeitspanne mit einem Experiment zu bestimmen. Und zwar positionierte er zwei Personen mit abgedunkelten Laternen auf zwei weit voneinander entfernten Bergkuppen. Die eine, nennen wir sie Alice, lässt ihre Laterne aufleuchten und startet zugleich eine Stoppuhr. Wenn der andere, Bob, das Licht von Alice' Laterne sieht, entfernt er die Abdeckung von seiner Laterne. In dem Moment, in dem Alice das Licht von Bobs Laterne aufleuchten sieht, stoppt sie ihre Uhr, welche dann die Zeit T anzeigt, die das Licht benötigt hat, um die Distanz D zwischen den beiden Bergkuppen einmal hin- und zurückzulaufen. Die Geschwindigkeit, mit der sich das Licht dabei bewegt hat, ist dann ganz einfach

$$c = 2D/T. \quad (3.1)$$

Ich weiß nicht, ob Galilei sich dessen bewusst war, aber es gibt bei diesem Versuchsaufbau ein Problem: Nur ein Teil der Verzögerung geht auf die Zeit zurück, die das Licht für die Strecke $2D$ benötigt hat. Der Rest entspricht der Summe

aus Bobs Reaktionszeit – der Zeit, die vergeht, während sich die Nervenpulse von Bobs Augen zu seinem Gehirn und von dort zu seinen Händen fortpflanzen, sowie der Zeit, die seine Hände dann noch brauchen, um die Abdeckung von der Laterne zu entfernen – und entsprechend der Reaktionszeit von Alice.

Dieses Problem lässt sich aber einfach und elegant umgehen. Man muss dazu nur dasselbe Experiment noch einmal ausführen, wobei aber diesmal Bob auf einem anderen Berg im Abstand $D' > D$ steht. Die Reaktionszeiten sind in beiden Fällen die gleichen, weswegen die Zunahme der zeitlichen Verzögerung, $\Delta T = T' - T$, allein von der Zunahme des Abstands $\Delta D = D' - D$ hervorgerufen wird. Sie müssen also lediglich in Gl. (3.1) die Größen ΔD und ΔT einsetzen, um den Einfluss der Reaktionszeiten von Alice und Bob zu eliminieren.

Dummerweise stellt man dann allerdings fest, dass es – überhaupt keine Verzögerung gibt, oder genauer gesagt: Alice misst mit ihrer Stoppuhr zwar in beiden Fällen eine Verzögerung, aber sie kann keinerlei Unterschied zwischen T und T' feststellen. Dafür gibt es zwei mögliche Erklärungen: Entweder braucht das Licht überhaupt keine Zeit, um die nun eingefügte zusätzliche Strecke $\Delta D = D' - D$ zurückzulegen, d. h., die Lichtgeschwindigkeit ist unendlich groß. Oder aber Bob und Alice brauchen so viel mehr Zeit, um die Lichtsignale zu verarbeiten und mit ihren Laternen zu hantieren, als das Licht zum Zurücklegen der betrachteten Strecken braucht, dass mit Galileis Versuchsaufbau die Reisezeit des Lichts einfach nicht zu messen ist. Wie Sie wahrscheinlich bereits wissen, bewegen sich Lichtpulse tatsächlich so schnell bzw. menschliche Nervensignale in solch

einem Schneckentempo, dass zwei in Sichtweite gelegene Bergkuppen viel zu nah beieinander liegen, als dass man mit Galileis Methode die Lichtgeschwindigkeit bestimmen könnte.

Dreihundert Jahre später gelang es jedoch, Galileis Idee erfolgreich auszuführen, wobei dann aber der eine Berg auf der Erde und der andere auf dem Mond stand. Der Mond ist etwa eine Lichtsekunde von der Erde entfernt, das Licht braucht also etwa zwei Sekunden, um einmal von der Erde zum Mond und zurück zu rasen. Zu diesem Zeitpunkt war der Betrag der Lichtgeschwindigkeit übrigens bereits mit anderen Methoden auf viele Nachkommastellen genau gemessen worden. Durchgeführt wurde das Experiment mit Radiowellen, die auf von Astronauten installierte Spiegelsysteme auf dem Mond gerichtet wurden. Radiowellen sind genau wie Licht, Röntgen-, Gamma- oder Handystrahlung elektromagnetische Wellen, die sich im Vakuum alle mit der gleichen Geschwindigkeit ausbreiten.

