

# DIE 42 GRÖSSTEN — RÄTSEL DER PHYSIK

KOSMOS



VOM QUANTENSCHAUM BIS  
ZUM RAND DES UNIVERSUMS

---

ILJA BOHNET

Dieses E-Book ist die digitale Umsetzung der Printausgabe, die unter demselben Titel bei KOSMOS erschienen ist. Da es bei E-Books aufgrund der variablen Leseinstellungen keine Seitenzahlen gibt, können Seitenverweise der Printausgabe hier nicht verwendet werden. Statt dessen können Sie über die integrierte Volltextsuche alle Querverweise und inhaltlichen Bezüge schnell komfortabel herstellen.

**DIE 42  
GRÖSSTEN  
— RÄTSEL  
DER  
PHYSIK**

**VOM QUANTENSCHAUM BIS  
ZUM RAND DES UNIVERSUMS**

---

**ILJA BOHNET**

**KOSMOS**



*»Aristotle said a bunch of stuff that was wrong. Galileo and Newton fixed things up. Then Einstein broke everything again. Now, we 've basically got it all worked out, except for small stuff, big stuff, hot stuff, cold stuff, fast stuff, heavy stuff, dark stuff, turbulence, and the concept of time.«<sup>1</sup>*

Zach Weinersmith

<sup>1</sup> Zu Deutsch etwa: »Aristoteles sagte ein paar Sachen, die nicht ganz richtig waren. Galileo und Newton konnten das so weit richten. Dann kam Einstein und hat alles wieder aufgemacht. Inzwischen aber haben wir im Grunde alles verstanden, bis auf die kleinen Sachen, die großen Sachen, die heißen Sachen, die kalten Sachen, die schnellen Sachen, die schweren Sachen, die dunklen Sachen, Turbulenzen und das Konzept der Zeit.«

