

Vorwort

Die absolute, wahre und mathematische Zeit fließt aus ihrer eigenen Natur heraus, gleichmäßig und ohne Beziehung zu irgendetwas, das ihr äußerlich wäre.

Isaac Newton

My time is your time.

Rudy Vallee

... schließlich erschien mir die Zeit selbst suspekt zu sein.

Albert Einstein

Im Jahr 2005 jährte sich die Veröffentlichung von Albert Einsteins Spezieller Relativitätstheorie zum hundertsten Mal. Vierzig Jahre zuvor, also zum 60-jährigen Jubiläum, war ich als frischgebackener Physikdozent an der Cornell University zu der Überzeugung gekommen, es sei an der Zeit, die Relativitätstheorie in das Highschool-Curriculum aufzunehmen. Dies lässt sich überraschenderweise innerhalb eines Kurses in elementarer Algebra oder ebener Geometrie bewerkstelligen – mehr mathematisches Handwerkszeug braucht man für ein volles Verständnis des Themas gar nicht. Daher konzipierte ich einen Kurs über

Spezielle Relativität für eine Gruppe von Highschool-Lehrern, die damit gut zurechtzukommen schienen.

Die Spezielle Relativitätstheorie ist ideal für den Unterricht an High Schools geeignet, denn sie bietet nicht nur wirklich erstaunliche Anwendungen der elementaren Schulmathematik, sondern es besitzt auch jeder von uns (möglicherweise ohne sich dessen bewusst zu sein) ein intuitives Verständnis für die Relativität der Natur. Es geht um die Zeit – was könnte einem vertrauter sein? Was die Sache so faszinierend macht, ist, dass sich dank der Relativitätstheorie etwas so Vertrautes wie die Zeit als in Wirklichkeit so schockierend andersartig herausstellt; anders als alles, was man sich bis 1905 darunter hatte vorstellen können. Wir wissen nun, dass die beiden ersten Zitate zu Beginn dieses Vorworts komplett falsch sind. Zu verstehen, warum und inwiefern Newton und Rudy Vallee ein falsches Verständnis vom Wesen der Zeit hatten, ist ein wesentlicher Teil unserer Allgemeinbildung. Das dritte Zitat, in dem Einstein den Schlüssel zur Lösung dieses großen physikalischen Rätsels der vorletzten Jahrhundertwende so wunderbar auf den Punkt bringt, stammt aus einem Gespräch, das der Physiker und Wissenschaftshistoriker Robert S. Shankland mit Einstein Anfang der 1950er Jahre führte, wenige Jahre vor dessen Tod 1955.¹

Trotz der guten Gründe, die dafür sprechen, wurde die Spezielle Relativitätstheorie in den letzten 40 Jahren nicht in die Lehrpläne der High Schools aufgenommen.² Das Einzige, was von meinem heroischen Kampf gegen die Windmühlen übrig blieb, war ein Buch, das 1968 auf Englisch unter dem Titel *Space and Time in Special Relativity* erschien und bis heute erhältlich ist.³ Obwohl ich es eigentlich für

Highschool-Schüler geschrieben hatte, ist es in den letzten vier Jahrzehnten wohl nur selten in Schülerkreisen aufgetaucht. Stattdessen habe ich es lange Zeit an der Cornell University in Relativitätstheorie-Kursen für Nichtphysiker benutzt.

Während ich im Lauf der Jahre Studierenden die Relativitätstheorie zu erklären versuchte, wurde ich immer unzufriedener mit meinem Buch. Obwohl ich es weiterhin jedem anderen Buch auf seinem elementaren mathematischen Niveau vorzog, wurde mir klar, dass es höchstens den berühmten Einäugigen unter den Blinden abgab. In den 1990er Jahren habe ich schließlich aufgehört, es als Lehrbuch zu empfehlen und mich stattdessen auf das Vorlesungsskript verlassen, das ich inzwischen für meine Cornell-Nichtphysiker ausgearbeitet hatte. Während meiner gesamten Lehrtätigkeit wurde das Skript kontinuierlich umgestellt und überarbeitet – als Reaktion auf die Schwierigkeiten und Missverständnisse, die sich in unzähligen Gesprächen mit klugen, verwirrten Studierenden auftaten.