Licht ist also so schnell, dass man zur Messung seiner Geschwindigkeit entweder enorme Entfernungen betrachten oder winzigste Zeitabstände extrem genau bestimmen muss. Die erste erfolgreiche Abschätzung der Lichtgeschwindigkeit gelang mithilfe von im wahrsten Sinne des Wortes astronomischen Weglängen, als im Jahr 1676 der dänische Astronom Ole Rømer die Bewegungen der vier von Galilei entdeckten Jupitermonde untersuchte. Dabei fiel ihm auf, dass je nach der relativen Entfernung von Erde und Jupiter die Monde bis zu 10 Minuten zu früh oder zu spät von der Jupiterscheibe verfinstert wurden. Daraus schloss er, dass das Licht etwa 20 Minuten braucht, um den Durchmesser der Erdbahn zu durchlaufen, also die

Abstandsdifferenz $\Delta D = D' - D$ im obigen Beispiel. In der gegebenen Genauigkeit führt dies auf einen Wert von einigen Hunderttausend Kilometern pro Sekunde für die Lichtgeschwindigkeit.

Im Jahr 1849 gelang dem Franzosen Hippolyte Louis Fizeau die erste terrestrische Messung der Lichtgeschwindigkeit durch die präzise Bestimmung extrem kleiner Zeitdifferenzen. Stellen Sie sich eine Achse vor, an deren Enden zwei identische Zahnräder stecken, die so ausgerichtet sind, dass ein achsenparalleler Lichtstrahl durch korrespondierende Lücken in beiden Zahnrädern hindurchstrahlen kann, wenn sich die Achse nicht dreht. Wenn Sie nun die Achse und damit die beiden Zahnräder sehr schnell rotieren lassen und außerdem die Zahnräder sehr viele sehr kleine Zahn-lücken aufweisen, kann es sein, dass das Licht so „lange“ für den Weg zwischen den Zahnrädern braucht, dass sich das zweite Zahnrad eine halbe Zahn-lücke weitergedreht hat, bis das Licht dort ankommt und somit der Lichtweg blockiert ist.

Es stellte sich zwar heraus, dass für Achsen, die so kurz sind, dass sie noch ohne zu wackeln rotieren können, das Licht immer noch viel zu schnell für einen messbaren Effekt läuft. Fizeau benutzte aber den genialen Trick, mithilfe von Spiegeln einen kilometerlangen Umweg in den Lichtweg zwischen den Zahnrädern einzubauen, wodurch er schließlich einen Schätzwert für die Lichtgeschwindigkeit erhielt, der gut mit den Ergebnissen von Rømer übereinstimmte.

Heute haben wir sehr ausgefeilte Methoden, um die Größe der Lichtgeschwindigkeit zu bestimmen. Anfang der 1980er Jahre betrug der beste Messwert 299.792.458 Meter pro Sekunde (m/s). Hieran wird sich auch bis auf

Weiteres nichts mehr ändern, denn 1983 legte man die Größe der Lichtgeschwindigkeit bei der Neudefinition der Einheit Meter auf exakt diesen Zahlenwert fest. Ein Meter war zuvor der Abstand zweier Markierungen auf einem in Paris sorgsam aufbewahrten Platin-Iridium-Stab. Seitdem ist es die Strecke, die Licht während einer 299.792.458-stel Sekunde zurücklegt. Damit ist die Einheit der Länge auf die Einheit der Zeit zurückgeführt. Sie denken jetzt möglicherweise, dass durch diese Definition weitere, verbesserte Messungen der Lichtgeschwindigkeit überflüssig würden. Dem ist aber nicht so, denn mit solchen Präzisionsexperimenten kann man nun statt der Lichtgeschwindigkeit die Länge eines Meters genauer und genauer bestimmen. Die Bedeutung dieser Messungen ist also die gleiche geblieben, geändert hat sich nur, was wir daraus ableiten.

Die Tatsache, dass der Wert der Lichtgeschwindigkeit gerade 299.792.458 m/s beträgt, hat zwei zufällige, aber nützliche Konsequenzen:

Zum einen liegt der Zahlenwert fast genau bei 300.000 km/s bzw. $3 \cdot 10^8$ m/s. Physiker rechnen daher gerne mit dem einfachen gerundeten Wert – so gerne, dass einmal das Ergebnis eines teuren Hochpräzisionsexperiments ruiniert wurde, weil jemand beim Auswerten mit der Zahl 3 anstelle von 2,9979... gerechnet hatte.