Für Folker

# INHALT

GRUSSWORT

PROLOG

## 1 DIE KLASSISCHE MECHANIK

Wo die Welt der Physik noch in Ordnung zu sein scheint

**FRAGE 1: IST DIE NATUR ÜBERHAUPT DURCH PHYSIK BESCHREIBBAR?**

## 2 DIE THERMODYNAMIK

Wo Ordnung und Chaos gegeneinander antreten

**FRAGE 2: WIE LÄSST SICH UNSERE TURBULENTE WELT VERSTEHEN?**

## 3 DIE ELEKTRODYNAMIK

Wo die Beziehung zwischen Feldern eine große Rolle spielt

**FRAGE 3: WO STECKEN DIE MAGNETISCHEN MONOPOLE?**

## 4 DIE RELATIVITÄTSTHEORIE

Wo zwischen Bezugssystemen absolute Gleichberechtigung herrscht

**FRAGE 4: WAS SIND RAUM UND ZEIT?**

**FRAGE 5: WIE VIELE DIMENSIONEN HAT DAS UNIVERSUM?**

## 5 DIE QUANTENTHEORIE

Wo diskrete Sprünge und Unschärfen Hand in Hand gehen

**FRAGE 6: WORIN BESTEHT DAS MESSPROBLEM DER QUANTENMECHANIK?**

**FRAGE 7: WAS IST QUANTENGRAVITATION?**

**FRAGE 8: QUANTENCOMPUTING - DIE TECHNOLOGIE VON MORGEN?**

**FRAGE 9: WAS IST KÜNSTLICHE INTELLIGENZ UND WO LIEGEN IHRE GRENZEN?**

## **6 DIE ATOMPHYSIK**

Wo Elektronen und Photonen das Sagen haben

**FRAGE 10: GIBT ES TEILCHEN AUS DEM NICHTS?**

**FRAGE 11: WIE KONSTANT SIND DIE NATURKONSTANTEN?**

**FRAGE 12: WORIN BESTEHEN DIE RÄTSEL DER HEISSEN PLASMEN?**

## **7 DIE PHYSIK DER KONDENSIERTEN MATERIE**

Wo rätselhafte Ordnung herrscht

**FRAGE 13: WIE FUNKTIONIERT HOCHTEMPERATUR-SUPRALEITUNG?**

**FRAGE 14: LEUCHTENDE BLASEN - WIE ERKLÄRT SICH DIE SONOLUMINESZENZ?**

**FRAGE 15: TÄGLICH GENUTZT UND DOCH UNVERSTANDEN: WAS SIND EIGENTLICH GLÄSER?**

## **8 DIE MOLEKÜL- UND BIOPHYSIK**

Wo Physik, Chemie und Biologie auf Tuchfühlung gehen

**FRAGE 16: WIE LASSEN SICH QUANTENPHÄNOMENE IN VIELTEILCHENSYSTEMEN ERKLÄREN?**

**FRAGE 17: LÄSST SICH DIE DYNAMIK VON MOLEKÜLEN PHYSIKALISCH ERFASSEN?**

**FRAGE 18: WAS IST LEBEN?**

**FRAGE 19: WIE FUNKTIONIERT BEWUSSTSEIN?**

## **9 DIE HADRON- UND KERNPHYSIK**

Wo nur kleinste Abstände zur Freiheit führen

**FRAGE 20: WIE ERKLÄREN SICH DIE GEHEIMNISSE DER NUKLEONEN?**

**FRAGE 21: WAS PASSIERT ZWISCHEN QUARKS UND GLUONEN?**

**FRAGE 22: WESHALB SIND DIE MAGNETISCHEN DIPOLMOMENTE VON TEILCHEN ANOMAL?**

**FRAGE 23: WESHALB VERLETZT DIE KERNKRAFT KEINE SYMMETRIEN?**

**FRAGE 24: GIBT ES DIE INSEL DER STABILEN KERNE UND WO LIEGT SIE?**

## **10 DIE TEILCHENPHYSIK**

Wo die Welt der kleinsten Bausteine wie ein bizarrer Zoo erscheint

**FRAGE 25: WELCHE ROLLE SPIELT DAS HIGGS-FELD FÜR DIE TEILCHENMASSEN?**

**FRAGE 26: WELCHE ROLLE SPIELT DAS NEUTRINO IM UNIVERSUM?**

**FRAGE 27: WIESO GIBT ES DREI TEILCHENGENERATIONEN?**

**FRAGE 28: WESHALB GIBT ES MEHR MATERIE ALS ANTIMATERIE?**

**FRAGE 29: WIESO SIND DIE FUNDAMENTALEN WECHSELWIRKUNGEN SO UNTERSCHIEDLICH STARK?**

**FRAGE 30: GIBT ES EINE PHYSIK JENSEITS DES STANDARDMODELLS?**

# **11 DIE ASTROPHYSIK**

Wo Boten aus dem All von extremen Ereignissen zeugen

**FRAGE 31: WAS IST DUNKLE MATERIE?**

**FRAGE 32: WIE FUNKTIONIEREN KOSMISCHE BESCHLEUNIGER?**

**FRAGE 33: GRAVITATIONSWELLEN, NEUTRONENSTERNE UND SCHWARZE LÖCHER - ALLES KLAR?**

**FRAGE 34: WIE ENTSTEHEN DIE SCHWEREN ELEMENTE?**

**FRAGE 35: GIBT ES EINE KOSMISCHE ZENSUR?**

# **12 DIE KOSMOLOGIE**

Wo geheimnisvolle Kräfte ihre Hände im Spiel haben

