

Leseprobe aus:



ISBN: 978-3-498-00233-6

Mehr Informationen zum Buch finden Sie auf
www.rowohlt.de.

Michio Kaku

Die Gottes-Formel

Die Suche nach der Theorie von Allem

Aus dem Englischen von Monika Niehaus und
Bernd Schuh

Rowohlt

Die Originalausgabe erschien 2021 unter dem Titel «The God Equation» bei Doubleday, New York.

Deutsche Erstausgabe

Veröffentlicht im Rowohlt Verlag, Hamburg, Juni 2021

Copyright © 2021 by Rowohlt Verlag GmbH, Hamburg

«The God Equation» Copyright © 2021 by Michio Kaku

Fachlektorat Bernd Schuh

Satz Quеста bei Dörlemann Satz, Lemförde

Druck und Bindung CPI books GmbH, Leck, Germany

ISBN 978-3-498-00233-6

Die Rowohlt Verlage haben sich zu einer nachhaltigen Buchproduktion verpflichtet. Gemeinsam mit unseren Partnern und Lieferanten setzen wir uns für eine klimaneutrale Buchproduktion ein, die den Erwerb von Klimazertifikaten zur Kompensation des CO₂-Ausstoßes einschließt.

Einführung in die endgültige Theorie

Es sollte die endgültige Theorie sein, eine einzige Partitur, die sämtliche Kräfte des Kosmos vereinen und alles von der Expansion des Universums bis zum Tanz winziger, subatomarer Partikel choreografieren würde. Die Herausforderung bestand darin, eine Formel zu entwickeln, deren mathematische Eleganz die Gesamtheit der Physik erfasst.

Einige der renommiertesten Physiker der Welt machten sich auf die Suche nach diesem Gral. Stephen Hawking hielt dazu sogar einen Vortrag mit dem vielversprechenden Titel «Ist das Ende der theoretischen Physik in Sicht?».

Falls eine solche Theorie erfolgreich sein sollte, wäre dies die Krönung der Naturwissenschaften. Es wäre der Heilige Gral der Physik, eine einzige Formel, aus der man im Prinzip sämtliche anderen Gleichungen ableiten könnte, vom Urknall bis zum Ende des Universums. Es wäre das Endergebnis von 2000 Jahren wissenschaftlichen Bemühens, seit die Menschen der Antike fragten: «Woraus besteht die Welt?»

Das ist eine atemberaubende Vision.

Einsteins Traum.

Als Achtjähriger stieß ich zum ersten Mal auf die Herausforderung, die dieser Traum darstellte. Eines Tages berichteten die Zeitungen, soeben sei ein großer Naturwissenschaftler gestorben. In der Zeitung war ein mir unvergessliches Bild.

Es zeigte seinen Schreibtisch mit einem aufgeschlagenen Notizbuch. Die Bildunterschrift besagte, dass der größte Naturwissenschaftler unserer Zeit das Werk, das er begann, nicht hatte zu Ende bringen können. Ich war fasziniert. Was war so schwierig, dass selbst der große Einstein keine Lösung finden konnte?

6 Dieses Notizbuch enthielt seine unvollendete Theorie von Allem, die Einstein als die vereinheitlichte oder einheitliche Feldtheorie bezeichnete. Er wollte eine Gleichung, vielleicht nicht mehr als einen Finger lang, die uns erlauben würde, «den Geist Gottes» zu erfassen, wie er es formulierte.

Ohne das ungeheure Ausmaß des Problems völlig zu verstehen, entschloss ich mich, in die Fußstapfen dieses großen Mannes zu treten, und hoffte, eine kleine Rolle bei der Vervollendung seiner Suche zu spielen.

Doch viele andere haben es ebenfalls versucht und blieben

ohne Erfolg.¹ Wie der Princeton-Physiker Freeman Dyson

1 In der Vergangenheit haben viele Giganten der Physik versucht, ihre eigene vereinheitlichte Feldtheorie zu entwickeln, doch ohne Erfolg. In der Rückschau wird deutlich, dass eine vereinheitlichte Feldtheorie drei Kriterien erfüllen muss:

1. Sie muss die Allgemeine Relativitätstheorie Einsteins in ihrer Gesamtheit umfassen.
2. Sie muss das Standardmodell subatomarer Teilchen einschließen.
3. Sie muss endliche Resultate ergeben.

Erwin Schrödinger, einer der Gründer der Quantentheorie, machte einen Vorschlag für eine vereinheitlichte Feldtheorie, mit der sich Einstein schon vorher beschäftigt hatte. Sie schlug fehl, weil Schrödingers Vorschlag sich nicht korrekt auf Einsteins Theorie reduzieren ließ und die Maxwell'schen Gleichungen nicht erklären konnte. (Zudem enthielt er auch keine Beschreibung von Elektronen oder Atomen.)

8

Auch Wolfgang Pauli und Werner Heisenberg schlugen eine vereinheitlichte Feldtheorie vor, in der Fermionmaterie-Felder vorkamen, doch sie war nicht renormierbar und schloss das Quark-Modell nicht ein, das Jahrzehnte später entwickelt wurde.

Einstein selbst untersuchte eine Reihe von Theorien, die letztlich alle versagten. Um die Maxwell'sche Theorie in seine eigene Theorie zu integrieren, versuchte er im Prinzip, den metrischen Tensor für die Gravitation und die Christoffelsymbole so zu verallgemeinern, dass sie antisymmetrische Tensoren enthielten. Lediglich die Zahl der Felder in Einsteins ursprünglicher Theorie zu erhöhen, reichte nicht, um die Maxwell'schen Gleichungen zu erklären. In diesem Ansatz kommt auch Materie nicht vor.

Im Lauf der Zeit hat es eine Reihe von Versuchen gegeben, Einsteins Gleichungen einfach durch Materiefelder zu ergänzen, jedoch zeigen sie Divergenzen schon auf dem Einschleifenniveau. Tatsächlich wurden Computer eingesetzt, um die Streuung von Gravitonen auf dem Einschleifenniveau zu berechnen, und es konnte gezeigt werden, dass das Ergebnis eindeutig unendlich ist. Bislang ist die einzig bekannte Möglichkeit, diese Unendlichkeiten auf dem niedrigsten Einschleifenniveau zu eliminieren, eine Supersymmetrie mit einzubauen.

Eine radikalere Idee wurde von Theodor Kaluza vorgeschlagen, der Einsteins Gleichungen bereits 1919 in fünf Dimensionen ausdrückte. Wenn man eine Dimension zu einem winzigen Kreis zusammenrollt, dann resultiert daraus bemerkenswerterweise das Maxwell'sche Feld, gekoppelt an das Einsteinsche Gravitationsfeld. Einstein untersuchte diesen Ansatz, doch ließ er ihn schließlich fallen, denn niemand verstand, wie sich eine Dimension zum Kollabieren bringen ließ. In neuerer Zeit ist dieser Ansatz in eine Stringtheorie inkorporiert worden, die zehn Dimensionen zu vier Dimensionen kollabieren lässt, wobei das Yang-Mills-Feld entsteht. Von den vielen Ansätzen für eine vereinheitlichte Feldtheorie ist daher der einzige bis heute diskutierte Weg der höherdimensionale Ansatz von Kaluza, jedoch so verallgemeinert, dass er Supersymmetrie, Superstrings und Supermembranen einschließt.

In neuerer Zeit wird auch eine Theorie namens Schleifenquantengravitation diskutiert. Sie untersucht Einsteins ursprüngliche vierdimensionale Theorie auf neue Weise. Es handelt sich jedoch um eine reine Gravitationstheorie, ohne Elektronen oder subatomare Teilchen, und man kann daher nicht von einer vereinheitlichten Feldtheorie sprechen. Diese Theorie erwähnt das Standardmodell nicht, denn sie enthält keine Materiefelder. Zudem ist nicht klar, ob die Streuung von Multiloops in diesem Formalismus wirklich endlich ist. Es gibt Spekulationen, dass die Kollision zwischen zwei Schleifen (Loops) zu divergierenden Resultaten führt.

einst meinte, ist die Straße zur vereinheitlichten Feldtheorie übersät mit den Leichen fehlgeschlagener Versuche.