Der visionäre Jungdozent von vor 40 Jahren steht nun vor der Rente, und dieses neue Buch über die Spezielle Relativitätstheorie ist im Wesentlichen die aktuelle Fassung meines Vorlesungsskripts. Ich habe keine Zweifel, dass dieses Skript sich auch weiter ständig verbessern würde, wenn ich weiter im Austausch mit all diesen wunderbar gescheiterten, offenen, kritischen Cornell-Studenten stünde, die geholfen haben, es auf den jetzigen Stand zu bringen. Doch ohne die Hilfe dieser Quelle beständiger Inspirationen und Überraschungen würde weiteres Herumfeilen an meinen Notizen die Sache eher schlechter als besser machen. Es ist an der Zeit, noch einmal ein Buch zu schreiben.

Zwischen 1968 und 2005 habe ich viel darüber gelernt, wie man die Spezielle Relativitätstheorie erklären sollte. Eine didaktische Entdeckung war dabei besonders wertvoll. Jeder, der dieses Thema verstehen will, muss in der Lage sein sich vorzustellen, wie Ereignisse, etwa auf einem Bahnhof, aus der Sicht eines Passagiers in einem (geradlinig-gleichförmig) durchfahrenden Zug beschrieben werden, und genauso, wie Ereignisse in diesem Zug aus der Sicht des Aufsichtspersonals auf dem Bahnsteig beschrieben werden. Ohne die Fähigkeit, korrekt und souverän zwischen diesen zwei Sichtweisen hin- und herzuwechseln, kann man nicht einmal beginnen, ein rudimentäres Verständnis für unser Thema zu entwickeln. Doch alle einführenden Bücher über die Spezielle Relativitätstheorie, einschließlich meines eigenen von 1968, setzen dies als gegeben voraus und wenden diese ungewohnte, nicht trainierte und oft gar nicht vorhandene Kompetenz sofort auf hochgradig kontraintuitive Phänomene an.

Wenn man Relativität erklären möchte, führt dieser Prozess oft zu Beschreibungen aus zwei verschiedenen Perspektiven, die einander (auf den ersten Blick) komplett zu widersprechen scheinen. Im Angesicht eines scheinbaren Paradoxons gehen Menschen, die noch nie zuvor mit der Transformation zwischen Bahnhofsperspektive und Zugperspektive zu tun hatten, aus gutem Grund davon aus, dass sie dabei irgendetwas falsch gemacht haben müssen. Statt zu versuchen, das Paradoxon als ein nur scheinbares aufzulösen, verlieren sie den Mut und das Vertrauen in die analytische Methode, die sie dort hineinbugsiert hat.

In dieser Hinsicht ist die Didaktik des Standardzugangs zur Relativitätstheorie furchtbar. Man führt eine so wesent-

liche wie fremdartige Methode – die Transformation zwischen „Bezugssystemen“ – ein, indem man sie sofort auf äußerst ungewöhnliche und schwer zu verstehende Fälle loslässt. Für mich war die entscheidende Lektion aus dem Unterrichten von Generationen von Studenten im Grundstudium, von denen dazu keiner eine Naturwissenschaft als Hauptfach belegt hatte, dass man die Transformation zwischen Bezugssystemen an ganz gewöhnlichen, intuitiv zu erfassenden Beispielen einführen muss. Es gibt viele Möglichkeiten, diese Fähigkeit behutsam zu entwickeln, und man kann eine Menge Dinge dabei lernen, die überhaupt nicht selbstverständlich, wenn auch niemals paradox sind. Darum ist genau dies das Thema von Kap. 1 des vorliegenden Buchs, wo wir einige einfache Fragen über kollidierende Objekte untersuchen. Obwohl man so gut wie nie über solche „nichtrelativistischen“ Vorgänge als Vorbereitung auf „relativistische“ Diskussionen spricht, bin ich mittlerweile überzeugt, dass das unabdingbar ist, wenn man das Thema Leuten ohne formalen naturwissenschaftlichen Background erklären möchte. Eine Einführung in die Relativitätstheorie mit einfachen Stoßprozessen zu beginnen, hat noch den zweiten Vorteil, dass man diese Prozesse später ganz zwanglos zur Erklärung von „ $E = mc^2$ “ benutzen kann.