**FRAGE 36: WAS IST DIE DUNKLE ENERGIE?**

**FRAGE 37: WELCHE GESTALT HAT DAS UNIVERSUM UND WOHIN DEHNT ES SICH AUS?**

**FRAGE 38: WIE SIEHT DIE WELT HINTER DEM KOSMISCHEN HORIZONT AUS?**

**FRAGE 39: GILT DAS KOPERNIKANISCHE PRINZIP?**

**FRAGE 40: WAS WAR AM ANFANG DES UNIVERSUMS UND WIE VERLÄUFT SEIN ENDE?**

**FRAGE 41: WAS SIND ZIEL UND ZWECK DER EVOLUTION?**

**FRAGE 42: WESHALB 42 FRAGEN?**

**DANKSAGUNG**

**WEITERFÜHRENDE LITERATUR**

**IMPRESSUM**

## GRUSSWORT

42 Rätsel der Physik – warum ausgerechnet »42«? Vielleicht schauen Sie mal in den Roman »Per Anhalter durch die Galaxis« oder Sie blättern zur 42. und letzten Frage in diesem Buch. Mit diesem Bezug nimmt uns Ilja Bohnet mit auf eine spannende Reise durch die Welt der Physik. Dabei diskutiert er mit anerkannten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, die ihn jeweils ein Stück seines Weges durch das physikalische Universum begleiten. Sie zeigen uns jedoch nicht das Erreichte, so beeindruckend es auch ist, sondern weisen uns auf die Schönheit des Ungelösten hin, des Unbekannten. Die Physik untersucht grundlegende Phänomene der Natur und bildet mit ihren Erkenntnissen eine Basis für viele andere Wissenschaften. Wir haben viele Entdeckungen gemacht und zahlreiche Erkenntnisse gewonnen. Aber jede Erkenntnis erzeugt neue Fragen, deren Beantwortung uns wieder ein Stück weiterbringt. Dieses Frage-Antwort-Spiel macht die Faszination der Physik, ja der Wissenschaft im Allgemeinen aus. Doch werden wir jemals Antworten auf all unsere Fragen finden, und gibt es eine letzte, allumfassende Antwort auf die Frage aller Fragen, nämlich die »nach dem Leben, dem Universum und dem ganzen Rest«? Ich glaube es nicht, denn wer hätte schon das Wissen, um diese Frage zu beantworten? Selbst der Supercomputer »Deep Thought« im oben genannten Roman sah sich dazu außerstande. Womit wir wieder am Anfang dieses Grußworts sind: bei seiner unverständlichen Antwort »42« nämlich, dem wunderschönen Aufhänger dieses Buches.

Tauchen Sie nun ein in das Reich des Unbekannten. Sie werden staunen, wie viel es noch zu enträtseln gibt.

*Prof. Dr. Rolf-Dieter Heuer*

Ehemaliger Generaldirektor der Großforschungseinrichtung CERN und Präsident der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG)

# PROLOG

**Weshalb dieses Buch?** Das vorliegende Werk möchte einen umfassenden Überblick zu den großen, fundamentalen Rätseln der Physik geben und die Leserschaft spielerisch über ein breites Themenspektrum hinweg für diese Naturwissenschaft begeistern. Es soll einen Eindruck davon vermitteln, was die »Physik« ausmacht, wie sie funktioniert und worin ihre prinzipiellen Grundsätze bestehen. Geboten wird eine Reise durch alle physikalischen Teilgebiete – von der klassischen Mechanik bis hin zur modernen Kosmologie. Dabei werden auch hochaktuelle Themen berührt wie Klimaforschung, Quantencomputing, künstliche Intelligenz sowie die Frage, was eigentlich »Leben« ist.

Mit rund  $2 \times 42$  Wissenschaftlern – Frauen wie Männern – konnte der Autor ungelöste Fragen aus den zwölf »kanonischen« Teilgebieten der Physik diskutieren und dabei Einblicke in die brandaktuelle Forschung gewinnen. Auf dieser Grundlage werden Rätsel aus dem Mikro-, Meso- und Makrokosmos unter die Lupe genommen (dem Allerkleinsten, dem Mittleren und dem Allergrößten) und der aktuelle Stand ihrer Erforschung dargestellt. Das Buch startet mit den drei klassischen Teilgebieten der Physik – Mechanik, Thermodynamik und Elektrodynamik –, gefolgt von den beiden weiterführenden großen physikalischen Theoriegebäuden – Relativitätstheorie und Quantentheorie. Sie bilden die Grundlage der sieben physikalischen Forschungsgebiete: Atom- und Plasmaphysik, Physik der kondensierten Materie, Molekül- und Biophysik, Hadron- und Kernphysik, Elementarteilchenphysik, Astrophysik sowie Kosmologie.