Der aussichtsreichste (und meiner Meinung nach einzige) Kandidat ist die Stringtheorie, die besagt, dass das Universum nicht aus punktförmigen Teilchen, sondern aus winzigen, schwingenden Saiten (Strings) besteht, wobei jeder Ton einem subatomaren Teilchen entspricht.

9

Wenn wir ein genügend leistungsfähiges Mikroskop hätten, könnten wir sehen, dass Elektronen, Quarks, Neutrinos etc. nichts weiter als Schwingungen winziger Gummiringe sind. Wenn wir das Gummiband oft genug in unterschiedlicher Weise zupfen, schaffen wir schließlich sämtliche bekannten Teilchen im Universum. Das heißt, dass sich alle Gesetze der Physik auf die Harmonien dieser Strings reduzieren lassen. Die Chemie ist die Melodie, die man auf ihnen spielen kann. Das Universum ist eine Symphonie. Und der Geist Gottes, über den Einstein so eloquent schrieb, ist kosmische Musik, die durch die Raumzeit wiederhallt.

Das ist nicht nur eine akademische Frage. Jedes Mal, wenn Wissenschaftler eine neue Kraft gefunden haben, hat dies den Lauf der Zivilisation und das Geschick der Menschheit verändert. So legte Newtons Entdeckung der Bewegungsgesetze und des Gravitationsgesetzes die Grundlage für das Maschinenzeitalter und die Industrielle Revolution. Michael Faradays und James Clerk Maxwells Erklärung von Elektrizität und Magnetismus bahnte den Weg für die Beleuchtung unserer Städte und schenkte uns leistungsfähige elektrische Motoren und Generatoren wie auch lichtschnelle Kommunikation via TV und Radio. Einsteins berühmte Gleichung $E = mc^2$ erklärte die Leuchtkraft der Sterne und trug zur Entschlüsselung der Kernkraft bei. Als Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg

und andere die Geheimnisse der Quantentheorie enthüllten, ermöglichten sie die moderne Hightech-Revolution mit Supercomputern, Lasern, dem Internet und all den fabelhaften Gadgets in unseren Wohnzimmern.

10 Letztlich verdanken wir all die Wunder moderner Technik den Wissenschaftlern, die nach und nach die fundamentalen Naturkräfte der Welt entschlüsselten. Nun könnten Wissenschaftler gemeinsam nach der Theorie suchen, die diese vier Kräfte der Natur – Schwerkraft, elektromagnetische Kraft sowie starke und schwache Kernkraft – in einer einzigen Theorie vereinigt. Letztlich könnte diese Theorie einige der tiefgründigsten naturwissenschaftlichen Geheimnisse und Fragen klären, zum Beispiel:

- Was geschah vor dem Urknall?
- Was liegt auf der anderen Seite eines Schwarzen Loches?
- Sind Zeitreisen möglich?
- Gibt es Wurmlöcher, die zu anderen Universen führen?
- Gibt es höhere Dimensionen?
- Gibt es ein Multiversum von Paralleluniversen?

In diesem Buch geht es um die Suche nach dieser ultimativen Theorie und um all das bizarre Hin und Her dessen, was zweifellos zu einem der seltsamsten Kapitel in der Geschichte der Physik gehört. Wir werden alle vorangegangenen Revolutionen Revue passieren lassen, denen wir unsere technologischen Wunder verdanken; dabei beginnen wir mit der Newton'schen Revolution und schreiten fort zur Beherrschung der elektromagnetischen Kraft, der Entwicklung der Relativitäts- und der Quantentheorie und kommen schließlich zur modernen Stringtheorie. Und wir werden sehen, wie diese Theorie auch die größten Geheimnisse von Raum und Zeit lösen könnte.

Eine Armee von Kritikern

Es bleiben jedoch noch einige Hürden zu überwinden. Bei aller Begeisterung für die Stringtheorie haben Kritiker lautstark auf Mängel hingewiesen. Und über all dem Rummel und Getöse haben sich echte Fortschritte verzögert.

11

Das offenkundigste Problem ist, dass wir trotz all der schmeichelhaften Presse, die die Schönheit und Komplexität der Theorie preist, keine soliden, testbaren Beweise vorlegen können. Einst hegten wir die Hoffnung, der Large Hadron Collider (LHC), der größte Teilchenbeschleuniger der Geschichte, der im schweizerischen Genf steht, würde uns konkrete Beweise für die endgültige Theorie liefern, doch diese Hoffnung hat sich bislang nicht erfüllt. Der LHC hat zwar das Higgs-Boson (oder Gottesteilchen) gefunden, doch dieses Teilchen war nur ein winziger Teil der endgültigen Theorie.

Auch wenn es ehrgeizige Vorschläge für einen noch leistungsfähigeren Nachfolger des LHC gibt, ist nicht garantiert, dass diese so teuren Maschinen überhaupt irgendetwas finden werden. Niemand kann mit Sicherheit sagen, bei welcher Energie wir auf neue subatomare Teilchen stoßen werden, die die Theorie bestätigen könnten.

Die wichtigste Kritik an der Stringtheorie ist jedoch vielleicht, dass sie ein Multiversum von Universen voraussagt. Einstein meinte einst, die Schlüsselfrage sei: Hatte Gott eine Wahl, als er das Universum schuf? Ist das Universum einzigartig? Die Stringtheorie selbst ist einzigartig, doch sie hat wahrscheinlich eine unendliche Anzahl von Lösungen. Physiker nennen dies

das Landschaftsproblem – die Tatsache, dass unser Universum vielleicht nur *eine* Lösung in einem Meer von anderen, ebenso gültigen Lösungen ist. Wenn unser Universum eines von vielen möglichen Universen ist, welches ist dann das unsere? Warum leben wir in diesem speziellen Universum und nicht in einem anderen? Was ist dann die Vorhersagekraft der Stringtheorie? Ist es eine Theorie von Allem oder eine Theorie von allem Möglichen?

Ich bekenne, dass ich einen Anteil an dieser Suche habe. Ich arbeite seit 1968 an der Stringtheorie, seitdem sie zufällig, unangekündigt und völlig unerwartet auftauchte. Ich habe die bemerkenswerte Evolution dieser Theorie erlebt, die sich von einer einzigen Formel zu einer Disziplin entwickelte, deren Forschungsartikel eine ganze Bibliothek füllen.

Heutzutage bildet die Stringtheorie die Basis für einen Großteil der physikalischen Forschung in den führenden Laboren der Welt. Dieses Buch wird Ihnen hoffentlich eine ausgewogene, objektive Analyse der Durchbrüche und Grenzen der Stringtheorie vermitteln.

Es wird auch erklären, warum diese Suche die Fantasie der weltweit führenden Physiker gefangen nimmt und warum diese Theorie so viele leidenschaftliche und kontroverse Diskussionen ausgelöst hat.

Kapitel 1

Vereinheitlichung – der uralte Traum

13

Wenn man den Nachthimmel in all seiner funkelnden Sternensprache betrachtet, kann man leicht von seiner schieren, atemberaubenden Majestät überwältigt werden. Und dann stellen wir uns eine Frage, die an das größte Geheimnis überhaupt rührt.

Steckt hinter diesem Universum ein großer Entwurf?

Wie können wir einen Sinn in einem anscheinend sinnlosen Kosmos finden?

Hat unsere Existenz Sinn und Zweck, oder ist sie völlig ohne Ziel?

All das erinnert mich an ein Gedicht von Steven Crane:

A man said to the universe:

«Sir, I exist!»