Zum anderen ist die angelsächsische Längeneinheit Foot (abgekürzt ft, auf Deutsch Fuß) etwa einen Drittel Meter lang, also ist das Licht rund eine Milliarde Feet pro Sekunde bzw. einen „Sekundengigafoot“ schnell, oder auch einen Foot pro Nanosekunde (ft/ns). Dies ist weniger exotisch, als es zunächst klingen mag: Die Taktrate eines modernen PC-Mikroprozessors liegt im Bereich einiger Gigahertz,

dies entspricht einer Periodendauer von etwas unter einer Nanosekunde. Wenn Sie also möchten, dass während eines Prozessortakts Informationen zwischen Komponenten Ihres Computers ausgetauscht werden sollen, dann sollten Sie tunlichst darauf achten, dass sich diese Komponenten deutlich weniger als einen Foot, also ca. 30 cm, voneinander entfernt befinden. Denn es kann, wie wir später sehen werden, keine Information schneller als Licht übertragen werden, also kommt innerhalb einer Taktperiode des Prozessors von z. B. 0,5 ns keine Information weiter als einen halben Foot (15 cm). Auch für das Satellitennavigationssystem (GPS) und ähnliche Systeme spielen Foot und Nanosekunde eine Rolle: Die Satelliten übertragen ihre Positionssignale einmal pro Nanosekunde, daher sind diese Signale einen Foot voneinander entfernt, wenn sie die Erdoberfläche erreichen. Insofern ist ein Foot ein Maß für die Ortsauflösung des Systems.

Beim Umgang mit relativistischen Vorgängen bietet es sich an, Geschwindigkeiten in Einheiten anzugeben, in welchen die Lichtgeschwindigkeit einen besonders übersichtlichen („runden“) Wert annimmt. Wäre der Wert eines (US-) Foot im Jahr 1959 nicht auf exakt 30,48 cm, sondern auf exakt 29,979.245.8 cm festgelegt worden (nur 1,64 % weniger), dann wäre das Licht *exakt* 1 ft/ns schnell. Dies ist genau das, was wir brauchen, weswegen ich für den Rest dieses Buchs die Einheit Foot wie folgt umdefinieren werde:

Künftig soll mit 1 F die Strecke gemeint sein, welche das Licht in einer Nanosekunde zurücklegt.¹³ Damit ist 1 F eine Lichtnanosekunde und eine Nanosekunde ein „Lichtfoot“. Wenn Sie es empörend finden, die Einheit Foot in dieser Weise umzudefinieren (wie es ein Gutachter eines Papers getan hat, das ich einmal beim *American Journal of Phy-*

sics eingereicht habe), dann nennen Sie einfach die Länge 0,299.792.458 m einen Phoot¹⁴ und lesen Sie immer „Phoot“, wenn ich im Folgenden „Foot/Fuß“ schreibe.

Zum Vergleich mit geringeren Geschwindigkeiten hilft es manchmal, 1 F/ns als 1000 F/ μ s aufzufassen. Da die Schallgeschwindigkeit in gewöhnlicher Luft etwa 300 m/s, also 1000 F/s beträgt, ist das Licht somit eine Million Mal schneller als der Schall.

Es ist ein bisschen merkwürdig, um nicht zu sagen äußerst außergewöhnlich, die Geschwindigkeit des Lichts im Vakuum einfach so auf 299.792.458 m/s festzulegen. Normalerweise stellt sich, wenn man eine Geschwindigkeit derart exakt festlegt – oder wenn man überhaupt von irgendeiner Geschwindigkeit spricht –, immer die Frage „Geschwindigkeit relativ zu was?“. Schließlich haben wir in den beiden vorangegangenen Kapiteln deutlich genug gemacht, dass die Geschwindigkeit eines Objekts von dem Bezugssystem abhängig ist, in welchem sie gemessen wird. Ein Ball, den Alice in einem gleichförmig bewegten Zug wirft, hat eine ganz andere Geschwindigkeit bezüglich des Zugs als gegenüber den Schienen. Beim Licht gibt es zwei naheliegende Antworten auf die Frage „Geschwindigkeit relativ zu was?“:

Die erste naheliegende Antwort

Die Lichtgeschwindigkeit beträgt 299.792.458 m/s relativ zur jeweiligen Lichtquelle. Wenn Sie eine Taschenlampe einschalten, hat das von ihr erzeugte Licht die Geschwindigkeit 299.792.458 m/s bezüglich der Taschenlampe. Wie sollte es auch anders sein? In ganz ähnlicher Weise meint man mit der Geschwindigkeit einer Gewehrkuugel ja auch

immer die Geschwindigkeit, mit der sie sich von dem Gewehr entfernt, aus dem sie abgeschossen wurde (und nicht etwa die Geschwindigkeit bezüglich eines Düsenjets, der die Kugel neben sich herfliegen sieht).

Diese durchaus vernünftige Antwort steht im Widerspruch zu unserem derzeitigen Verständnis des elektromagnetischen Charakters von Lichtwellen. Im 19. Jahrhundert kam es zur großen Vereinheitlichung der Gesetze von Elektrizität und Magnetismus, die in den berühmten Gesetzen des schottischen Physikers James Clerk Maxwell gipfelte. Maxwells Gleichungen sagen voraus, dass ein elektrisch geladenes Teilchen, das regelmäßig hin- und herschwingt (wie dies z. B. ständig im Draht einer Glühbirne geschieht), Strahlungsenergie aussenden muss, die sich mit einer Geschwindigkeit von etwa $300.000.000 \text{ m/s}$ ausbreitet. Da diese Geschwindigkeit numerisch exakt mit der Lichtgeschwindigkeit übereinstimmt, war es nur natürlich, Licht als eine spezielle Form dieser sog. elektromagnetischen Strahlung anzusehen. Die Schwingungsfrequenz der Ladungen ist im Falle von sichtbarem Licht mit mehreren 100 Billionen Schwingungen pro Sekunde ausgesprochen hoch. Der entscheidende Punkt ist aber nun, dass aus Maxwells Gleichungen ganz eindeutig hervorgeht, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Strahlung *nicht* von der Geschwindigkeit der Strahlungsquelle abhängt (und auch nicht von dem System, in welchem die Geschwindigkeit der Strahlungsquelle gemessen wird). Maxwell zufolge ist die Lichtgeschwindigkeit unabhängig davon, ob sich die schwingenden Ladungen in Richtung der Lichtausbreitung, in die entgegengesetzte Richtung oder gar nicht bewegen.

Weiterhin wird die Regelmäßigkeit bestimmter astronomischer Bewegungen nicht davon beeinflusst, ob die Lichtquelle, welche uns diese Phänomene beobachten lässt, sich von uns entfernt oder auf uns zuläuft. Es gibt also sowohl theoretische als auch astronomische Belege dafür, dass die Lichtgeschwindigkeit unabhängig von der Geschwindigkeit der jeweiligen Lichtquelle ist.

Die zweite naheliegende Antwort

Die Lichtgeschwindigkeit hat nur im „Vakuum“, also in einem Medium, das weder Luft noch andere Stoffe enthält, den Wert $299.792.458 \text{ m/s}$. Tatsächlich kann die Lichtgeschwindigkeit in dichten transparenten Medien wie Wasser oder Glas um ein Viertel oder noch mehr unter dem Vakuumwert liegen. Historisch nannte man das Medium, in welchem die Lichtgeschwindigkeit den oben genannten Wert hat, den „Äther“. Darunter kann man sich den irreduziblen Rest vorstellen, der übrigbleibt, wenn aus einem Raumgebiet alles entfernt wurde, was sich nur entfernen lässt.

Wir denken uns jetzt also das Licht nicht mehr analog zu einer von einem Gewehr abgefeuerten Kugel, sondern analog zum Schall, d. h. zu Luftwellen. Wie die Lichtgeschwindigkeit hängt auch die Schallgeschwindigkeit nicht davon ab, wie schnell sich eine Schallquelle bewegt, sondern nur von den Eigenschaften der Luft (Druck, Temperatur, ...), deren Schwingungen den Schall darstellen und ihn transportieren. Wenn Licht analog dazu aus sich durch den Raum ausbreitenden Schwingungszuständen eines Äther genannten Mediums besteht, dann sollte seine Geschwindigkeit immer bezüglich dieses Mediums definiert werden.