Jedem Kapitel ist eine kurze Einführung in das entsprechende Teilgebiet vorangestellt, es folgen die Diskussionen mit den Fachexperten zu den spannenden Fragestellungen. Um theoretische wie experimentelle Aspekte auszuleuchten, werden zumeist ein theoretischer Physiker und ein Experimentalphysiker zu Rate gezogen. Dabei soll sich die Leichtigkeit der Gespräche im Buch bestmöglich wiederfinden. Da die Kapitel aufeinander aufbauen, ist ein Lesen von vorne nach hinten hilfreich.

Dieser Streifzug durch die Physik und ihre offenen Fragen hat natürlich keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Zwar basiert die Liste der vorgestellten »42 größten« physikalischen Rätsel auf einer eingehenden Analyse von Veröffentlichungen der Wissenschaftsgemeinschaft zu den »most important

issues of physics«, doch stellen die Rätsel letztlich bloß eine Auswahl dar – denn selbstverständlich sind die spannenden offenen Fragen der Physik nicht auf die geschilderten 42 Fälle beschränkt. Zu diskutieren wäre überdies, welche Rätsel überhaupt als fundamentale, wirklich grundlegende Fragen gelten dürfen, welche dagegen eher supplementärer Natur sind, also vielmehr auf grundlegenden Fragestellungen aufbauen. Als fundamental werden hier Fragestellungen angesehen, die sich mit bestehenden Konzepten und Modellen nicht befriedigend beantworten lassen. Also Fragen, die grundsätzlicher Natur und von großer Relevanz sind, die gewissermaßen »Welträtsel« darstellen.

Der Begriff des Welträtsels ist tatsächlich nicht neu. Bereits der griechische Gelehrte Aristoteles hatte mit seinen »Problemata Physica« das Ziel, Welträtsel zu formulieren. Der erste Wissenschaftler jedoch, der explizit von Welträtseln sprach, war zum Ende des 19. Jahrhunderts der Physiologe Emil Heinrich du Bois-Reymond, Mitbegründer der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG). Er bewies dabei große Weitsicht, denn tatsächlich gelten die sieben Welträtsel, die er vor mehr als hundert Jahren formulierte, bis zum heutigen Tag nicht wirklich als gelöst. Sie lauten: (1) Was ist Materie und Kraft? (2) Woher kommt der Ursprung der Bewegung? (3) Woher kommt das erste Leben? (4) Woher stammt der Zweck in der Natur? (5) Woher stammt die bewusste Empfindung in den unbewussten Nerven? (6) Woher kommen das vernünftige Denken und die Sprache? (7) Woher stammt der »freie«, sich zum Guten verpflichtet fühlende Wille? Selbstverständlich finden sich diese Fragen in den 42 Rätseln dieses Buches indirekt wieder. Etwas später verfasste der Denker und Wissenschaftler Ernst Haeckel dann mit seinem Werk »Die Welträtsel« das bis heute erfolgreichste populärwissenschaftliche deutsche Buch zu diesem Thema. Es ist inzwischen völlig in Vergessenheit geraten – zu Recht, wie der Autor des vorliegenden Werkes findet, kündigt es doch von einem Allmachtsanspruch der Wissenschaft, der aus heutiger Sicht mehr als problematisch anmutet.

Lässt sich eine fundamentale Fragestellung im Sinne der Erkenntnistheorie überhaupt grundlegend und ein für alle Mal klären? Ist die Natur physikalisch vollständig beschreibbar? Der Physiologe und Physiker Hermann von Helmholtz, Kommilitone und Freund von Emil du Bois-Reymond, war diesbezüglich nur bedingt optimistisch: »Jedoch das Gebiet, welches der unbedingten Herrschaft der vollendeten Wissenschaft unterworfen werden kann, ist leider sehr eng, und schon die organische

Welt entzieht sich ihm größtenteils.« Auch Helmholtz beweist mit dieser Aussage große Weitsicht. Doch hat ihn diese nüchterne Erkenntnis nicht davon abgehalten, zahlreichen Fragestellungen mit wissenschaftlichen Methoden und großem Eifer weiter nachzugehen. So möge es auch mit den hier vorgestellten 42 ungelösten Rätseln der Physik sein: Sie sollen das Interesse und die Neugier der Leser wecken. Denn erst mit den richtigen Fragen bekommen wir auch die richtigen Antworten.