«However,» replied the universe,

«The fact has not created in me a sense of obligation.»

(Ein Mann erklärte dem Universum:

«Mein Herr, ich existiere!»

«Mag sein», entgegnete das Universum,

«Doch die Tatsache verpflichtet mich zu nichts.»)

Die alten Griechen gehörten zu den Ersten, die den ernsthaften Versuch unternahmen, das Chaos der Welt um uns herum zu ordnen. Philosophen wie Aristoteles glaubten, alles lasse sich auf eine Mischung von vier Grundelementen reduzieren: Erde, Luft, Feuer und Wasser. Aber wie erwächst aus diesen vier Elementen die reiche Komplexität der Welt?

14 Die Griechen schlugen mindestens zwei Antworten auf diese Frage vor. Die erste gab der Philosoph Demokrit noch vor Aristoteles. Er glaubte, alles lasse sich auf winzige, unsichtbare, unzerstörbare Teilchen zurückführen, die er Atome (griechisch für «unteilbar») nannte. Seine Kritiker wiesen jedoch darauf hin, dass sich ein direkter Beweis für Atome unmöglich erbringen ließ, weil sie zu klein für eine Beobachtung waren. Demokrit konnte jedoch auf überzeugende Indizien verweisen.

Stellen Sie sich zum Beispiel einen Goldring vor. Im Lauf der Zeit beginnt der Ring sich abzunutzen. Etwas davon verschwindet. Jeden Tag geht ein winziger Teil seiner Materie verloren. Obgleich Atome unsichtbar sind, lässt sich ihre Existenz indirekt ableiten.

Selbst heute geht ein großer Teil der modernen Wissenschaft indirekt vor. Wir kennen die Zusammensetzung der Sonne, die detaillierte Struktur der DNA, das Alter des Universums allein aufgrund von Messungen dieser Art. Wir wissen all dies, obwohl wir niemals die Sterne besucht haben, in ein DNA-Molekül eingedrungen sind oder Zeuge des Urknalls waren. Der Unterschied zwischen direktem und indirektem Beweis ist von entscheidender Bedeutung, wenn wir Versuche diskutieren, die die vereinheitlichte Feldtheorie belegen.

Einen zweiten Ansatz lieferte der große Mathematiker Pythagoras.

Pythagoras hatte die Eingebung, irdische Phänomene wie

Musik mathematisch zu beschreiben. Der Legende zufolge entdeckte er Ähnlichkeiten zwischen dem Klang, der beim Zupfen einer Saite der Leier entsteht, und den Resonanzen, die beim Hämmern eines Metallstabes auftreten. Er stellte fest, dass dabei musikalische Frequenzen entstehen, die in bestimmten Verhältnissen schwingen. Daher hat etwas ästhetisch so Schönes wie Musik seinen Ursprung in der Mathematik der Resonanzen. Dies sprach nach Pythagoras' Meinung dafür, dass die Vielfalt der Objekte, die wir sehen, denselben mathematischen Regeln gehorchen musste.

15

Daher lieferten uns die alten Griechen mindestens zwei großartige Theorien: die Vorstellung, dass alles aus unsichtbaren, unzerstörbaren Atomen besteht und dass sich die Vielfalt der Natur durch die Mathematik der Schwingungen beschreiben lässt.

Mit dem Zusammenbruch der klassischen Zivilisation ging diese Kultur philosophischer Diskussionen und Debatten jedoch leider verloren. Die Vorstellung, es könne ein Paradigma geben, das das Universum erklärt, geriet für fast tausend Jahre in Vergessenheit. Dunkelheit breitete sich über die westliche Welt aus, und wissenschaftliche Fragestellungen wurden weit hin durch abergläubische Überzeugungen und den Glauben an Magie und Hexerei ersetzt.

Wiedergeburt in der Renaissance

16

Im 17. Jahrhundert wagten einige wenige bedeutende Wissenschaftler, die etablierte Ordnung in Frage zu stellen und die Natur des Universums zu erforschen, doch sie stießen auf starke Widerstände und wurden heftig verfolgt. Johannes Kepler, der als einer der Ersten Mathematik auf die Bewegung der Planeten anwandte, war Hofmathematiker von Kaiser Rudolf II. und entging vielleicht deshalb der kirchlichen Verfolgung, weil er in seine wissenschaftlichen Arbeiten fromme religiöse Elemente einflocht.

Der ehemalige Mönch Giordano Bruno hatte nicht so viel Glück. Im Jahr 1600 wurde er wegen Häresie vor Gericht gestellt und zum Tode verurteilt. Er wurde geknebelt, nackt durch die Straßen von Rom geführt und schließlich auf dem Scheiterhaufen verbrannt. Sein Hauptverbrechen? Die Vermutung, es könne auf Planeten, die andere Sterne umkreisen, Leben geben.

Dem großen Galilei, dem Vater der experimentellen Wissenschaft, drohte dasselbe Schicksal. Doch anders als Bruno widerrief Galilei angesichts der drohenden Todesstrafe seine Thesen. Nichtsdestotrotz hinterließ er mit seinem Teleskop, der vielleicht revolutionärsten und aufrührerischsten Erfindung in der Wissenschaft, ein bleibendes Vermächtnis. Mit einem Teleskop konnte jedermann mit eigenen Augen sehen, dass der Mond pockennarbig war und Krater aufwies, dass die Venus Phasen zeigte, die zu einer Umlaufbahn um die Sonne passten,

und dass der Jupiter Monde hatte, was allesamt ketzerische Ideen waren.

Galilei wurde unter Hausarrest gestellt, durfte keine Besucher empfangen und erblindete schließlich. (Angeblich, weil er einst mit seinem Teleskop direkt in die Sonne geblickt hatte.) Der Wissenschaftler starb als gebrochener Mann. Doch im Jahr darauf wurde in England ein Knabe geboren, der seine und Keplers unvollendete Theorie vollenden und uns eine vereinheitlichte Theorie des Himmels schenken sollte.

Newton's Theorie der Kräfte

18

Isaac Newton ist vielleicht der größte Naturwissenschaftler, der jemals gelebt hat. In einer von Aberglauben und Hexerei besessenen Welt wagte er es, die universellen Gesetze des Himmels niederzuschreiben und zum Studium von Kräften eine neue, von ihm erfundene Mathematik, die sogenannte Infinitesimalrechnung, anzuwenden. Wie der Physiker Steven Weinberg schrieb: «Erst mit Isaac Newton beginnt der moderne Traum von einer endgültigen Theorie wirklich.»² Damals verstand man darunter die Theorie von Allem, das heißt die Theorie, die alle Bewegung beschrieb.

Alles begann, als Newton 23 Jahre alt war. Die Cambridge University wurde aufgrund des Schwarzen Todes, der Pest, geschlossen. Eines Tages im Jahr 1666, als er auf seinem Landsitz umherschlenderte, sah er einen Apfel fallen. Daraufhin stellte er sich eine Frage, die den Lauf der Menschheitsgeschichte verändern sollte:

Wenn ein Apfel fällt, fällt dann auch der Mond?

Vor Newton lehrte die Kirche, es gebe zwei Arten von Gesetzen. Da waren zum einen die Gesetze, die auf Erden galten und die durch die Sünden der Sterblichen unvollkommen waren. Und dann gab es zum anderen die reinen, perfekten und harmonischen Gesetze des Himmels.

Die Essenz von Newtons Theorie bestand darin, eine ein-

² Steven Weinberg, *Dreams of a Final Theory* (New York, Pantheon, 1992), 11. (Deutsch: *Der Traum von der Einheit des Universums*, Goldmann, 1995.)

heitliche Theorie vorzuschlagen, die Himmel und Erde umfasste.

In seinem Notizbuch zeichnete er ein schicksalhaftes Bild (Abbildung 1).