Da die Erde die Sonne mit einem recht flotten Tempo von 30 km/s umrundet, ändert sich ihre Bewegungsrichtung bezüglich des Fixsternhintergrunds im Jahresverlauf erheblich. Darüber hinaus läuft das gesamte Sonnensystem in etwa 200 Millionen Jahren einmal um das Zentrum der Milchstraße – es wäre somit ein mehr als merkwürdiger Zufall, wenn sich ausgerechnet die Erde gerade in Ruhe gegenüber dem Eigensystem des Äthers befinden würde. Vielmehr ist eine Art „Äther(fahrt)wind“ zu erwarten, je nachdem, ob wir uns gerade auf den Äther zu- oder von ihm wegbewegen. Dementsprechend müsste auch die Lichtgeschwindigkeit, die ja bezüglich des Äthers konstant sein muss, auf der Erde schwanken, je nachdem, ob sich das Licht mit der Ätherwindrichtung oder senkrecht dazu bewegt. Verschiedene Versuche, diese Richtungsabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit zu messen, schlugen jedoch fehl, am berühmtesten ist sicherlich das Michelson-Morley-Experiment aus den 1880er Jahren. Alle diese Versuche zeigten, dass wenn die Lichtgeschwindigkeit gegenüber einem ätherartigen Medium fix ist, die Erde trotz ihrer komplexen Bewegungen bezüglich der Zentren von Sonnensystem und Milchstraße eine unwahrscheinlich niedrige Relativgeschwindigkeit dem Äther gegenüber haben müsste. Hartnäckige Verteidiger der Ätherhypothese argumentierten, dass die Erde auf irgendeine Weise den sie umgebenden Teil des Äthers mit sich ziehen könnte. Dann aber müssten sich die scheinbaren Positionen weit entfernter Sterne oder Galaxien am Himmel in charakteristischer Weise ändern – was wiederum niemals beobachtet wurde.

Die Bedeutung des Michelson-Morley-Experiments für die historische Entwicklung der Relativitätstheorie ist ver-

schiedentlich infrage gestellt worden. Einstein erwähnt es zwar 1905 in seiner berühmten Arbeit, aber nur einmal und auch nur quasi nebenbei: „Beispiele ähnlicher Art, sowie die *mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum ‚Lichtmedium‘* zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß (...)“¹⁵ – kaum mehr als eine Randnotiz. Die experimentellen Bemühungen von Michelson und anderen mussten genannt werden, denn hätten sie erfolgreich gezeigt, dass es auf der Erde eine signifikante Richtungsabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit gibt, wäre die Relativitätstheorie ein totgeborenes Kind geblieben.

Die „Beispiele ähnlicher Art“, die Einstein als die wesentliche Motivation, die Natur der Zeit infrage zu stellen, angab, sind alle Beispiele für die Tatsache, dass die elektrischen und magnetischen Erscheinungen der Materie alle konsistent mit Einsteins Relativitätsprinzip sind – entgegen der weitverbreiteten Ansicht, es gebe ein bevorzugtes Inertialsystem zur Beschreibung elektromagnetischer Vorgänge, nämlich das Ruhesystem des Äthers. Allgemein dachte man damals, die Maxwell-Gleichungen gälten ausschließlich in diesem Bezugssystem. Der entscheidende Punkt war für Einstein, dass eine große Zahl von elektromagnetischen Vorgängen in anderen Bezugssystemen exakt gleich abzu- laufen schienen wie im Äthereignissystem. Dies führte ihn auf das Postulat, dass die Gesetze des Elektromagnetismus in jedem beliebigen Inertialsystem streng gültig sind. Wenn diese Annahme korrekt ist, dann wird sich die „Einführung eines ‚Lichtäthers‘ (...) insofern als überflüssig erweisen“, als es keine Möglichkeit gäbe, anhand irgendeines elektromagnetischen Vorgangs das Ruhesystem des Äthers von irgendeinem anderen Inertialsystem zu unterscheiden. Es ist

genau dieses Postulat – dass das aus der Newton'schen Mechanik bekannte Relativitätsprinzip ebenso für den Elektromagnetismus gilt –, welches Einstein das „*Prinzip der Relativität*“ genannt hat.