**Was ist Physik?** Bevor wir uns den großen Rätseln widmen, schauen wir zunächst auf die spannende Frage, welche Idee hinter dieser Naturwissenschaft steht, wie Physik eigentlich funktioniert. Ganz allgemein geht es in der Physik darum, über experimentelle und mathematische Methoden Zustände und Zustandsänderungen der uns umgebenden Natur gesetzmäßig zu beschreiben – vom mikroskopisch Kleinen über Alltagsphänomene unserer Umwelt bis hin zum Universum. Das Ziel ist die Enträtselung der Struktur, Dynamik und Funktionsweise der Materie, von Elementarteilchen und einzelnen Atomen bis hin zu Makromolekülen – letztlich die Entschlüsselung der fundamentalen Wechselwirkungen und Grundbausteine des Universums. Dafür werden physikalische Größen und festgelegte Einheiten verwendet, um die Größen gewissermaßen »wägbar« zu machen. Von besonderem Interesse sind die Beziehungen der physikalischen Größen zueinander, die in Gleichungen gegossen werden. Das Fundament der Physik sind empirische Beobachtungen und reproduzierbare Experimente, die mit zunehmendem Erkenntnisfortschritt stetig verfeinert und angepasst werden müssen. Dazu werden experimentelle Methoden entwickelt, wie das Streuexperiment, bei dem der zu untersuchende Gegenstand (das »Target«) mit »Sondenteilchen« beschossen wird (wie Röntgenstrahlung, Elektronen, Protonen, Neutronen oder Ionen), wobei die Art der Streuung Rückschlüsse auf die Struktur des Targets erlaubt. Physik besteht zudem aus einem engen Wechselspiel von Experiment und Theorie. Die Theorie formuliert – ausgehend von einem Konzept – zunächst eine These, die zu einem Modell erweitert und im Rahmen einer Simulation gegebenenfalls mit empirischen Messdaten überprüft werden kann. Das Ziel ist es, daraus eine Gesetzmäßigkeit abzuleiten. Dabei lassen sich erfolgreich verwendete Konzepte häufig auf verschiedene physikalische Sachverhalte übertragen und bilden damit ein breit einsetzbares Rüstzeug, um unterschiedliche Fragestellungen zu

verfolgen.

Der Begriff des »Gesetzes« ist in der Physik ganz wesentlich, ebenso wie derjenige der »Gültigkeit«. Wir werden erfahren, dass anders als in der Mathematik (oder der Theologie) in der Physik keine absoluten, sondern nur relative Wahrheiten gelten, und dass den Gesetzen in der Regel Gültigkeitsgrenzen gesetzt sind. Die Grenzverschiebungen in der Physik sind mitunter verbunden mit Paradigmenwechseln, also neuen Konzepten und Lösungsansätzen, die sich zur Beschreibung der Natur als gangbarer erweisen. Doch die vorangegangenen, alten Gesetze werden zumeist nicht einfach beiseitegeschoben und vergessen, vielmehr werden ihre Gültigkeitsbereiche begrenzt und neu abgesteckt. Das Ziel der Physik ist es, Gesetze von universellem, allgemeingültigem Charakter zu finden, die die Kriterien der Einfachheit, Effizienz, Natürlichkeit und Symmetrie erfüllen.