Wenn eine Kanonenkugel von der Spitze eines Berges abgefeuert wird, legt sie eine gewisse Strecke zurück, bevor sie auf dem Boden landet. Wenn man die Kugel jedoch mit immer höherer Geschwindigkeit abschießt, bewegt sie sich weiter und weiter, bevor sie zurück auf die Erde fällt, bis sie die Erde schließlich vollständig umrundet und zur Bergspitze zurückkehrt. Newton zog den Schluss, dass das Gesetz der Schwerkraft, das Äpfel und Kanonenkugeln lenkt, auch den Mond auf seiner Umlaufbahn um die Erde hält. Für die irdische und die himmlische Physik galten dieselben Regeln.

19

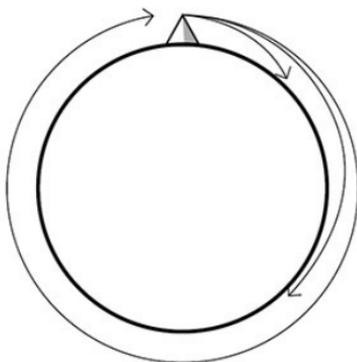


Abbildung 1. Man kann eine Kanonenkugel mit immer größerer Energie abfeuern, sodass sie schließlich die Erde umkreist und zu ihrem Startpunkt zurückkehrt. Newton erläuterte dann, dass dies die Umlaufbahn des Mondes erkläre, und vereinte damit die physikalischen Gesetze, die auf der Erde galten, mit den Gesetzen himmlischer Körper.

Zu diesem Schluss kam er, indem er das Konzept der Kräfte

einführte. Objekte bewegten sich, weil sie von Kräften angezogen oder abgestoßen wurden, die universell waren und sich präzise messen und mathematisch bestimmen ließen. (Zuvor hatten einige Theologen angenommen, Objekte bewegten sich aufgrund eines inneren Bedürfnisses – wenn sie also fielen, dann aufgrund des Wunsches, sich mit der Erde zu vereinen.)

20 Daher führte Newton das Konzept der Vereinheitlichung ein.

Newton war jedoch ein notorisch verschlossener Mann und hielt einen Großteil seiner Arbeit geheim. Er hatte kaum Freunde, war unfähig zu leichterer Konversation, verstrickte sich oft in bittere Prioritätsstreitigkeiten mit anderen Wissenschaftlern über seine Entdeckungen.

Im Jahr 1682 begab sich ein sensationelles Ereignis, das den Lauf der Geschichte verändern sollte. Ein feuriger Komet zog über London. Jedermann, vom König bis zum Bettler, diskutierte die Neuigkeit. Woher kam er? Wohin ging er? Worauf deutete er hin?

Ein Mann, der sich für diesen Kometen interessierte, war der Astronom Edmond Halley. Er reiste nach Cambridge, um den berühmten Isaac Newton zu treffen, der bereits für seine Theorie des Lichts wohlbekannt war. (Durch Zerlegen des Sonnenlichts mittels eines Glasprismas hatte Newton gezeigt, dass sich weißes Licht in alle Farben des Regenbogens aufspalten lässt, und bewies damit, dass weißes Licht tatsächlich aus Farben zusammengesetzt ist. Zudem erfand er einen neuen Typ von Teleskop, der statt Linsen reflektierende Spiegel verwendete.) Als Halley Newton nach dem Kometen fragte, der in aller Munde war, erfuhr er zu seiner Verwunderung, dass sich Kometen, wie Newton anhand seiner eigenen Gravitationstheorie zeigen konnte, in Ellipsen um die Sonne bewegten und

ihre Bahn sich vorhersagen ließ. Tatsächlich verfolgte Newton ihren Lauf mit Hilfe des von ihm erfundenen Teleskops, und sie bewegten sich genau so, wie er es vorhersagte.

Halley war wie vor den Kopf geschlagen.

Er erkannte sofort, dass er Zeuge einer umwälzenden wissenschaftlichen Entdeckung war, und erklärte sich bereit, die Druckkosten eines Werkes zu übernehmen, das schließlich zu einem der größten Meisterwerke in der Geschichte der Wissenschaft werden sollte, Newtons *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* oder kurz *Principia*.

21

Wie Halley darüber hinaus erkannte, sagte Newton voraus, dass Kometen unter Umständen in regelmäßigen Abständen zurückkehren konnten, und so berechnete der Astronom, dass der Londoner Komet von 1682 im Jahr 1758 wiederkehren würde. (Der Halley'sche Komet überquerte Europa, wie vorausgesagt, am Weihnachtsabend 1758 – was Newtons und Halleys Ruhm posthum bestätigte.)

Newtons Theorie der Bewegung und der Gravitation gehört zu den größten Errungenschaften des menschlichen Geistes, ein einziges Prinzip, das die bekannten Gesetze der Bewegung vereinigt. Der englische Dichter Alexander Pope schrieb dazu:

Natur und der Natur Gesetze lagen in dunkler Nacht,
Gott sprach: Newton sei! Und sie strahlten voll Pracht.

Selbst heute noch sind es diese Gesetze, die NASA-Ingenieuren erlauben, Raumsonden durch das Sonnensystem zu schicken.

Was ist Symmetrie?

22

Newtons Gravitationsgesetz ist auch deshalb bemerkenswert, weil es eine Symmetrie besitzt, sodass die Gleichung unverändert bleibt, wenn wir eine Rotation durchführen. Stellen Sie sich eine Kugelschale vor, die die Erde umgibt. Die Schwerkraft ist auf jedem Punkt der Sphäre identisch. Genau aus diesem Grund ist die Erde rund statt anders geformt, denn die Gravitation drückt die Erde gleichmäßig zusammen. Aus diesem Grund gibt es auch keine würfelförmigen Sterne oder pyramidenförmigen Planeten. (Kleine Asteroiden sind oft unregelmäßig geformt, denn ihre eigene Schwerkraft ist zu gering, um sie gleichmäßig zu komprimieren.)

Das Konzept der Symmetrie ist einfach, elegant und intuitiv verständlich. Überdies werden wir im ganzen Buch feststellen, dass Symmetrie nicht nur zum Aufhübschen einer Theorie dient, sondern dass es sich dabei tatsächlich um ein wesentliches Merkmal handelt, das auf ein grundlegendes physikalisches Prinzip im Universum hinweist.

Aber was ist gemeint, wenn man sagt, eine Gleichung sei symmetrisch?

Ein Objekt ist dann symmetrisch, wenn es nach einer Neuordnung seiner Teile dasselbe – oder invariant – bleibt. So ist eine Kugel beispielsweise symmetrisch, weil sie nach einer Rotation dieselbe bleibt. Doch wie lässt sich diese Tatsache mathematisch ausdrücken?

Denken Sie an die Erde, die sich um die Sonne dreht (siehe Abbildung 2). Der Radius der Erdumlaufbahn ist gegeben

durch R und er bleibt derselbe, während die Erde um die Sonne läuft. (Tatsächlich ist der Erdborbit elliptisch, sodass R ein wenig variiert, doch das spielt für dieses Beispiel keine Rolle.) Die Koordinaten der Erdumlaufbahn sind gegeben durch X und Y . Während sich die Erde auf ihrem Orbit bewegt, verändern sich X und Y ständig, doch R ist invariant und bleibt unverändert.

Ebenso behalten Newtons Gleichungen ihre Symmetrie, das heißt, die Gravitation zwischen Erde und Sonne bleibt dieselbe, während sich die Erde um die Sonne bewegt³ – während sich unser Bezugssystem verändert, bleiben die Gesetze unverändert. Ganz gleich, welche Orientierung wir wählen, um das Problem zu betrachten: Die Regeln verändern sich nicht und die Ergebnisse bleiben dieselben.