Eine weitere Sache, die ich seit 1968 gelernt habe, ist, wie wichtig es ist herauszustellen, dass sich nicht nur Objekte mit Lichtgeschwindigkeit sehr seltsam verhalten, sondern dass Objekte, deren Geschwindigkeit geringer, aber noch vergleichbar mit der Lichtgeschwindigkeit ist, ganz genauso seltsame Dinge machen. Das Merkwürdige an einer Bewegung mit Lichtgeschwindigkeit ist nur ein Spezialfall der Merkwürdigkeit von jeglicher Bewegung, welche allerdings

erst bei extrem hohen Geschwindigkeiten wirklich zutage tritt. Diese allgemeinere Seltsamkeit lässt sich in einer elementaren, aber exakten Regel zum Ausdruck bringen, die man bereits sehr früh formulieren kann und sollte. Ich werde dies in Kap. 4 tun, und zwar mithilfe eines überraschend einfachen Gedankenexperiments, das in meinem 1968er-Buch als Übungsaufgabe erschien. Als mir klar wurde, dass anscheinend bis dahin noch niemand auf diese Argumentation gekommen war, publizierte ich meine Übungsaufgabe (und ihre Lösung) im *American Journal of Physics* (1983). In der Folge merkte ich dann, dass diese Idee eine ganz zentrale Rolle in der Didaktik der Relativitätstheorie spielen sollte. Sie hilft bei der Einsicht, dass viele Tricks mit Lichtsignalen, die bei der Bestimmung der Natur der Zeit eine so wesentliche Rolle zu spielen scheinen, tatsächlich auch mit jedem anderen gleichförmig bewegten Gerät funktionieren, das Signale von hier nach da übertragen kann.

Die Bedeutung eines weniger unorthodoxen Aspekts meines didaktischen Konzepts hat Einstein von Anfang an verstanden, sie wurde aber in späteren Werken (auch in meinem Buch von 1968) tendenziell unterschätzt. Und zwar geht es darum, dass es allein eine Frage der Konvention ist, ob zwei Ereignisse an verschiedenen Orten gleichzeitig sind oder nicht. Dass die Gleichzeitigkeit von Ereignissen an verschiedenen Orten keinerlei inhärente, eigenständige Bedeutung besitzt, ist die wichtigste Lektion, die man überhaupt aus der Beschäftigung mit Relativität lernen kann – und darf somit in einer Einführung in das Thema auf keinen Fall fehlen. Doch 1968 habe ich die Relativität der Gleichzeitigkeit lediglich als zweitrangige Konsequenz aus einigen anderen Merkwürdigkeiten eingeführt, statt darauf

zu bestehen, dass sie der entscheidende Schlüssel dafür ist, dass alles andere einen Sinn ergibt. Im vorliegenden Band führe ich daher die relative Natur der Gleichzeitigkeit sehr früh ein, quantitativ formuliert in einer einfachen, klaren und leicht zu merkenden Gleichung. Diese Gleichung wird danach in allen folgenden Erörterungen eine zentrale Rolle spielen.

Eine weitere Innovation in diesem Buch ist die Art, wie ich die von Minkowski kurz nach Einsteins wegweisenden Arbeiten erfundenen Raumzeitdiagramme behandle. Diese Skizzen helfen sehr dabei, die verschiedenen Ergebnisse zu einer einheitlichen intuitiven Vorstellung zusammenzufügen, ohne dass man unhandliche und komplizierte Gleichungen nachvollziehen müsste. 1968 spielten in meinem Buch die Koordinatenachsen von Raum und Zeit die entscheidende Rolle bei der Beschreibung von Ereignissen, und ich habe (etwas unkonventionelle) trigonometrische Beziehungen benutzt, um daraus die wesentlichen Informationen herauszuarbeiten. Gut 25 Jahre später fiel mir auf, dass die Achsen unnötig sind und im Zweifelsfall nur Verwirrung stiften. Man kann tatsächlich die umständlichen trigonometrischen Gleichungen meiner früheren Herleitung durch ganz einfache Sätze aus der ebenen Geometrie ersetzen, bei denen es im Wesentlichen nur darum geht, in den Abbildungen ähnliche Dreiecke zu identifizieren. Soweit ich weiß, wurde dieser Zugang zu den Raumzeitdiagrammen, der mit minimalem Rechenaufwand direkt bei Einsteins zwei Prinzipien ansetzt, bisher noch in keinem Lehrbuch benutzt oder überhaupt irgendwo in der wissenschaftlichen Literatur, weswegen ich ihn im *American Journal of Physics* (1997 und 1998) veröffentlicht habe. Raum-

zeitdiagramme in der hier von mir vorgelegten Form verhalten sich zur üblichen Darstellung dieser Diagramme wie die ebene euklidische Geometrie zur Analytischen Geometrie von Descartes. Natürlich ist die Analytische Geometrie das leistungsstärkere Werkzeug, wenn es um professionelle Berechnungen geht, Euklids Ansatz dagegen ist die Methode der Wahl, wenn es um ein tieferes Verständnis der Zusammenhänge geht.

Ein unüblicher Gedanke in meinem Buch von 1968 war ein alternativer grafischer Zugang, weniger vielseitig, aber auch weniger abstrakt als die Raumzeitdiagramme. Er basierte auf einer Reihe von Bildern von zwei relativ zueinander bewegten Zügen, jeweils aus der Perspektive von Passagieren in dem einen oder dem anderen Zug. Ein Jahrzehnt später dämmerte mir, das sich dasselbe noch viel einfacher sagen lässt, wenn man nicht aus Sicht der Passagiere der beiden Züge, sondern von einem Bahnsteig (oder einer Raumstation) aus argumentiert, relativ zu dem beide Züge mit betragsmäßig gleicher Geschwindigkeit in entgegengesetzte Richtungen fahren. Diesen Ansatz finden Sie nun in Kap. 9 dieses Buchs.

Schließlich darf ich beim Auflisten der in diesem Buch enthaltenen Verfeinerungen der relativistischen Didaktik auf keinen Fall Alice und Bob vergessen. Die beiden spielen seit vielen Jahrzehnten die Hauptrollen in Geschichten, welche gerne von Kryptologen erzählt werden. Ich machte ihre Bekanntschaft in den 1990er Jahren, als ich mich für einige bemerkenswerte Entwicklungen bei der Anwendung der Quantenphysik auf die Informationsverarbeitung interessierte. Dabei habe ich festgestellt, dass sie auch beim Casting für ein Buch über die Spezielle Relativitätstheorie

beste Chancen hatten. Dies nicht nur, weil „aus Sicht von Alice“ und „aus Sicht von Bob“ viel netter klingt als „in Bezugssystem A“ oder „in Bezugssystem B“. Die Tatsache, dass beide – zumindest in europäischen Sprachen – ihren eigenen Satz an Pronomen (sie, er, ihm, ihn, seine, ihre, ...) mitbringen, erleichtert es ungemein, einige durchaus komplizierte Geschichten völlig formlos und umgangssprachlich zu erzählen, ohne dass darunter die physikalische Präzision leiden müsste. Sie spielen (manchmal ergänzt um ihre Sidekicks Charlie, Carol, Dick und Eve) eine zentrale Rolle im vorliegenden Band. Und wenn dieses Buch auch sonst keinen Beitrag zum öffentlichen Verständnis der Relativitätstheorie leisten würde, so hoffe ich doch, dass es zumindest Alice und Bob den Weg zu einer zweiten, relativistischen Karriere verhelfen wird.

Es ist an der Zeit

Einsteins Relativitätstheorie verstehen

Mermin, N.D.

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

ISBN: 978-3-662-47151-7