Wissenschaft lebt vom Disput und der Kontroverse innerhalb der Forschergemeinde. Und sie lebt von Kommunikation und Austausch. Ein berühmtes Beispiel hierfür ist die internationale Solvay-Konferenz, die seit 1911 regelmäßig in Brüssel stattfindet. Physik kennt weder nationale Grenzen noch kulturelle Unterschiede und ideologische Anschauungen. Sie baut auf der Arbeit von vielen auf – auch wenn immer wieder einzelne Namen besonders hervorstechen. Aber schon Isaac Newton bemerkte im 17. Jahrhundert: »Wenn ich weiter geblickt habe, so deshalb, weil ich auf den Schultern von Riesen stehe.«

Physik ist auch beileibe keine Männersache, es gab und gibt geniale Frauengestalten in der Physik wie Maria Mitchell, Henrietta Swan Leavitt, Marie Curie, Lise Meitner, Emmy Noether oder Donna Strickland, um nur einige zu nennen. Überdies ist in der modernen Physik zu beobachten, wie sich das Bild der Akteure erfreulicherweise zunehmend geschlechterübergreifend durchmischt. Frauen als Wissenschaftler, Professoren, Forschungsdirektoren – das ist in den modernen Wissenschaften eigentlich eine Selbstverständlichkeit – und ist es keine, muss es eine werden. In diesem Zusammenhang eine Bemerkung zur Sprache: Hier wird bewusst auf aktuelle Formen einer »geschlechtergerechten Sprache« verzichtet, weil sie aus Sicht des Autors die Lesbarkeit deutlich behindern. Wenn also im Folgenden von Forschern und Fachexperten gesprochen wird, sind durchweg männliche wie weibliche gemeint. Denn eines muss klar sein: Physik gehört allen – Frauen und Männern, Mädchen und Jungen über alle Grenzen und Kulturen hinweg.

Bevor wir nun aber zur Sache kommen, treten wir noch einen kurzen Streifzug durch die Geschichte der Physik an – denn ihre Entwicklung ist fast ebenso spannend wie die Physik selbst.

**Wie entwickelt sich die Physik?** Systematische Himmelsbeobachtungen werden bereits von den Urmenschen betrieben. Aber erst in der griechischen Antike beginnt eine Erforschung der Natur über die Formulierung physikalischer Gesetzmäßigkeiten mittels mathematischer Methoden. Im 5. Jahrhundert vor Christus schafft Platon einen mathematisch-philosophischen Rahmen dafür. Etwas später formuliert Demokrit die These, die Welt bestehe aus fundamentalen, nicht weiter teilbaren Bausteinen – den Atomen. Empedokles entwickelt die Idee, alles setze sich aus vier Grundbestandteilen zusammen (Wasser, Feuer, Erde, Luft) und sei durch zwei Wechselwirkungen miteinander verbunden (Liebe, Hass) – das antike Standardmodell der Physik sozusagen. Mit erstaunlicher Genauigkeit bestimmt Eratosthenes als Erster den Erdumfang. Der einflussreichste Naturforscher bleibt aber über viele Epochen hinweg Aristoteles. Wie er sind die alten Griechen davon überzeugt, man könne die Gesetze des Universums allein durch pures Nachdenken entdecken. Sie fühlen sich daher wenig bemüßigt, ihre Theorien durch Experimente zu überprüfen.

So schreitet die Entwicklung der Physik in Etappen und mit Unterbrechungen fort, ohne dass es bis zum 16. und 17. Jahrhundert zu entscheidenden Paradigmenwechseln kommt. Angestoßen durch die Überlegungen von Nikolaus Kopernikus zu einem heliozentrischen Weltbild bringen schließlich Tycho Brahe, Johannes Kepler und Galileo Galilei die Himmelsmechanik wie auch die irdische Mechanik durch Beobachtungen und Experimente auf eine gesetzmäßige Grundlage, die der methodischen Vorgehensweise einer modernen Physik schon sehr nahekommt.

