

LERNEN LEICHTER GEMACHT



Relativitäts- theorie

für
dummies[®]

Die spannende Vor-
geschichte der Relativitäts-
theorie von Newton bis Einstein

Allgemeine und spezielle
Relativitätstheorie verstehen

Astrophysik, Kosmologie und
moderne Entwicklungen

Helmut Hetznecker

hängen nämlich in Wirklichkeit entscheidend davon ab, welcher Beobachter sie fällt. Was für den einen Beobachter gleichzeitig passiert, geschieht für einen anderen zeitversetzt – und sie haben beide Recht, denn Raum und Zeit erweisen sich als *relativ*! Ein Astronaut, der nach einer langen Reise durch das All auf die Erde zurückkehrt, ist plötzlich jünger als sein Zwillingbruder! Auch Begriffe wie Masse und Energie landeten auf Einsteins geistigem Seziertisch, wurden von ihm kritisch hinterfragt und neu bewertet. Das Ergebnis, die berühmte Formel $E = mc^2$, kennt heute beinahe jeder Mensch, und sei es nur als T-Shirt-Aufdruck. Und das allerbeste dabei: Alle Vorhersagen der Speziellen Relativitätstheorie erwiesen sich in späteren Experimenten als richtig. Bis heute kennt die Physik kein einziges Experiment, das der Speziellen Relativitätstheorie widersprechen würde.

So wuchtig die Spezielle Relativitätstheorie auch über die Physik hereingebrochen war, Einsteins Ruhm und Mythos gründen auf einen späteren, seinen eigentlichen Geniestreich: Die *Allgemeine Relativitätstheorie* offenbart die Natur der Gravitation. Was wir in jedem Moment unseres Lebens als Schwere oder »Schwerkraft« empfinden, stellt sich in Wahrheit als *Scheinkraft* in einer gekrümmten Raumzeit heraus! Unsere gesamte Kenntnis von der Struktur des Universums fußt auf Einsteins Theorie der Gravitation. Phänomene wie Schwarze Löcher und Gravitationswellen entsprangen als Ideen der Allgemeinen Relativitätstheorie, bevor sie viel später als Realität erkannt wurden. Der Augenblick, als die Krümmung von Lichtstrahlen mithilfe einer Sonnenfinsternis experimentell bestätigt wurde, machte Einstein schlagartig weltberühmt.

Niemand von uns wird behaupten können, die Effekte der Relativitätstheorie intuitiv zu »begreifen«. Unser Alltag der kleinen Geschwindigkeiten, des begrenzten räumlichen Erlebens und der vergleichsweise schwachen Gravitation bietet einfach keine Möglichkeit, unsere Wahrnehmung und unseren Verstand entsprechend zu schulen. Wir können kein Gefühl dafür entwickeln, dass die Zeit für verschiedene Beobachter unterschiedlich rasch abläuft, dass bestimmte Raumintervalle *an sich* keine Bedeutung haben, oder was wir uns unter einer gekrümmten Raumzeit überhaupt vorstellen sollen. Es verhält sich genau wie mit der Oberfläche unserer Erde, die den Menschen so lange als flache Scheibe vorkommen musste, bis es überzeugende Belege für ihre Kugelgestalt gab. Gerade daher stellt es eine der aufregendsten und genialsten Leistungen der menschlichen Geistesgeschichte dar, derart tief in die Natur von Raum und Zeit, von Masse, Energie und Gravitation vorgedrungen zu sein.

Und umso bemerkenswerter ist es auch, dass wir Nachgeborenen gar keine besonderen Gaben brauchen, um die entscheidenden Ideen und Inhalte der Relativitätstheorie zu verstehen – jedenfalls, solange wir nicht das Bedürfnis haben, sie mathematisch stringent zu formulieren. Denn beide Relativitätstheorien, die spezielle wie die allgemeine, beruhen auf äußerst einfachen Grundannahmen, die Einstein lediglich konsequent zu Ende gedacht (und gerechnet!) hat. Ich lade Sie ein, den Gedanken des Jahrtausendgenies Albert Einstein zu folgen. Freuen Sie sich auf einen aufregenden

neuen Blick auf die physikalische Welt.