23

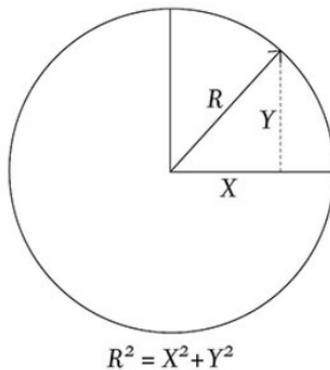


Abbildung 2. Wenn die Erde die Sonne umkreist, bleibt der Radius R ihrer Umlaufbahn derselbe. Die Koordinaten X und Y der Erde ändern sich währenddessen hingegen ständig, doch

³ Da Newtons *Principia* auf rein geometrische Weise verfasst wurden, ist klar, dass sich Newton der Bedeutung von Symmetrie bewusst war. Er nutzte die Kraft der Symmetrie offenbar intuitiv, um die Bewegungen der Planeten zu berechnen. Da er jedoch nicht die analytische Form der Infinitesimalrechnung mit Symbolen wie X^2 und Y^2 benutzte, stellt sein Manuskript Symmetrie nicht analytisch mit Hilfe von X - und Y -Koordinaten dar.

R ist eine Invariante. Aus dem Satz des Pythagoras wissen wir, dass $X^2 + Y^2 = R^2$ ist. Daher ist Newtons Gleichung symmetrisch – man kann sie durch R ausdrücken oder durch X und Y .

24 Bei unserer Diskussion der vereinheitlichten Feldtheorie werden wir immer wieder auf dieses Konzept der Symmetrie treffen. Tatsächlich werden wir feststellen, dass Symmetrie eines unserer mächtigsten Instrumente ist, wenn es darum geht, sämtliche Kräfte der Natur zu vereinigen.

Bestätigung der Newton'schen Gesetze

Im Lauf der Jahrhunderte sind die Newton'schen Gesetze immer wieder bestätigt worden; sie hatten tiefgreifende Auswirkungen auf die Naturwissenschaften und auch auf die Gesellschaft. Im 19. Jahrhundert bemerkten Astronomen eine seltsame Anomalie am Himmel. Die Bahn des Planeten Uranus wich von den Vorhersagen der Newton'schen Gesetze ab. Sein Orbit war keine perfekte Ellipse, sondern schlingerte ein bisschen. Entweder stimmte etwas mit den Newton'schen Gesetzen nicht, oder es gab einen bisher noch nicht entdeckten Planeten, dessen Schwerkraft an der Umlaufbahn des Uranus zupfte. Und der Glaube an die Newton'schen Gesetze war so groß, dass Physiker wie Urbain Le Verrier mühsam per Hand berechneten, wo sich dieser geheimnisvolle Planet denn verbergen könnte. Gleich beim allerersten Versuch 1846 entdeckten Astronomen den Planeten denn auch – nicht weiter als einen einzigen Winkelgrad entfernt von der vorhergesagten Stelle. Der neue Planet erhielt den Namen Neptun. Eine glänzende Bestätigung für die Newton'schen Gesetze und das erste Mal in der Geschichte, dass reine Mathematik eingesetzt wurde, um die Präsenz eines größeren Himmelskörpers nachzuweisen.

Jedes Mal, wenn Wissenschaftler eine der fundamentalen Kräfte der Natur entschlüsselten, wurde damit nicht nur ein weiteres Geheimnis der Natur gelüftet, sondern, wie bereits erwähnt, revolutionierte dies auch die Gesellschaft selbst. Die Newton'schen Gesetze legten nicht nur die Geheimnisse der Planeten und Kometen offen, sie schufen auch die Grundlage

für die Gesetze der Mechanik, die wir heute einsetzen, um Wolkenkratzer, Maschinen, Flugzeuge, Züge, Brücken, Unterseeboote und Raketen zu entwickeln. So wandten Physiker im 19. Jahrhundert beispielsweise die Newton'schen Gesetze an, um die Natur der Wärme zu erklären. Damals spekulierten Wissenschaftler, Wärme sei so etwas wie eine Flüssigkeit, die sich durch eine Substanz ausbreitet. Eingehendere Untersuchungen zeigten jedoch, dass Wärme eine Manifestation von Molekülen in Bewegung war, winzigen Stahlkugeln ähnlich, die ständig miteinander kollidieren. Die Newton'schen Gesetze erlauben uns, genau zu berechnen, wie zwei Stahlkugeln voneinander abprallen. Durch Addieren der Stöße von Billionen und Aberbillionen von Molekülen könnte man dann die genauen Eigenschaften von Wärme berechnen. (Wenn beispielsweise ein Gas in einem Gefäß erhitzt wird, dehnt es sich den Newton'schen Gesetzen zufolge aus, denn Wärme erhöht die Geschwindigkeit der Moleküle innerhalb des Gefäßes.)

Ingenieure konnten diese Berechnungen verwenden, um die Dampfmaschine zu perfektionieren. Sie konnten berechnen, wie viel Kohle nötig war, um Wasser in Dampf zu verwandeln, der dann dazu benutzt werden konnte, um Getriebe, Kolben, Räder und Hebel anzutreiben. Mit dem Aufkommen von Dampfmaschinen im 19. Jahrhundert schnellte die Energie, die einem Arbeiter zur Verfügung stand, auf viele hundert Pferdestärken hoch. Plötzlich verbanden Schienenstränge entfernte Teile der Welt, und der Fluss von Gütern, Wissen und Menschen stieg dramatisch an.

Vor der Industriellen Revolution wurden Güter von kleinen, exklusiven Gilden geschickter Handwerker hergestellt, die arbeiteten, um selbst die einfachsten Gebrauchsgegenstände herzustellen. Die Handwerker schützten die Geheimnisse ihres

Handwerks zudem eifersüchtig; daher waren Güter oft rar und teuer. Mit dem Aufkommen der Dampfmaschine und der leistungsfähigen Maschinen, die dadurch möglich wurden, konnten Güter zu einem Bruchteil der ursprünglichen Kosten hergestellt werden, was den Reichtum einer Nation insgesamt dramatisch wachsen ließ und unseren Lebensstandard steigerte.

27

Wenn ich angehenden Studenten der Ingenieurwissenschaften die Newton'schen Gesetze erkläre, versuche ich zu betonen, dass diese Gesetze nicht nur trockene, langweilige Gleichungen sind, sondern den Lauf der modernen Zivilisation verändert haben und den Reichtum und die Prosperität geschaffen haben, die wir rund um uns sehen. Manchmal zeigen wir unseren Studenten sogar einen Film von dem katastrophalen Zusammenbruch der Tacoma Narrow Bridge, der sich 1940 im Staat Washington ereignete, denn er demonstriert eindrucksvoll, was passieren kann, wenn wir die Newton'schen Gesetze falsch anwenden.

Die Newton'schen Gesetze, die darauf basieren, die Physik des Himmels mit der Physik der Erde zu vereinigen, trugen dazu bei, die erste große technologische Revolution in Gang zu setzen.

Das Geheimnis von Elektrizität und Magnetismus

28 Es sollte nach Newton weitere zweihundert Jahre bis zum nächsten großen Durchbruch dauern, und dieser ergab sich aus dem Studium von Elektrizität und Magnetismus.

Die Menschen in der Antike wussten, dass man den Magnetismus zähmen kann; die Erfindung des Kompasses durch die Chinesen machte die Kraft des Magnetismus nutzbar und trug dazu bei, ein Zeitalter der Entdeckung einzuleiten. Die Menschen der Antike fürchteten jedoch die Macht der Elektrizität. Blitze galten als Ausdruck göttlichen Zorns.

Derjenige, der schließlich die Grundlagen für dieses Gebiet schuf, war Michael Faraday, ein armer, aber fleißiger Bursche, der keinerlei formale Ausbildung besaß. Als Kind schaffte er es, eine Anstellung als Helfer in der Royal Institution in London zu erhalten. Normalerweise würde jemand mit seinem niedrigen sozialen Status zeitlebens Böden schrubben, Flaschen säubern und sich im Hintergrund halten. Dieser junge Mann war jedoch so unermüdlich engagiert und wissbegierig, dass seine Vorgesetzten ihm schließlich erlaubten, Experimente durchzuführen.

So kam es, dass Faraday im Lauf seiner Karriere einige der bedeutendsten Entdeckungen auf dem Gebiet der Elektrizität und des Magnetismus gelangen. Wenn man einen Magneten in einer Drahtspule bewegt, zeigte er, dann wird in der Spule Elektrizität erzeugt. Das war eine erstaunliche und wichtige Beobachtung, denn die Beziehung zwischen Elektrizität und

Magnetismus war zuvor völlig unbekannt. Auch das Umgekehrte ließ sich zeigen, nämlich dass sich bewegende elektrische Felder ein Magnetfeld erzeugen können.

Allmählich ging Faraday auf, dass diese beiden Phänomene tatsächlich zwei Seiten derselben Medaille waren. Diese einfache Erkenntnis trug dazu bei, das elektrische Zeitalter einzuläuten, in dem riesige Wasserkraftwerke ganze Großstädte beleuchten sollten. (Bei einem Wasserkraftwerk treibt das Flusswasser ein Rad an, das einen Magneten dreht, der Elektronen in einer Drahtspule bewegt, die die Elektrizität zu den Steckdosen bei Ihnen zu Hause schickt. Der umgekehrte Effekt, die Verwandlung elektrischer Felder in magnetische Felder, ist der Grund dafür, dass ein Staubsauger funktioniert. Die Elektrizität aus der Steckdose in der Wand versetzt einen Magneten in Drehung, und der treibt eine Pumpe an, die einen Unterdruck bewirkt und auch die Laufrollen eines Staubsaugerroboters dazu veranlasst, sich zu drehen.)

Da Faraday jedoch keinerlei formale Ausbildung besaß, verfügte er auch nicht über das mathematische Rüstzeug, seine bemerkenswerten Entdeckungen zu beschreiben. Stattdessen füllte er sein Notizbuch mit seltsamen Diagrammen, die Kraftlinien zeigten, die wie das Linienmuster aussehen, das rund um einen Magneten gestreute Eisenspäne zeigen. Er entwickelte darüber hinaus das Konzept eines Feldes, eines der bedeutendsten Konzepte in der Physik überhaupt. Ein Feld besteht aus Kraftlinien, die sich durch den ganzen Raum ausbreiten. Magnetische Feldlinien umgeben jeden Magneten, und das Magnetfeld der Erde breitet sich, vom Nordpol kommend, durch den Raum bis zum Südpol aus. Selbst die Newton'sche Gravitationstheorie lässt sich in Form von Feldern ausdrücken,

sodass die Erde um die Sonne kreist, weil sie sich im Gravitationsfeld der Sonne bewegt.

30 Faradays Entdeckung erklärte den Ursprung des magnetischen Feldes, das die Erde umgibt. Da die Erde sich dreht, drehen sich auch die elektrischen Ladungen im Inneren der Erde. Diese konstante Bewegung von Ladungen im Erdinneren schafft das Erdmagnetfeld. (Das lässt jedoch noch immer die Frage offen: Woher kommt das Magnetfeld eines Stabmagneten, in dem sich ja nichts bewegt oder dreht? Wir werden später noch auf diese Frage zurückkommen.) Heute werden alle bekannten Kräfte des Universums in Form von Feldern ausgedrückt, die von Faraday eingeführt wurden.

In Würdigung des immensen Beitrags, den Faraday zur Einführung des elektrischen Zeitalters leistete, erklärte ihn der Physiker Ernest Rutherford zum «größten wissenschaftlichen Entdecker aller Zeiten».

Faraday war überdies – zumindest für seine Zeit – auch insofern ungewöhnlich, als er es liebte, die Öffentlichkeit und sogar Kinder an seinen Entdeckungen teilhaben zu lassen. Er war berühmt für seine Weihnachtsvorlesungen, zu denen er alle Welt in die Royal Institution in London einlud, um Zeuge verblüffender Schauspiele von elektrischen Zaubereien zu werden. So betrat er beispielsweise einen großen Raum, dessen Wände mit Metallfolie ausgekleidet waren (heute sprechen wir von einem Faraday'schen Käfig), und setzte den Raum dann unter Strom. Obwohl die Metallfolie eindeutig unter Strom stand, war er völlig ungefährdet, weil sich das elektrische Feld über die gesamte Oberfläche des Raumes erstreckte, sodass es im Inneren gleich null blieb. Heutzutage wird dieser Effekt häufig genutzt, um Mikrowellengeräte und empfindliche Instrumente vor vagabundierenden elektrischen

Feldern abzuschirmen, oder um Flugzeuge zu schützen, die häufig vom Blitz getroffen werden. (Für ein Programm des Science Channel, das ich früher moderiert habe, begab ich mich damals im Boston Museum of Science in einen Faraday'schen Käfig. Gewaltige elektrische Entladungen von bis zu zwei Millionen Volt bombardierten den Käfig und erfüllten das Auditorium mit lautem Knacken und Knistern. Ich spürte jedoch überhaupt nichts.)

Die Maxwell'schen Gleichungen

32

Newton hatte gezeigt, dass sich Objekte bewegen, weil Kräfte auf sie einwirken, die sich mittels Infinitesimalrechnung beschreiben lassen. Faraday zeigte, dass sich Elektronen bewegen, weil ein Feld Kraft auf sie ausübt. Die Untersuchung von Feldern erforderte jedoch einen neuen Zweig der Mathematik, der schließlich von dem Oxfordener Mathematiker James Clerk Maxwell entwickelt wurde und als Vektoranalysis bezeichnet wird. In der gleichen Weise, wie Kepler und Galilei die Grundlagen für die Newton'sche Physik legten, ebnete Faraday den Weg für die Maxwell'schen Gleichungen.

Maxwell war ein virtuoser Mathematiker, dem erstaunliche Durchbrüche in der Physik gelangen. Er erkannte, dass sich das Verhalten von Elektrizität und Magnetismus, wie von Faraday und anderen beschrieben, in eine mathematisch präzise Sprache fassen ließ. *Ein* Gesetz besagte, dass ein sich bewegendes magnetisches Feld ein elektrisches Feld hervorrufen konnte. Ein zweites Gesetz besagte das Umgekehrte, nämlich dass ein sich bewegendes elektrisches Feld ein magnetisches Feld hervorrufen konnte.

Dann hatte Maxwell eine brillante Idee. Was wäre, wenn ein sich veränderndes elektrisches Feld ein Magnetfeld schaffen würde, das wiederum ein weiteres elektrisches Feld schaffen würde, das seinerseits ein weiteres Magnetfeld ... Und so weiter. Er erkannte, dass das Endprodukt dieser raschen Wechselbewegung eine sich bewegende Welle ist, bei der sich elektrische und magnetische Felder ständig ineinander umwandeln. Diese

unendliche Folge von Transformationen hat ein Eigenleben und schafft eine sich ausbreitende Welle schwingender elektrischer und magnetischer Felder.

Mit Hilfe der Vektoranalysis berechnete er die Geschwindigkeit dieser sich fortpflanzenden Welle und kam zu einem Ergebnis von 310 740 Kilometer pro Sekunde. Dieses Ergebnis schockierte ihn über alle Maßen. Innerhalb experimenteller Fehlergrenzen lag diese Geschwindigkeit bemerkenswert nahe an der Lichtgeschwindigkeit (die nach heutigem Kenntnisstand 299 792 Kilometer pro Sekunde beträgt). Dann machte er den nächsten kühnen Schritt und erklärte, es handele sich tatsächlich um Licht! Licht ist eine elektromagnetische Welle.