Erst Isaac Newton gelingt es jedoch, getreu dem Prinzip »wie im Himmel, so auf Erden«, die Bewegungsgesetze Galileis und die Planetengesetze Keplers im Rahmen seiner Newtonschen Mechanik einheitlich zu beschreiben. Mit der Aufstellung seines Gravitationsgesetzes – dem ersten universellen Kraftgesetz – schafft er eine umfassende Grundlage für die klassische Physik und das Vorbild für die spätere Elektrodynamik. Kurz darauf entsteht die moderne Optik, die sich mit den Eigenschaften des Lichts auseinandersetzt. Gleichzeitig wird die Mathematik, die das formale

Fundament der Physik bildet, mit der Differential- und Integralrechnung wesentlich weiterentwickelt. Mit der Elektrizitätslehre entsteht im 18. Jahrhundert ein weiteres neues physikalisches Teilgebiet. Parallel dazu schafft die Thermodynamik (die Wärmelehre) mit der Erforschung von Gasen und Flüssigkeiten die Grundlage für das aufkommende Dampfmaschinenzeitalter und damit für die *industrielle Revolution*.

Das 19. Jahrhundert zeichnet sich aus durch epochale Erkenntnisse über den Aufbau der Materie, denen die moderne Physik gewissermaßen noch heute nachgeht: (1) Sämtliche Formen der bekannten Materie bestehen aus nur 92 chemischen Elementen. (2) Wärme ist nichts anderes als die ungeordnete Bewegung dieser chemischen Elemente und ihrer Verbindungen. (3) Elektrische, magnetische und optische Phänomene sind letztlich Ausdruck ein und desselben, nämlich von elektromagnetischen Feldern, die durch elektrisch geladene Teilchen erzeugt werden und sich in Gestalt von Licht und anderen elektromagnetischen Wellen im Raum ausbreiten. Die Einführung des Feldbegriffs durch James Clerk Maxwell gilt übrigens als einer der bedeutendsten Meilensteine des 19. Jahrhunderts und bildet gewissermaßen den Abschluss der *klassischen Physik*.

Mit der Entdeckung des Elektrons, der Röntgenstrahlung und der Radioaktivität am Ende des 19. Jahrhunderts wird das nächste, entscheidende Kapitel der Physik aufgeschlagen, und damit ein neuer Untersuchungsgegenstand gefunden – das Atom. Kurz darauf werden dann jene Entdeckungen gemacht, die zur Ausgestaltung der beiden Theoriegebäude führen, die die klassische Physik auf den Kopf stellen – die Relativitätstheorie und die Quantentheorie.

Die von Albert Einstein entwickelte *Relativitätstheorie* beruht auf der Erkenntnis, dass die Lichtgeschwindigkeit eine universale und nicht überschreitbare Grenze darstellt. Hieraus leitet Einstein das Relativitätsprinzip ab, wonach die Naturgesetze in allen Bezugssystemen (ob auf dem Erdboden, in einem fahrenden Aufzug oder in einem um die Erde kreisenden Satelliten) stets die gleiche Form haben und nichts schneller sein kann als das Licht.

Dieses recht einfache Prinzip birgt allerdings Folgerungen in sich, die unserer Alltagserfahrung zum Teil heftig widersprechen und auch die klassische Physik in ihren Grundfesten erschüttern: (1) Es gibt kein ausgezeichnetes Bezugssystem. Damit bilden Raum und Zeit eine fundamentale Einheit. (2) Deshalb gibt es aber auch weder eine absolute

Zeit noch einen absoluten Raum. Beide sind relativ. Daraus folgt (3) die Äquivalenz von Energie und Masse ( $E = m \times c^2$ ). In der allgemeinen Relativitätstheorie geht Einstein noch weiter, indem er behauptet, dass (4) Masse die Raumzeit krümmt und Gravitation die Wirkung der Raumzeitkrümmung durch Masse ist. Die Aussagen der Relativitätstheorie sind formal ähnlich wie die der klassischen Elektrodynamik: Während dort beschleunigte Ladungen zu elektromagnetischen Wellen führen, senden in der Relativitätstheorie beschleunigte Massen Gravitationswellen aus – beide bewegen sich maximal mit Lichtgeschwindigkeit. Die Relativitätstheorie liefert einen Rahmen für die beobachtete Ausdehnung des Weltalls, die von einem singulären Anfangszustand ausgegangen sein muss – dem Urknall.

Das Universum – eine Explosion. Allein das ist starker Tobak. Doch den eigentlichen Bruch mit der klassischen Physik vollzieht kurz darauf die *Quantentheorie* mit ihrer Beschreibung des mikroskopisch Kleinen. Denn die Quantentheorie muss den strengen Determinismus der klassischen Physik aufgeben, wonach physikalische Ereignisse durch die Vorbedingungen im Prinzip eindeutig festgelegt sind. Zum einen durch die Entdeckung von diskreten, also von der Natur festgelegten Zustandsänderungen im atomaren Bereich, die den Ausgangspunkt für das Bohrsche Atommodell bilden. Zum anderen durch den Welle-Teilchen-Dualismus von atomaren Teilchen, der im klassischen Verständnis unvorstellbar ist. Quantenteilchen sind beides zugleich: Welle und Teilchen. Das führt schließlich zu Heisenbergs Unschärferelation, wonach bestimmte Eigenschaften eines atomaren Teilchens wie zum Beispiel sein Ort und sein Impuls nicht gleichzeitig beliebig genau bestimmbar sind – eine Restunschärfe als Naturprinzip!

Mit der Relativitätstheorie und der Quantenphysik auf dem Fundament der klassischen Physik erschließt sich im 20. Jahrhundert erstmals ein umfassendes physikalisches Weltbild, das sich vom Mikrokosmos bis zum Makrokosmos erstreckt – vom unendlich Kleinen bis zum unendlich Großen. Dieses Weltbild erklärt die Struktur der Materie – die Atome, Atomkerne und Elementarteilchen ebenso wie den Kosmos und seine Planeten, Sonnensysteme und Galaxien. Es umfasst die entferntesten astrophysikalischen Objekte des Universums und beschreibt so unvorstellbare Phänomene wie Neutronensterne und schwarze Löcher.

Mit der Festkörperphysik entsteht ein eigenständiges faszinierendes Teilgebiet der Physik, in dem Materialien erforscht und hergestellt werden.

Die Anwendungen prägen wesentliche Teile unseres Lebens. Entwicklungen wie in der Elektronik und im Bereich der Computer bis hin zum Internet wären völlig undenkbar ohne die oben beschriebenen epochalen Erkenntnisse der Physik. Im Rahmen der Materialforschung entstehen neue »Wunderstoffe« wie zum Beispiel Halbleiter, Leuchtdioden (LEDs), Kristalle für Festkörperlaser, »Quasikristalle« als Zuschlagstoffe für hochwertigen Stahl oder topologische Isolatoren (außen leitend, innen isolierend) – um nur eine kleine Auswahl zu nennen. Die Übergänge von der Grundlagenforschung zur angewandten Forschung sind mitunter fließend, und naturgemäß sind zukünftige Anwendungen nicht von vornherein klar erkennbar. So soll schon der englische Physiker Michael Faraday, ein Pionier der Elektrizitätslehre, auf die Frage des britischen Schatzkanzlers nach dem Nutzen seiner elektrischen Untersuchungen, geantwortet haben: »Keine Ahnung, Sir, aber ich bin sicher, Sie werden schon bald Steuern darauf erheben.«

Doch nicht erst die Atombombenabwürfe auf die Städte Hiroshima und Nagasaki am Ende des Zweiten Weltkriegs zeigen die Kehrseite der physikalischen Forschung. Raubbau an der Natur, Massenproduktion, Wegwerfgesellschaft und Klimawandel machen zunehmend deutlich, welche Verantwortung den Industriegesellschaften zukommt, eine nachhaltige und lebenswerte Welt zu schaffen – und zu erhalten. Eine Verpflichtung auch für die Physik. Das Einzige, was den Menschen vom Tier unterscheidet, ist sein Verstand, gepaart mit großer Neugier. Durch die Physik kann der Mensch die Natur erkennen. Vielleicht ist auch so Immanuel Kants Appell zu verstehen, wenn er sagt: »Habe Mut, dich deines eigenen Verstandes zu bedienen!« Das wollen wir beherzigen und springen nun direkt hinein in die Materie.

# TEIL 1

## **DIE KLASSISCHE MECHANIK**

Wo die Welt der Physik noch in Ordnung zu sein  
scheint

