

1 Einführung

„Was ist die Zeit? Ein Geheimnis, – wesenlos und allmächtig. Eine Bedingung der Erscheinungswelt, eine Bewegung, verkoppelt und vermengt dem Dasein der Körper im Raum und ihrer Bewegung. Wäre aber keine Zeit, wenn keine Bewegung wäre? Keine Bewegung, wenn keine Zeit? Frage nur! Ist die Zeit eine Funktion des Raumes? Oder umgekehrt? Oder sind beide identisch? Nur zu gefragt!“

Thomas Mann, Der Zauberberg

$E = mc^2$, Energie ist gleich Masse mal Lichtgeschwindigkeit zum Quadrat. Die meisten Menschen kennen diese Formel, doch nur wenige wissen mit ihr wirklich etwas anzufangen. Der Grund hierfür ist schnell gefunden. Einsteins berühmte Formel legt einen Zusammenhang zwischen zwei physikalischen Größen offen, die im Weltbild der klassischen Physik kaum etwas gemeinsam haben, einen Zusammenhang zwischen der Energie und der Masse eines Körpers. Und selbst auf den zweiten Blick wirft die Formel mehr Fragen auf, als sie Antworten zulässt. Was genau ist gemeint, wenn diese Formel behauptet, Energie und Masse seien proportionale Größen? Und mehr noch: Warum ist der Proportionalitätsfaktor das Quadrat einer Geschwindigkeit und warum ist es ausgerechnet die Geschwindigkeit des Lichts, die als Vermittler zwischen den beiden Größen wirkt?

Wir finden die Antworten auf diese Fragen in einer Theorie, die den Menschen zu Beginn des 20. Jahrhunderts nicht nur eine völlig neue Sicht auf die erfahrbare Welt gewährte, sondern gleichsam dazu zwang, elementare physikalische Begriffe und Zusammenhänge auf eine faszinierende Weise neu zu ordnen; wir finden sie in der Relativitätstheorie von Albert Einstein.

Einstein hat sein revolutionierendes Werk über einen Zeitraum von 10 Jahren erschaffen. Das Fundament legte er mit seiner Abhandlung *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, die im Jahr 1905 in den Annalen der Physik erschienen ist und die Grundlagen dessen enthält, was wir heute als die *spezielle Relativitätstheorie* bezeichnen [38]. Die Behauptungen, die wir in dieser Arbeit vorfinden, sind gewaltig. Nach Einsteins Auffassung machen wir einen grundlegenden Fehler, wenn wir Raum und Zeit als Größen begreifen, die unabhängig von einem Beobachter in einem absoluten Sinne existieren. Aber genau dies ist eine unserer fundamentalsten Erfahrungstatsachen und eine der grundlegendsten Annahmen der klassischen Physik.

Es ist ein besonderer Charme der speziellen Relativitätstheorie, dass sie sich vollständig aus zwei einfachen Grundprinzipien ableiten lässt, die wir im Folgenden als die *Einstein'schen Axiome* bezeichnen. Beide wollen wir uns kurz ansehen, bevor wir uns in den nachfolgenden Kapiteln ausführlich mit deren Konsequenzen beschäftigen.

Axiome der speziellen Relativitätstheorie

- Die Naturgesetze nehmen in allen Inertialsystemen die gleiche Form an.
☞ Prinzip der Relativität
- Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist in jedem Inertialsystem gleich.
☞ Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Den Begriff des *Inertialsystems* werden wir später ausführlich besprechen. An dieser Stelle sei lediglich erwähnt, dass es sich dabei um spezielle Bezugssysteme, d. h. lokale Koordinatensysteme, handelt, in denen das Trägheitsgesetz gilt.

Äußerlich wirkt das erste Axiom harmlos, ganz im Gegensatz zu Einsteins zweitem Axiom, das die Lichtgeschwindigkeit zu einer absoluten Größe erhebt und damit gleichzeitig mehrere sicher geglaubte Naturgesetze in Frage stellt. Um die kontraintuitiv wirkenden Konsequenzen zu verstehen, die sich aus dem zweiten Axiom ergeben, leuchten wir in Gedanken mit einer Taschenlampe in den Nachthimmel und stellen uns vor, wir würden dem emittierten Lichtstrahl mit hoher Geschwindigkeit hinterhereilen. Nach den Formeln der klassischen Physik müsste sich der Lichtstrahl aus unserer Sicht immer langsamer von uns entfernen, wenn wir ihm immer schneller folgen. Würden wir ihm gar mit Lichtgeschwindigkeit hinterhereilen, so dürfte sich die Wellenfront aus unserer Sicht überhaupt nicht mehr bewegen.

Einsteins zweites Axiom besagt aber etwas ganz anderes: Egal, wie schnell wir dem Lichtstrahl folgen, er würde uns stets mit der gleichen Geschwindigkeit enteilen. Damit setzt Einstein eine unserer innigsten Erfahrungstatsachen außer Kraft: das klassische Additionstheorem für Geschwindigkeiten. Vollends befremdlich wird das Szenario dann, wenn wir einen zweiten Beobachter in unser Gedankenspiel einbeziehen, der dem gleichen Lichtstrahl mit einer anderen Geschwindigkeit folgt. Auch dieser Beobachter wird nach Einsteins zweitem Axiom konstatieren, dass sich die Lichtwelle mit der immer gleichen Geschwindigkeit ausbreitet. Um diese Situation widerspruchsfrei aufzulösen, bedarf es einer völlig neuen Sichtweise darauf, wie Raum und Zeit miteinander verbunden sind.

Um zu verstehen, warum sich Einstein dazu entschlossen hatte, gleich mehrere elementare Grundannahmen in Frage zu stellen, müssen wir die spezielle Relativitätstheorie in ihrem historischen Kontext begreifen. Die Ideen zu dieser Theorie wurden

weder aus dem Nichts erschaffen noch aus einer Laune heraus geboren. Ganz im Gegenteil: Sie markieren das Ende einer langen Kette von Ereignissen, die die Physik in eine große Erklärungskrise stürzten. Begonnen haben die Schwierigkeiten mit den Experimenten von Forschern, die zwei banal klingenden Fragen nachgegangen waren: Was ist Licht und wie schnell breitet es sich aus?

Das Licht hatte die Menschen zeitlebens fasziniert, und entsprechend früh wurden verschiedene Theorien ersonnen, mit denen sich optische Phänomene wie die Reflexion, die Brechung oder die Beugung eines Lichtstrahls ursächlich erklären ließen. Dann allerdings geschah Unerwartetes. Als es die technischen Fortschritte im 18. und 19. Jahrhundert möglich machten, einen Teil der theoretischen Vorhersagen experimentell zu überprüfen, keimten Widersprüche auf, die mit dem klassischen physikalischen Weltbild nicht in Einklang gebracht werden konnten.

Im Kern resultierten die Widersprüche aus der symbiotischen Beziehung des Raums, der Zeit und der Lichtgeschwindigkeit. Die beiden zuerst genannten sieht die klassische Physik als absolute Größe an; sie werden behandelt, als ließe sich jedem Ereignis eine Raum- und eine Zeitkoordinate zuweisen, abgelesen von einer Raum- und einer Zeitskala, die unabhängig von der Bewegung des Beobachters definiert werden kann. Natürlich kommt diese Sichtweise der klassischen Physik nicht von ungefähr: Sie entspricht eins zu eins den Erfahrungstatsachen, die wir tagtäglich erleben.

Doch mit den optischen Experimenten des 19. Jahrhunderts kamen die Zweifel. Für lange Zeit als selbstverständlich erachtete Gesetze wie das klassische Additionstheorem für Geschwindigkeiten lieferten im Bereich der Optik Vorhersagen, die der Beobachtung zuwider liefen. Jeder Versuch, den Ausgang eines der Experimente im Sinne der klassischen Physik zu deuten, führte zu Konsequenzen, die in einem eklatanten Widerspruch zu den anderen Experimenten standen. Und so war zu Beginn des 20. Jahrhunderts lediglich eines klar: Irgendetwas konnte im Gebäude der klassischen Physik nicht stimmen.

Inmitten der kollektiven Ratlosigkeit hatte sich Albert Einstein mit einer verwegenen Frage befasst: Ließen sich die gefundenen Widersprüche vielleicht dadurch beseitigen, dass die Lichtgeschwindigkeit zu einer absoluten Größe erhoben wird? Einstein wusste um die scheinbar abwegigen Konsequenzen, die ein solcher Schritt nach sich ziehen würde. Sollte die Lichtgeschwindigkeit nämlich tatsächlich eine absolute Größe sein, so wäre dies nur dann widerspruchsfrei möglich, wenn der Raum und die Zeit genau dieses Attribut verlören. Als Einstein diesen Gedanken konsequent weiter verfolgte, wurde er fündig. Am Ende seiner Überlegungen stand die spezielle Relativitätstheorie, mit der sich die widersprüchlichen Experimente der Vergangenheit konsistent erklären ließen. Einstein hatte den Raum und die Zeit zu einer vierdimensionalen Raumzeit verschmolzen, die nur noch als Ganzes betrachtet werden darf. Eine unserer innigsten Erfahrungstatsachen ließ er damals aber noch unangetastet: In der speziellen Relativitätstheorie folgt die räumliche Komponente der Raumzeit immer noch treu den Gesetzen der euklidischen Geometrie.

Einstein hatte mit der speziellen Relativitätstheorie Großes geschaffen, und dennoch war er mit seinem Werk von Anfang an nicht ganz zufrieden. Seine Theorie war immer nur in Abwesenheit von Gravitationsfeldern anwendbar, und er fand viele Jahre keinen Weg, die Schwerkraft widerspruchsfrei zu integrieren. 10 Jahre seines Lebens hatte er investiert, um die spezielle Relativitätstheorie zu einer allgemeineren Theorie der Gravitation zu erweitern, und dabei zahlreiche Rückschläge erlitten.

Einstein erreichte sein Ziel im Jahr 1915 und publizierte wenige Monate später *Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie* in den *Annalen der Physik* [45]. Der Schlüssel zum Erfolg war abermals die Abkehr von Vertrautem: Einstein verneinte den Gedanken, die Gravitation sei eine Kraft im Newton'schen Sinne, die in einem euklidischen Raum zwischen materiellen Körpern wirkt. Stattdessen interpretierte er die Gravitation als eine Eigenschaft des Raums, als eine Verformung der Raumzeit. In dieser neuen Theorie befinden sich die Materie und die Raumzeit in einem permanenten Wechselspiel. Materie krümmt die Raumzeit, die ihrerseits über das Trägheitsgesetz die Bewegung der Materie bestimmt. Alles passte plötzlich perfekt zusammen, und es war vor allem die mathematische Ästhetik seiner Arbeit, die ihn 1915 schreiben ließ: „*Dem Zauber dieser Theorie wird sich kaum jemand entziehen können, der sie wirklich erfasst hat*“ [44]. Bald werden Sie verstehen, wie recht er damit hatte.

Die Kapitel dieses Buchs lassen sich in drei größere Teile gliedern. Im ersten Teil begeben wir uns auf eine Reise in die Geschichte der Physik und studieren in den Kapiteln 2 bis 5, was Galileo Galilei, Isaac Newton, Michael Faraday und Clerk Maxwell zu einem Weltbild beigetragen haben, das kurz vor seiner Vollendung zu stehen schien. In Kapitel 6 kommen wir auf die Experimente zu sprechen, die mit den Vorhersagen der klassischen Physik nicht in Einklang gebracht werden konnten. Am Ende werden wir sehen, dass Einstein auf den Schultern von Riesen stand, wie es einst Isaac Newton von sich zu sagen pflegte, und wir werden in Kapitel 7 erkennen, warum Einstein seine beiden Axiome so gewählt hat und nicht anders.

Im zweiten Teil des Buchs beschäftigen wir uns mit den Konsequenzen, die sich aus den Axiomen ergeben. In Kapitel 8 setzen wir uns im Detail mit der speziellen Relativitätstheorie auseinander und begegnen dort auch Einsteins berühmter Formel $E = mc^2$ wieder, die eine direkte Beziehung zwischen der Energie und der Masse eines Körpers herstellt. In Kapitel 9 begründen wir, warum Einstein mit der speziellen Relativitätstheorie nicht zufrieden war, und stellen über das starke Äquivalenzprinzip einen Zusammenhang zwischen der Gravitation und der beschleunigten Bewegung her. In Kapitel 10 wenden wir uns der allgemeinen Relativitätstheorie zu. Wir sehen dort, wie es Einstein durch den Übergang zu einer nichteuklidischen Raumzeit geschafft hat, die spezielle Relativitätstheorie konsistent zu einer Theorie der Gravitation zu erweitern.

Der dritte Teil des Buchs spannt den Bogen zu zwei Teilgebieten der Physik, in denen sich die theoretischen Vorhersagen der Relativitätstheorie auf besondere Weise real

manifestieren. Wir beginnen in Kapitel 11 mit einem historischen Rückblick auf die Teilchenphysik, wo insbesondere die Vorhersagen der speziellen Relativitätstheorie sichtbar werden. In Kapitel 12 wenden wir uns der Kernphysik zu, wo es uns nicht erspart bleibt, auch einen Blick auf die dunkle, zerstörerische Seite von Einsteins berühmter Formel zu werfen.

Unsere Reise ist damit vorgezeichnet, und kaum etwas könnte diesen Abschnitt treffender schließen als Goethes berühmter Satz: *„Der Worte sind genug gewechselt, lasst mich auch endlich Taten sehen!“*