Über dieses Buch

Was ist Bewegung? Was sind Raum, Zeit und Gravitation? Warum glauben die Physiker, dass Raum und Zeit gekrümmt sind? Was soll das überhaupt bedeuten und welche Konsequenzen ergeben sich daraus? Das sind die großen Themen, über die Sie in diesem Buch Grundlegendes erfahren werden. Das Ziel dieses Buchs ist es, Sie in die Lage zu versetzen, die Ideen der Relativitätstheorie und ihre Konsequenzen Schritt für Schritt nachzuvollziehen.

Konventionen in diesem Buch

Das ist schnell gesagt:

- ✓ Hinter den häufig erscheinenden Symbolen oder »Icons« finden Sie besonders wichtige und zentrale Aussagen.
- ✓ Begriffe, die innerhalb eines »Icons« definiert werden, sind **fettgedruckt**.
- ✓ Neue Begriffe, aber auch *Betonungen* stehen in diesem Buch *kursiv*.
- ✓ Graue Kästen enthalten Zusatzinformationen.

Was Sie nicht lesen müssen

Ich hoffe, dass Sie dieses Buch *freiwillig* lesen – von »müssen« kann daher überhaupt keine Rede sein. Alles kann, nichts muss. Die Frage ist aber natürlich, welche Lücken Sie sich erlauben können, ohne im weiteren Verlauf der Lektüre in Verständnisnot zu geraten. Da wären in der Tat die grauen Infokästen zu nennen, die für den kognitiven Fluss nicht zwingend notwendig sind, aber natürlich auch nicht schaden. Wenn Sie (zum Beispiel als Physikstudent der unteren Semester) bereits über Grundkenntnisse in der klassischen Mechanik und Elektrodynamik verfügen, könnten Sie überlegen, die [Kapitel 1](#) bis [5](#) zu überspringen. Im fünften Kapitel werden dann allerdings bereits die Konflikte zwischen den beiden Disziplinen sichtbar. Ach, wissen Sie was? Lesen Sie doch einfach alles!

Törichte Annahmen über den Leser

Also gut, wie stelle ich Sie mir vor?

- ✓ Vermutlich hegen Sie ein gewisses Interesse für die Naturwissenschaften im

Allgemeinen und die Physik im Besonderen.

- ✓ Der Wunsch, die Spezielle und Allgemeine Relativitätstheorie in ihren Grundzügen zu verstehen, weckt das Tier in Ihnen. Oder zumindest eine Art von gepflegtem Ehrgeiz. Das ist die denkbar beste Voraussetzung dafür, sich erfolgreich in den Gegenstand dieses Buchs zu vertiefen.
- ✓ Es bereitet Ihnen Freude, in Neues einzutauchen, auch wenn es an einigen Stellen etwas Anstrengung erfordern sollte. Sie betrachten es nicht als Offenbarungseid, einen Satz zweimal lesen zu müssen.
- ✓ Vielleicht sind Sie Schülerin oder Schüler in der Oberstufe, haben Physik noch nicht abgewählt und wünschen sich nun einen Begleiter, der Sie Schritt für Schritt in das neue Denken der Relativitätstheorie führt.
- ✓ Vielleicht befinden Sie sich aber auch im Grundstudium der Physik und hadern damit, die Relativitätstheorie alleine in der Sprache der Mathematik kennenzulernen.
- ✓ Sie brauchen keine Mathematik, um den Tag zu überstehen, fangen aber auch nicht gleich an zu hyperventilieren, wenn Ihnen doch einmal eine Formel über den Weg läuft.