Wenn nun also die Maxwell'schen Gleichungen in jedem beliebigen Inertialsystem gelten und wenn sie vorhersagen, dass elektromagnetische Strahlung und insbesondere Licht sich mit einer konstanten, von der Bewegung der Lichtquelle unabhängigen Geschwindigkeit ausbreiten, dann muss sich Licht in jedem Inertialsystem mit dieser konstanten Geschwindigkeit ausbreiten. Die Antwort auf die obige Frage „Geschwindigkeit relativ zu was?“ lautet also demnach: „relativ zu irgendeinem beliebigen Inertialsystem“. In jedem Inertialsystem beträgt die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum schlicht und ergreifend 299.792.458 m/s, egal wie schnell sich die Lichtquelle bewegt und egal aus welchem Inertialsystem heraus die Lichtausbreitung beobachtet wird. Wenn Sie beispielsweise mit einer Rakete dem Licht mit (immerhin) 10 km/s hinterherrsagen, wird sich die Geschwindigkeit, mit der sich das Licht von Ihrer Rakete entfernt, nicht auf 299.782 km/s verringern. Es entfernt sich stattdessen immer noch mit 299.792 km/s von Ihnen. Ich möchte an dieser Stelle betonen, dass nur die Lichtgeschwindigkeit im *Vakuum* diese bemerkenswerte Eigenschaft besitzt. Die Lichtgeschwindigkeit in Wasser hängt *durchaus* davon ab, wie schnell Sie sich relativ zum Wasser bewegen, allerdings auf eine etwas kompliziertere Art und Weise, als man zunächst denken würde, wie wir noch sehen werden. In der Tat ist hier das Licht gar nicht der entscheidende Punkt, sondern diese spezielle Geschwindigkeit $c = 299.792.458$ m/s. Wenn jemand ohne weitere

Angaben „Lichtgeschwindigkeit“ sagt, meint er fast immer diesen Wert, also die Lichtgeschwindigkeit c in Vakuum.

Wie kann das sein? Wie kann es eine besondere Geschwindigkeit c geben mit der Eigenschaft, dass was auch immer sich so schnell bewegt, in jedem beliebigen Inertialsystem diese Geschwindigkeit besitzt? Diese Tatsache, bekannt als das *Prinzip von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit*, ist hochgradig kontraintuitiv. Eigentlich ist „kontraintuitiv“ noch viel zu milde ausgedrückt: Es erscheint jedem „normal“ denkenden Mensch komplett unmöglich. Eines der wichtigsten Anliegen dieses Buchs ist es, dieses Gefühl der Unmöglichkeit zu beseitigen und durch die Einsicht zu ersetzen, dass es in der Tat vollkommen vernünftig ist.

An dieser Stelle möchte ich eine kleine Abschweifung zur Nomenklatur einschieben: Heute nennt praktisch jeder die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c , etwa in der mehr als berühmten Gleichung „ $E = mc^2$ “, auf welche wir in Kap. 11 ausführlich eingehen werden. Früher dachte ich, dass das „ c “ für „konstant“¹⁶ steht und daran erinnern soll, dass sich der Wert beim Übergang zwischen zwei Inertialsystemen nicht ändert. Vielleicht steht es aber auch nur für das lateinische Wort für Geschwindigkeit, *celeritas*, von welchem z. B. das englische „acceleration“ (Beschleunigung) abgeleitet ist.

Um zu verstehen, warum die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit letztlich doch sinnvoll ist, müssen wir sehr genau untersuchen, was es genau bedeutet, „eine Geschwindigkeit“ bezüglich eines bestimmten Bezugssystems zu haben. Wenn wir sagen, dass sich ein Objekt gleichförmig mit einer gewissen Geschwindigkeit v bewegt, meinen wir, dass es innerhalb einer gegebenen Zeit T die Distanz

D zurücklegt und dass zwischen diesen drei Größen die Beziehung $D/T = v$ besteht. Dies führt uns darauf, näher zu betrachten, wie man eigentlich solche Abstände und solche Zeitspannen misst.

Es sei zunächst einmal P eine korrekte Prozedur, mit der man Zeit- und Längenmessungen und damit auch die Bestimmung von Geschwindigkeiten in einem gegebenen Inertialsystem durchführen kann. Wir lassen nun Bob diese Prozedur P im Bezugssystem einer Raumstation ausführen, um die Geschwindigkeit eines Lichtpulses zu bestimmen, der in die Tiefe des Weltraums entschwindet. Wenig überraschend erhält er als Ergebnis ungefähr 299.792 km/s. Nehmen wir nun an, Alice fliege zügig dem Licht mit einer Geschwindigkeit hinterher, die Bob mit seiner Prozedur als 792 km/s misst. Bob erkennt dann korrekterweise, dass in jeder Sekunde das Licht sich 299.792 km von ihm entfernt, während Alice in dieser Zeit 792 km in derselben Richtung zurücklegt. Demzufolge nimmt der von Bob gemessene Abstand zwischen Alice und dem Lichtpuls pro Sekunde nur um 299.000 km zu. Wenn jedoch Alice mit derselben Prozedur P im Bezugssystem ihrer Rakete Geschwindigkeiten, Zeiten und Abstände ermittelt, findet sie, dass die Geschwindigkeit des Lichts 299.792 km/s beträgt, sich der Lichtpuls also in ihrem Bezugssystem in jeder Sekunde 299.792 km und nicht bloß 299.000 km von ihr entfernt.

Wie können wir diesen Widerspruch auflösen? Offenkundig muss es einen Unterschied zwischen den Messungen von Alice und Bob geben. Aber verwenden Sie nicht beide exakt dieselbe zertifizierte Prozedur P ? Ja, aber die Frage ist, was hier „exakt dieselbe“ bedeutet. Wenn Bob

beispielsweise Uhren benutzt, die sich im Bezugssystem seiner Raumstation in Ruhe befinden, dann verwendet Alice, wenn sie nach derselben Prozedur P vorgeht, Uhren, die sich bezüglich *ihres* Bezugssystems, d. h. ihrer Rakete, in Ruhe befinden. Somit sind in Bobs System zwar seine Uhren in Ruhe, Alice' Uhren hingegen in Bewegung – in Alice' System ist es umgekehrt: Ihre Uhren ruhen, Bobs dagegen bewegen sich. Ähnlich verhält es sich mit den Metermaßen (Geodreiecken, Zollstöcken, ...), mit denen Alice und Bob Längen messen. Der gar nicht so komplizierte, aber leicht zu übersehende Knackpunkt ist, dass Bobs Messprozedur, *wie sie in seinem Bezugssystem beschrieben wird*, exakt mit der Prozedur von Alice, *beschrieben in ihrem Bezugssystem*, übereinstimmen muss. Dagegen ist Alice' Messverfahren, wenn man es von Bobs System aus beschreibt, *nicht* das gleiche wie Bobs Verfahren in Bobs System.

Es ist dieser kleine, aber feine Unterschied, mit dem sich sowohl Bob als auch Alice auf eine vollkommen rationale Weise die scheinbaren Diskrepanzen zwischen den Messwerten erklären können. Die Tatsache, dass Alice und Bob in unterschiedlichen Bezugssystemen beide exakt dieselbe Geschwindigkeit für denselben Lichtpuls messen, erscheint nur dann paradox, wenn Sie einige nicht hinterfragte Annahmen über die Beziehung zwischen den von Alice und Bob verwendeten Uhren und Längenmaßen machen. Vor 1905 ging man implizit von den folgenden drei Annahmen aus:

1. Das Verfahren, mit dem Alice die Uhren in ihrem Bezugssystem synchronisiert („stellt“), führt dazu, dass sie dieselbe Zeit bzw. dieselben Zeitspannen anzeigen wie

die Uhren, die Bob in seinem Bezugssystem nach demselben Verfahren synchronisiert hat. (Auch hier bedeutet „dasselbe Verfahren“ wieder, dass Bobs Vorgehen in seinem System genauso beschrieben wird wie Alice' Vorgehen in dem ihren.)

2. Die Taktrate einer Uhr (bei einer Pendeluhr wäre das die Pendelfrequenz), die Bob bezüglich seines Bezugssystems misst, ist unabhängig davon, wie schnell sich diese Uhr relativ zu Bobs Bezugssystem bewegt.
3. Die von Bob in seinem Bezugssystem gemessene Länge eines Metermaßes (Geodreiecks, Zollstocks, ...) ist unabhängig davon, wie schnell sich dieses Metermaß relativ zu Bobs Bezugssystem bewegt.