33

Maxwell schrieb damals prophetisch: «Wir können schwerlich der Schlussfolgerung ausweichen, dass Licht aus transversalen Schwingungen desselben Mediums besteht, welches die elektrischen und magnetischen Phänomene verursacht.»⁴

Heute muss jeder Physikstudent und jeder Student der Ingenieurwissenschaften die Maxwell'schen Gleichungen auswendig lernen. Sie sind die Basis für Fernsehen, Laser, Dynamos, Generatoren und vieles mehr.

Faraday und Maxwell vereinigten Elektrizität und Magnetismus. Und der Schlüssel zur Vereinheitlichung ist Symmetrie. Die Maxwell'schen Gleichungen zeigen eine Symmetrie, die als Dualität bezeichnet wird. Wenn man das elektrische Feld mit E bezeichnet und das magnetische Feld mit B , bleiben die Gleichungen für elektrische und magnetische Schwingungen auch dann dieselben, wenn man E und B vertauscht. Diese

⁴ Quotefancy.com, <https://quotefancy.com/quote/1572216/James-Clerk-Maxwell-We-can-scarcely-avoid-the-inference-that-light-consists-in-the-transverse-undulations-of-the-same-medium-which-is-the-cause-of-electric-and-magnetic-phenomena>.

Dualität impliziert, dass Elektrizität und Magnetismus zwei Manifestationen derselben Kraft sind. Daher erlaubt uns die Symmetrie zwischen E und B , Elektrizität und Magnetismus zu vereinigen, was einen der größten wissenschaftlichen Durchbrüche des 19. Jahrhunderts bedeutet.

34 Physiker waren fasziniert von dieser Entdeckung. Die Berliner Akademie der Wissenschaften setzte einen Preis für den experimentellen Nachweis dieser Maxwell'schen Wellen im Labor aus. Im Jahr 1886 gelang dieser historische Test dem Physiker Heinrich Hertz.

Zunächst erzeugte Hertz in einer Ecke seines Labors einen elektrischen Funken. In einiger Entfernung befand sich eine Drahtspule. Hertz zeigte nun, dass er durch Zünden eines Funkens einen elektrischen Strom in der Spule erzeugen und damit nachweisen konnte, wie eine neue, geheimnisvolle Welle drahtlos von einem Ort zum anderen wanderte. Diese Entdeckung kündigte die Schaffung eines neuen Kommunikationssystems an, des Radios. Im Jahr 1894 stellte Guglielmo Marconi diese neue Form der Kommunikation der Öffentlichkeit vor. Er zeigte, dass man drahtlose Botschaften mit Lichtgeschwindigkeit über den Atlantik schicken konnte.

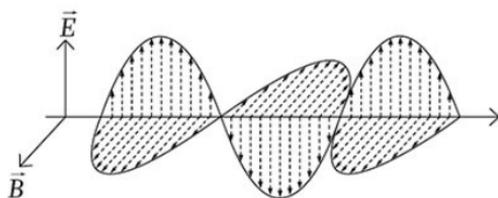


Abbildung 3. Elektrische und magnetische Felder sind zwei Seiten derselben Medaille. Oszillierende elektrische und magnetische Felder wandeln sich ineinander um und pflanzen

sich wie eine Welle fort. Licht ist *eine* Manifestation einer elektromagnetischen Welle.

Mit der Einführung des Radios gab es nun eine superschnelle, bequeme und drahtlose Möglichkeit der Kommunikation über weite Entfernungen. Historisch war das Fehlen eines schnellen und zuverlässigen Kommunikationssystems eines der großen Hindernisse für den Lauf der Geschichte. (Nach der Schlacht bei Marathon 490 v. Chr. zwischen Griechen und Persern erhielt ein armer Läufer den Auftrag, die Nachricht vom Sieg der Griechen so schnell wie möglich zu vermelden. Nachdem er 235 Kilometer weit nach Sparta gerannt war, legte er tapfer auch noch die rund 40 Kilometer nach Athen zurück, wo er der Legende nach an Erschöpfung starb. Seine Heldentat im Zeitalter vor der drahtlosen Kommunikation wird heute im modernen Marathon gefeiert.)

35

Heutzutage halten wir es für selbstverständlich, dass wir Botschaften und Informationen mühelos rund um den Globus senden können, wobei wir uns zunutze machen, dass sich eine Energieform auf vielerlei Weise in eine andere verwandeln lässt. Wenn Sie beispielsweise in ein Mobiltelefon sprechen, wandelt sich die Schallenergie Ihrer Stimme mittels einer schwingenden Membran in mechanische Energie. Diese Membran ist mit einem Magneten verbunden, der sich die Austauschbarkeit von Elektrizität und Magnetismus zunutze macht, um einen elektrischen Impuls zu erzeugen, der von einem Computer gelesen und weitergeleitet werden kann. Dieser elektrische Impuls wird dann in elektromagnetische Wellen übersetzt, die von einem nahegelegenen Mikrowellenmast aufgefangen werden. Dort wird die Botschaft verstärkt und rund um den Globus gesandt.

Den Maxwell'schen Gleichungen verdanken wir jedoch

nicht nur eine beinahe instantane Kommunikation via Radio, Mobiltelefon und Glasfaserkabel, sie eröffnen uns auch das gesamte elektromagnetische Spektrum, für das sichtbares Licht und Radiowellen nur zwei Beispiele sind. Im 17. Jahrhundert hatte Newton gezeigt, dass sich weißes Licht, das man durch ein Prisma schickt, in die Farben des Regenbogens aufspaltet. Im Jahr 1880 hatte sich William Herschel eine einfache Frage gestellt: Was liegt jenseits der Farben des Regenbogens, die sich von Rot bis Violett erstrecken? Er nahm ein Prisma, das einen Regenbogen in seinem Labor schuf, und platzierte ein Thermometer jenseits der Farbe Rot, dort, wo keine Farbe zu sehen war. Zu seiner großen Überraschung begann die Temperatur in diesem leeren Bereich zu steigen. Das hieß, es gab eine «Farbe» jenseits von Rot, die für das bloße Auge unsichtbar war, aber Energie enthielt. Sie wurde als Infrarot bezeichnet.

Heute wissen wir, dass es ein ganzes Spektrum elektromagnetischer Strahlung gibt, deren größter Teil unsichtbar ist und jeweils eine eigene Wellenlänge hat. Die Wellenlänge von Radio- und TV-Strahlung beispielweise ist größer als die von sichtbarem Licht. Die Wellenlänge der Farben des Regenbogens wiederum ist größer als die von Ultraviolett- und Röntgenstrahlung.

Unsere Augen können aufgrund der Größe unserer Netzhautzellen nur einen winzigen Bereich des gesamten elektromagnetischen Spektrums wahrnehmen.

Das bedeutet auch, dass die Realität, die wir sehen, nur ein winziger Ausschnitt aus dem kompletten elektromagnetischen Spektrum ist, die kleinste Annäherung an ein viel größeres Universum elektromagnetischer Farben. So können Bienen beispielsweise Ultraviolett sehen, das für uns unsichtbar ist, für

Bienen jedoch von großer Bedeutung, um den Sonnenstand auch an einem wolkgigen Tag bestimmen zu können. Da Blütenpflanzen ihre üppigen Farben im Lauf ihrer Evolution vor allem deshalb entwickelt haben, um Insekten wie Bienen als Bestäuber anzulocken, bedeutet dies, dass ihre Blüten unter UV-Bestrahlung manchmal noch spektakulärer aussehen als sonst.

37

Als ich als Kind davon las, fragte ich mich, warum wir nur einen so kleinen Ausschnitt aus dem elektromagnetischen Spektrum sehen können. Was für eine Verschwendung, dachte ich. Doch wie mir heute klar ist, besteht der Grund darin, dass die Länge einer elektromagnetischen Welle in etwa der Länge der Antenne entspricht, die sie erzeugt. Ihr Mobiltelefon ist nur einige Zentimeter lang, denn das entspricht der Länge der Antenne, die in etwa der Länge der ausgeschickten elektromagnetischen Wellen entspricht. Ähnlich entspricht die Länge einer Zelle in Ihrer Netzhaut in etwa der Wellenlänge der Farben, die wir sehen können. Daher können wir nur Farben wahrnehmen, deren Wellenlängen der Länge unserer Sehzellen entsprechen. All die anderen Farben des elektromagnetischen Spektrums sind für uns unsichtbar, weil sie entweder zu lang- oder zu kurzwellig sind, um von unseren Retinazellen wahrgenommen zu werden. Wenn die Zellen unserer Augen also so groß wären wie ein Haus, könnten wir vielleicht die Radio- und Mikrowellenstrahlung sehen, die um uns herumschwirrt.

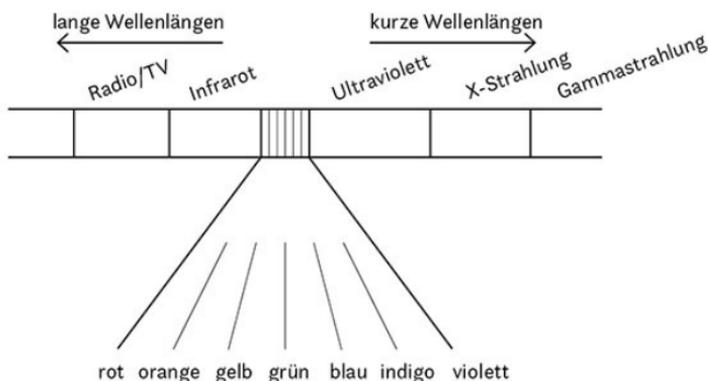


Abbildung 4. Die meisten «Farben» des elektromagnetischen Spektrums, das sich von Radio- bis zu Gammastrahlen erstreckt, sind für unsere Augen unsichtbar.

Ebenso gilt: Wenn die Sehzellen in unseren Augen die Größe von Atomen hätten, könnten wir vielleicht Röntgenstrahlen sehen.

Eine weitere Anwendung der Maxwell'schen Gleichungen ist die Art und Weise, wie elektromagnetische Strahlung den ganzen Planeten mit Energie versorgt. Während Öl und Kohle mit Schiffen und Zügen über große Entfernungen transportiert werden müssen, lässt sich elektrische Energie per Knopfdruck durch Leitungen verschicken, um ganze Städte mit Elektrizität zu versorgen.

Dies wiederum führte zu einer berühmten Kontroverse zwischen zwei Giganten des elektrischen Zeitalters, Thomas Edison und Nikola Tesla. Edison war das Genie hinter vielen elektrischen Erfindungen, Glühbirne, Film, Grammophon, Lochstreifen und viele hundert andere Wunder. Er war zudem der Erste, der eine ganze Straße mit Elektrizität ausstattete, in diesem Fall die Pearl Street in der Innenstadt von Manhattan.

Das schuf die zweite große technologische Revolution, das Zeitalter der Elektrizität.

Edison ging davon aus, dass Gleichstrom (der sich stets in dieselbe Richtung bewegt und dessen Spannung konstant ist) die beste Option sei, um elektrischen Strom zu übermitteln. Statt Gleichstrom befürwortete Tesla, der zeitweise für Edison arbeitete und half, die Grundlagen für das heutige Telekommunikationsnetz zu schaffen, hingegen Wechselstrom (bei dem der Stromfluss rund 60 Mal pro Sekunde seine Richtung ändert). Das führte zum berühmten Kampf zwischen Gleich- und Wechselstrom, in dem große Unternehmen Millionen Dollar in die beiden rivalisierenden Technologien investierten, wobei General Electric Edison unterstützte, Westinghouse hingegen auf Tesla setzte. Die Zukunft der elektrischen Revolution hing davon ab, wer aus diesem Konflikt als Sieger hervorgehen würde, Edisons Gleichstrom oder Teslas Wechselstrom.

39

Obleich Edison das Mastermind hinter der Elektrizität und einer der Architekten der modernen Welt war, verstand er die Maxwell'schen Gleichungen nicht ganz. Das sollte sich als sehr kostspieliger Fehler erweisen. Tatsächlich rümpfte er die Nase über Wissenschaftler, die sich allzu gut mit Mathematik auskannten. (Einer berühmten Anekdote zufolge forderte er Wissenschaftler gerne auf, das Volumen einer Glühbirne zu berechnen. Er lächelte dann, wenn diese das Problem mit höherer Mathematik angingen und das Volumen mühsam über die Form der Glühbirne zu berechnen versuchten. Anschließend füllte Edison einfach eine leere Glühbirne mit Wasser und schüttete es dann in einen Messbecher.)

Ingenieure wussten, dass kilometerlange Stromleitungen beim Transport von Niederspannung, wie sie Edison propagierte, eine beträchtliche Menge an Energie verlieren. Daher

waren Teslas Hochspannungsleitungen wirtschaftlicher, doch Hochspannungskabel waren zu gefährlich, um sie im Wohnzimmer zu verlegen. Die Lösung bestand darin, effiziente Hochspannungskabel zu verwenden, sie vom Elektrizitätswerk bis zur Stadt zu verlegen und dann die Hochspannung, kurz bevor sie ins Wohnzimmer gelangt, in Niederspannung umzuwandeln. Der Schlüssel lag also darin, Transformatoren zu benutzen.

Wie gesagt zeigte Maxwell, dass ein bewegtes magnetisches Feld einen elektrischen Strom hervorruft und vice versa. Das ermöglicht uns, einen Transformator zu verwenden, um die Spannung in einem Kabel rasch zu verändern. So können die elektrischen Leitungen, die ein Elektrizitätswerk verlassen, eine Spannung von vielen tausend Volt aufweisen. Doch der Transformator direkt vor dem Haus kann diese Spannung auf wenige hundert Volt verringern, was für Mikrowelle und Gefrierschrank völlig ausreicht.

Wenn diese Felder statisch sind und sich nicht verändern, dann können sie nicht ineinander umgewandelt werden. Da Wechselstrom sich ständig verändert, lässt er sich problemlos in magnetische Felder umwandeln, die ihrerseits wieder in elektrische Felder umgewandelt werden, jedoch mit einer geringeren Spannung; das heißt, dass sich die Spannung von Wechselstrom ohne große Probleme mit Hilfe von Transformatoren verändern lässt, was bei Gleichstrom (weil seine Spannung konstant ist) nicht der Fall ist.

Am Ende verlor Edison die Schlacht und die beträchtlichen Geldmittel, die er in die Gleichstromtechnologie investiert hatte. Das ist der Preis, den man zahlen muss, wenn man die Maxwell'schen Gleichungen ignoriert.

Das Ende der Wissenschaft?

Die Maxwell'schen und die Newton'schen Gleichungen erklärten nicht nur die Geheimnisse der Natur und brachten uns ein neues Zeitalter wirtschaftlichen Wohlstands, sondern ergaben in ihrer Kombination zudem eine sehr überzeugende Theorie von Allem. Zumindest von allem, was damals bekannt war.

41

Um 1900 proklamierten prominente Physiker schon das «Ende der Wissenschaft». Daher war die Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert eine aufregende Zeit für die damals lebenden Menschen. Alles, was entdeckt werden konnte, war bereits entdeckt worden – oder so sah es zumindest aus.

Die Physiker der damaligen Zeit erkannten jedoch nicht, dass die beiden großen Säulen der Naturwissenschaften, die Newton'schen und die Maxwell'schen Gleichungen, tatsächlich nicht miteinander kompatibel waren. Sie widersprachen sich.

Eine dieser großen Säulen musste fallen. Und ein sechzehnjähriger Junge hielt den Schlüssel dazu in der Hand. Dieser Junge wurde in dem Jahr geboren, in dem Maxwell starb, 1879.