Wie dieses Buch aufgebaut ist

Sie werden in diesem Buch über weite Strecken der chronologischen Entwicklung folgen, beginnend bei den »alten Meistern« Galilei und Newton. Meines Erachtens lassen sich viele Begriffe und Konzepte am schlüssigsten Hand in Hand mit der historischen Entwicklung einführen. Denn neue Ideen entstehen immer dann, wenn das Altbekannte an seine Grenzen gelangt. Später – in den Teilen II und III, wenn es konkret um die Spezielle und Allgemeine Relativitätstheorie geht – halten wir uns im Großen und Ganzen an die Chronologie der Einstein'schen Gedankengänge, ohne deswegen völlig auf Umwege, Abkürzungen und Querstraßen zu verzichten.

Teil I: Der Weg zur modernen Physik

Die Relativitätstheorie geht aus der klassischen Physik hervor, um die es in diesem Teil geht. Natürlich nicht um die komplette klassische Physik, sondern um zwei ihrer Säulen, die Mechanik und die Elektrodynamik. Denn diese beiden gerieten zum Ende des 19. Jahrhunderts hin dermaßen in Konflikt miteinander, dass erst ein frischer Geist und neues Denken imstande waren, die Wogen zu glätten.

Sie erfahren, was Galilei über den Begriff der Bewegung zu sagen hatte, und wie Newton die Erkenntnisse über Bewegungen und Kräfte zu einem vollendeten System ausbaute, das wir heute die »Newtons'sche« oder »Klassische Mechanik« nennen. Raum, Zeit, Kraft, Bewegung und Energie sind die zentralen Begriffe, von denen die

Mechanik handelt. Aber was unterscheidet eigentlich Ruhe und Bewegung? Woher weiß ich, dass ich in Ruhe bin? – Eine Frage, die nicht so locker zu beantworten ist, wie es zunächst scheinen mag.

Während die Mechanik in hohem Maße der alltäglichen Anschauung zugänglich ist, blieben die elektrischen und magnetischen Phänomene über lange Zeit im Dunklen – jedenfalls in den Zeiten, bevor die Errungenschaften der Elektrizität den Alltag der Menschen erleuchteten. Fortschritt und handfeste Erkenntnis gab es in diesen Bereichen über Jahrhunderte eher sporadisch. Forscher wie Ampère und Faraday mühten sich mit seltsamen Erscheinungen ab: Warum schlägt eine Kompassnadel aus, sobald in ihrer Umgebung ein elektrischer Strom zu fließen beginnt? Welche Kräfte sind dabei am Werk? Wieso verursacht umgekehrt ein bewegter Magnet einen Stromimpuls in einem Metalldraht? Der »Urknall« der Elektrodynamik vollzog sich, als ein gewisser James Clerk Maxwell das Wunder vollbrachte, alle elektrischen und magnetischen Erscheinungen mit vier kompakten mathematischen Gleichungen abzudecken.

Maxwells Gleichungen sagten sogar die Existenz sogenannter elektromagnetischer Wellen voraus, die sich – wie der Erfahrung nach alle Wellen – durch ein Medium ausbreiten sollten, den sogenannten *Äther*. Das Licht erwies sich als nichts anderes als eine Erscheinungsform solcher Wellen. Allerdings entzog sich dieser Äther jedem Nachweis. Als noch dazu deutlich wurde, dass sich Licht in alle Richtungen gleich schnell auszubreiten scheint, obwohl sich die Erde durch den Äther bewegt, standen die Physiker vor einer wirklich harten Nuss.