Sollte sich auch nur eine dieser Annahmen als falsch erweisen, müssen wir das in Kap. 2 ausführlich behandelte nichtrelativistische Additionstheorem für Geschwindigkeiten modifizieren, also die Regel, die angibt, wie sich die Geschwindigkeit eines Objekts ändert, wenn man das Bezugssystem wechselt, bezüglich dessen die Geschwindigkeit gemessen wird. Heute wissen wir, dass sogar *alle drei* Annahmen nicht zutreffen. Die Spezielle Relativitätstheorie liefert uns quantitative Aussagen über die hieraus folgenden Abweichungen von Messergebnissen. Durch geeignete Korrekturterme erhält man daraus ein einfaches und kohärentes Bild von räumlichen und zeitlichen Messungen, das gänzlich mit der Existenz einer besonderen, invarianten Geschwindigkeit in Einklang steht, die in allen Inertialsystemen gleich ist und „zufällig“ derjenigen des Lichts im Vakuum entspricht.

Wir werden den traditionellen (und einfachsten) Weg wählen, um zu diesem Bild zu gelangen, nämlich genau wie Einstein zunächst einmal als Arbeitshypothese akzeptieren, dass in jedem beliebigen Inertialsystem jede Messprozedur, welche die Vakuumlichtgeschwindigkeit korrekt bestimmt, den Wert $299.792.458 \text{ m/s}$ ergeben *muss*. Wir werden mit-hin die seltsame Tatsache schlucken, dass wenn Alice und Bob beide die Geschwindigkeit desselben Lichtpulses mes-sen, sie beide $299.792.458 \text{ m/s}$ herausbekommen, selbst wenn sich Alice, von Bob aus gesehen, mit ihren Mess-instrumenten in dieselbe Richtung wie das Licht bewegt. Indem wir diese seltsame Tatsache vorläufig hinnehmen und darauf bestehen, dass das Relativitätsprinzip unter allen Umständen gültig bleiben muss, werden wir exakt *herleiten* können, auf welche Weise die drei obigen nichtrelativis-tischen Annahmen über bewegte Uhren und Maßstäbe modifiziert werden müssen. Ist dies erst einmal gelungen und ist die korrekte Form der drei Annahmen gefunden und verstanden, wird die seltsame Tatsache ihre Seltsamkeit verloren haben. Und nicht nur das, wir werden auch ein so-lides Verständnis für die von Einstein entdeckten neuen und wunderbaren Raffinessen in der Natur der Zeit entwickelt haben.

Diese eine bemerkenswerte Eigenschaft des Lichts – nämlich dass seine Geschwindigkeit nicht vom Bezugssys-tem abhängt, von dem aus sie gemessen wird – nennt man heute das *Prinzip von der Konstanz der Lichtgeschwindig-keit*. Man kann sagen, dass die Spezielle Relativitätstheorie nur auf zwei fundamentalen Prinzipien beruht: dem Re-lativitätsprinzip und dem Prinzip von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. In seiner großen Arbeit aus dem Jahr

1905 benutzte Einstein nicht das Wort *Prinzip* für diesen zweiten grundlegenden Sachverhalt, so wie er das bei dem ersten durchaus tat. Er bezeichnete beide Grundaussagen als *Voraussetzungen*; die zwei Aussagen fasste er so, dass Licht sich im leeren Raum mit einer Geschwindigkeit ausbreitet, die unabhängig von der Geschwindigkeit des emittierenden Körpers ist. Dies ist gleichbedeutend mit dem zweiten Prinzip, wenn es mit dem ersten verbunden wird, welches Einstein als das Postulat formulierte, dass das Konzept der absoluten Ruhe im Elektromagnetismus genauso wenig Bedeutung hat wie in der Newton'schen Mechanik.

Wenn Sie sich für die Originalarbeit interessieren¹⁷ und wissen möchten, wie Einstein das Problem angegangen ist, können Sie sich den Text seiner Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“, in der er sein Relativitätsprinzip erstmals formuliert, aus dem Internet herunterladen – geben Sie einfach in der Suchmaschine Ihrer Wahl den Titel der Arbeit ein (alle von mir verwendeten Zitate kommen von den ersten eineinhalb Seiten).

<http://www.springer.com/978-3-662-47151-7>

Es ist an der Zeit

Einsteins Relativitätstheorie verstehen

Mermin, N.D.

2016, XXIV, 347 S. 56 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-662-47151-7