Teil II: Spezielle Relativitätstheorie

Von allen Forschern, die sich mit den angestauten Problemen zwischen Mechanik und Elektrodynamik beschäftigten, ging ein junger, in der Fachwelt unbekannter Patentamtsangestellter die Sache am entschiedensten an: Albert Einstein erkannte, dass die Widersprüche der klassischen Physik am einfachsten aus der Welt zu schaffen sind, wenn man an Newtons Vorstellungen von Raum und Zeit rüttelt. »Zeit ist, was die Uhr anzeigt«, lautet einer von Einsteins berühmten Kommentaren. Was so banal daherkommt, ist in Wirklichkeit ein Statement von ungeheurer Tragweite. Denn Einstein konnte mithilfe von einfachen Gedankenexperimenten zeigen, dass die Uhren gegeneinander bewegter Beobachter in der Tat unterschiedliche Zeiten anzeigen, wenn nur zwei einfache Voraussetzungen, die *Einstein'schen Postulate*, erfüllt sind. Was *gleichzeitig* ist, liegt plötzlich in den Augen des Beobachters – genau wie die räumliche Ausdehnung. Denn wie Sie bald sehen werden, hängt letztere aufs Engste mit dem Begriff der Gleichzeitigkeit zusammen. Im zweiten Teil dieses Buchs werden Sie die seltsamen Phänomene kennenlernen, die Einsteins neue Sicht von Raum und Zeit mit sich bringt. Es werden sich einige verblüffende, scheinbar paradoxe Szenarien daraus ergeben, die sich jedoch allesamt in Wohlgefallen auflösen.

Wenige Jahre, nachdem die Spezielle Relativitätstheorie bekannt wurde, begann der Mathematiker Hermann Minkowski – einer von Einsteins früheren Lehrern –, sich mit

ihr zu befassen. Das Ergebnis seiner Untersuchungen war die völlig neue Vision von Raum und Zeit als *Einheit*. Diese vierdimensionale *Raumzeit* birgt allerdings einige Eigenheiten, die wir aus dem gewöhnlichen, uns vertrauten dreidimensionalen Raum so nicht kennen.

Am Ende des zweiten Teils werden Sie schließlich erfahren, wie die »Elektrodynamik bewegter Körper« – so Einsteins ursprüngliche Bezeichnung der Theorie – die berühmte Formel $E = mc^2$ auf den Weg brachte, und welche Konsequenzen sich aus ihr ergeben.

Teil III: Allgemeine Relativitätstheorie

Die Spezielle Relativitätstheorie gilt für gleichförmig bewegte Bezugssysteme, das heißt für solche, die sich mit konstanter Geschwindigkeit in gleichbleibender Richtung bewegen. Außerdem ignoriert sie eine zentrale Gegebenheit der Natur, nämlich die Gegenwart der Gravitation. Im dritten Teil werden Sie sehen, mit welch einfachen und genialen Gedanken es Einstein gelang, diese Makel zu überwinden. Die Konsequenzen dieser Gedanken sind verblüffend. Sie werden Raum und Zeit noch einmal völlig neu sehen! Es stellt sich heraus, dass wir die Gravitation gar nicht als »Kraft« ansehen dürfen, sondern es sich bei ihr vielmehr um einen geometrischen Effekt handelt. Klingt komisch? Ist es auch! Aber Sie werden nach der Lektüre verstehen, warum es so ist.

Auch aus der Allgemeinen Relativitätstheorie ergeben sich einige sonderbare Konsequenzen, insbesondere für unser Universum. Gebogene Lichtstrahlen können wir uns gerade noch vorstellen. Schwarze Löcher dagegen, die keine Materie, ja nicht einmal Lichtstrahlen jemals wieder entweichen lassen, wenn diese einmal den Ereignishorizont überschritten haben, gehören zu den großen mystischen Phänomenen im All. Und natürlich ist die moderne Kosmologie – die Wissenschaft vom Universum als Ganzem – ohne Allgemeine Relativitätstheorie völlig undenkbar. Bis heute beschreibt Einsteins Theorie das beobachtbare, expandierende Universum sehr genau.

Teil IV: Der Top-Ten-Teil

Die beliebte Rubrik am Ende aller Dummies-Bücher. In diesem Band: Weise Sprüche und illustre Leute. Wird, wie ich vermute, von 89 Prozent aller Leserinnen und Leser zuerst gelesen.

Symbole, die in diesem Buch verwendet werden

Kein Dummies-Buch ohne die *Symbole* im Text. In diesem Buch werden Sie den folgenden Symbolen begegnen: