IN DIESEM KAPITEL

Beschreibung des Wegs zum Quantencomputer

Gesetzmäßigkeiten erkennen, auf denen Quantencomputer beruhen

Diskussion der zugrunde liegenden Konzepte

Vorstellung der Perspektiven, die Quantencomputing bietet

Skizze des Weges zur Quantenphysik

Kapitel 1
Quantencomputing – hope or hype?

Wenn in Tageszeitungen wie der FAZ, die sich an den allgemeinen Leser richtet, oder in Wirtschaftsblättern wie dem Handelsblatt, das ebenfalls nicht den Quantenphysiker im Fokus hat, in kurzen Zeitintervallen Artikel zum Quantencomputing publiziert werden, muss dieses Thema »prickelnd« sein. Dies gilt umso mehr, wenn man sieht, dass Bundes- und Landesregierungen das Thema mit mehrstelligen Millionenbeträgen fördern.

Quantenphysiker scheinen umworben zu werden, wie seinerzeit die mittalterlichen Alchemisten, die vorgaben, Gold aus sogenannten unedlen Metallen herstellen zu können. Geheimnisvolle Gesetzmäßigkeiten sollten dabei zur Anwendung kommen. Geheimnisumwittert sind auch die Gesetzmäßigkeien des Quantencomputing. Diese jedoch haben im Gegensatz zu den Hypothesen der Alchemie seit 100 Jahren jeden experimentellen Test bestanden. Anders als die Alchemie erfährt das Quantencomputing also einen Hype, der tatsächlich mit einer begründeten Hoffnung zu tun hat.

Die noch verbleibenden Fragestellungen und Herausforderungen liegen demnach nicht mehr so sehr in der Theorie, sondern in der ingenieurwissenschaftlichen Umsetzung, der Implementierung.

Mit einem analogen Problem musste sich zeitlebens Lord Babbage, ein englischer Mathematiker und Erfinder des 19. Jahrhunderts, auseinandersetzen. Lord Babbage, Inhaber des Lucasischen Lehrstuhls in Cambridge und damit in einer Linie mit Isaac Newton und Stephen Hawking, konzipierte einen mechanischen Vorläufer des modernen Computers, die »analytical engine«. Zu nennen in diesem Kontext sind auch die theoretischen Beiträge von Ada Lovelace, Tochter des Dichters Lord Byron, nach der eine bekannte Programmiersprache benannt wurde.

Die theoretischen Grundlagen der Arbeiten von Lord Babbage waren makellos. Seine benötigten Bauteile konnten zur damaligen Zeit nicht normiert in der nötigen Stückzahl gefertigt werden. Die Feinwerktechnik war im frühen 19. Jahrhundert dazu noch nicht in der Lage. Die Arbeiten zogen sich hin, sein Geldgeber verlor langsam die Geduld und drehte den Geldhahn zu. Erst vor wenigen Jahrzehnten hat man einen Teil seiner Pläne mit den heutigen Mitteln erfolgreich umsetzen können.

Könnte dem Quantencomputing ein ähnliches Schicksal wie dem Erfinder Lord Babbage und seiner analytical engine drohen? Auch für das Quantencomputing haben wir eine »makellose« Theorie, aber auch hier müssen die Bausteine in höchster Präzision vorliegen. Sie sind, ohne dass wir übertreiben müssen, das Empfindlichste, was uns das Universum zu bieten hat. Die Bausteine sind winzig und bestehen unter Umständen nur aus einem einzelnen Atom. Entsprechend reichen kleinste Energiebeträge aus, den Zustand der Bauteile irreversibel zu stören. Inwieweit die damit zusammenhängenden ingenieurtechnischen Probleme in annehmbarer Zeit gelöst werden können, ist letztlich noch nicht entschieden.

Analogcomputer – Digitalcomputer – Quantencomputer

Im Kern folgt ein Quantencomputer den Konzepten eines Analogrechners: Analogrechner benutzen keine digitalisierten Daten, also keine einfachen Folgen bestehend aus 0-en und 1-en, sondern kontinuierliche Größen. Dies können mechanische Größen (Längen, Winkel) oder auch elektrische Größen (Spannungen, Stromstärken) und andere mehr sein. Da Analogrechner »echtzeitfähig« waren, überrascht es nicht, dass sie zum Beispiel als Feuerleitrechner zur Steuerung von Flugabwehrgeschützen Verwendung fanden. Denn Analogrechner sind schnell. Im Gegensatz zu Digitalechnern beruhen sie nicht auf einem Zähl-, sondern auf einem Messprozess.

Sie rechnen (bei Licht betrachtet) nicht nur mit der Menge der natürlichen Zahlen, sondern theoretisch (!) mit allen reellen Zahlen, also auch mit $\sqrt{2}$ oder π. Dass Messfehler und Ungenauigkeiten in der Verarbeitung gleichsam zu Rundungsfehlern führen, ist für solche Anwendungen unerheblich. Sie sind darüber hinaus in der Lage, viele Berechnungen parallel durchzuführen. Hierzu genügt ein Blick auf einen der bekanntesten und verbreitetsten Analogrechner, den Rechenschieber (s. Abbildung 1.1). Mit einer einzigen Einstellung hat man zum Beispiel beliebig viele Multiplikationen in Händen.

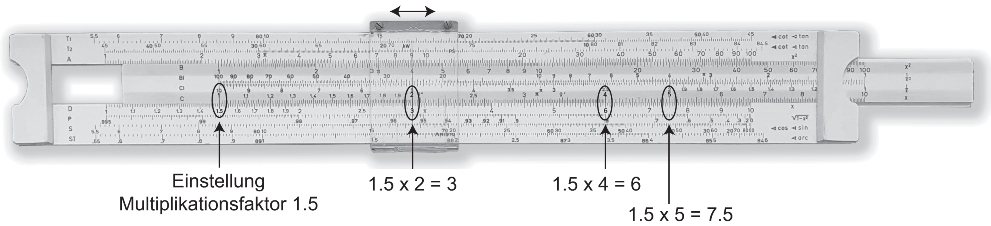

Abbildung 1.1: Der Rechenschieber als Analogrechner, der als Parallelrechner fungiert.

Schaut man sich die Skalen auf einem Rechenschieber etwas genauer an, stellt man fest, dass die Abstände zwischen den Zahlmarkierungen immer enger gewählt sind. Der Abstand zwischen zwei Zahlen a und b ist nicht proportional zur arithmetischen Zahldifferenz $|a - b|$, sondern wächst nur logarithmisch. So ist der Abstand zwischen den Markierungen von 1 und 2 genauso groß wie der Abstand zwischen den Markierungen von 2 und 4 sowie 4 und 8. Der Abstand zwischen 1 und 4 ist damit (nur) doppelt so groß, wie der zwischen 1 und 2. Der Abstand zwischen 1 und 8 ist dreimal so groß wie der zwischen 1 und 2. Verlängern wir also den Abstand zwischen 1 und 2 um den Abstand zwischen 1 und 4, so landen wir bei der Markierung von 8. Das Addieren der beiden Längen realisiert also das Multiplizieren von 2 mit 4.

Kurzum: Wenn die Längen logarithmisch markiert sind, dann ist die Zahl a markiert auf der Länge $\log a$ und die Zahl b auf der Länge $\log b$. Mit $\log a + \log b = \log a \cdot b$ führt dann die Längenaddition zur Markierung von $a \cdot b$.

Konzepte des Quantencomputers

Ohne Umweg über eine Digitalisierung werden beim Quantencomputer die dynamischen Prozesse in der Mikrowelt selbst als Rechenschritte interpretiert. Dies hat der Quantencomputer mit dem Analogcomputer gemeinsam. Anders als beim Analog- und Digitalrechner können die mikrophysikalischen Abläufe allerdings nicht mehr klassisch verstanden werden.

Hierzu gehören Phänomene der Überlagerung, bei denen man an mehrfach belichtete Filmaufnahmen denken könnte. Das kann ein einzelnes Teilchen betreffen, dass sich gewissermaßen gleichzeitig an verschiedenen Orten aufhält. Es kann sich auch um zwei oder mehr Teilchen handeln, die, obwohl gleichsam räumlich getrennt, sich in einem speziellen »verbundenen Zustand« befinden. Das klingt ein wenig nach »Spuk«, aber genau so hat es Einstein bezeichnet (und deshalb nie seinen Frieden mit dieser Vorstellungswelt gemacht).

Die quantenmechanischen Vorstellungen brechen mit einigem, was wir aus der klassischen Philosophie mitgenommen haben. So lesen wir in Wittgensteins Tractatus:

»6.3751 …Denken wir daran, wie sich dieser Widerspruch in der Physik darstellt: Ungefähr so, daß ein Teilchen nicht zu gleicher Zeit zwei Geschwindigkeiten haben kann; das heißt, daß es nicht zu gleicher Zeit an zwei Orten sein kann; das heißt, daß Teilchen an verschiedenen Orten zu einer Zeit nicht identisch sein können.«

Tatsächlich *kann* aber ein Mikroteilchen zu gleicher Zeit zwei Geschwindigkeiten haben und so weiter. Und auch bei der Überlagerung zweier getrennter Teilchen gilt nicht mehr das sogenannte »Lokalitätsprinzip«, was man im Tractatus ungefähr so formuliert vorfinden mag:

»1.21 Eines kann der Fall sein oder nicht der Fall sein und alles übrige gleich bleiben. «

Diese neuen Phänomene, also »zu gleicher Zeit an zwei Orten« und so weiter, deuten die Nutzbarmachung einer Parallelität an, die in Analogie zum Rechenschieber gesehen werden kann, auch wenn man sie damit nicht verwechseln darf.

Es ist ein Ziel dieses Buchs, diesen »Spuk« in eine formale, will heißen mathematische Form zu bringen, um ihn auf diese Weise doch wieder einfangen zu können. Dabei soll deutlich werden, wie man mit diesem »Spuk« auch noch rechnen kann. Klar wird vielleicht hier schon, dass der »Spuk«, die Überlagerungen und die Abkehr von der naiven Lokalität, als Vehikel unkonventioneller effizienter Algorithmen, eben als Basis für das Quantencomputing fungieren kann.

Verheißungen

Werden »Verheißungen« neuer Technologien beschrieben, ist es für die Beteiligten naturgemäß schwer, die Begeisterung zu zügeln und Zurückhaltung zu üben. Das konnte man in den 50er-Jahren des letzten Jahrhunderts bei der Kernenergie beobachten, ein Jahrzehnt später bei den Kunstfasern in Textilien, wieder später bei den elektronischen Netzwerken, und heute ist es das Quantencomputing. Schaut man auf dessen Potenziale nüchtern und weniger aus dem Blickwinkel einer »Hurra-Wissenschaft«, so zeigen sich dennoch genügend Anwendungsbereiche, die den Einsatz großzügiger Forschungsmittel rechtfertigen.

Höher – schneller – weiter

Der besondere Nutzen des Quantencomputing in den in Betracht kommenden Anwendungsbereichen resultiert aus der Möglichkeit, notwendige Rechenprozesse stark zu beschleunigen. Stark bedeutet dabei oft nichts weniger als exponentielle Beschleunigung gegenüber den Algorithmen auf klassischen Rechnern. Die Erweiterung eines Quantenschaltkreises um einen Baustein erhöht mit anderen Worten die Performanz um den Faktor 2. Das klingt gut, setzt aber voraus, dass mit jedem weiteren Baustein die Störanfälligkeit nicht ebenfalls »exponentiell« erhöht wird. Man vergleiche diese Störanfälligkeit mit dem Spiel »stille Post«, das wir oft als Kinder im Stuhlkreis spielten. Eine geflüsterte Nachricht wurde jeweils an den Nebenmann weitergeleitet. Es war stets lustig, zu sehen, welche Nachricht dann am Ende herauskam.

Ein heiliger Gral des Quantencomputing

Exponentielle Beschleunigung von Algorithmen bedeutet nicht nur den vordergründigen Geschwindigkeitszuwachs, sondern einen Umschwung von Quantität in Qualität. Es werden Probleme lösbar, die sich auf klassischen Digitalrechnern »hartnäckig« allen Lösungsversuchen verschließen.

Die Schnelligkeit unserer modernen Rechner – und sie *sind* sehr schnell – kann uns allzu leicht zur Ansicht verführen, dass viele Probleme mit schierer Rechenkraft gelöst (besser: erschlagen) werden könnten. Es genügt, beim Schachspiel beispielsweise »einfach« alle möglichen Zugkombinationen auszurechnen, um eine Gewinnstrategie zu erhalten. Ein anderer Klassiker betrifft das Routenproblem, bekannt unter dem Namen »Travelling Salesman«. Hierbei ist das Problem des Findens der kürzesten Route algorithmisch nahezu trivial zu programmieren. Die Programm*laufzeit* wird jedoch schnell zu einem Albtraum. Und da spielt es keine Rolle, ob wir die bestehenden Digitalrechner nochmals um etliche Zehnerpotenzen schneller machen können.

Die geschilderten Probleme und viele weitere gehören zu einer Gruppe von Problemen, die als besonders hartnäckig (»intractable«) gekennzeichnet werden. Ihre Hartnäckigkeit äußert sich darin, dass schon bei moderater Skalierung der Problemgröße die Berechnungszeiten exponentiell zunehmen. So vervielfachen sich beim Travelling-Salesman-Problem mit jeder weiteren Zunahme eines Haltepunkts die jeweiligen Rechenzeiten. Ein Digitalrechner, egal wie man seine »Taktzahlen« zu erhöhen vermag, kann über kurz oder lang hier nicht mehr mithalten: Lineares, quadratisches, kubisches (oder ganz allgemein »polynomiales«) Geschwindigkeitswachstum kann mit keinem exponentiellen Wachstum mithalten.

Es ist interessant, zu beobachten, wie vor 200 Jahren auf einem ganz anderen Gebiet, der Bevölkerungsentwicklung, das Auseinanderklaffen von linearem und exponentiellem Wachstum thematisiert und diskutiert wurde. Dem Nationalökonomen und Sozialphilosophen Robert Malthus war der latent exponentielle Bevölkerungszuwachs vor dem Hintergrund einer viel langsameren, etwa linearen Zunahme der Lebensmittelerzeugung Anlass für seine bekannten pessimistischen Schlussfolgerungen.

Quantencomputing bietet hier eine »Öffnungsklausel«. Denn mit jedem zusätzlichen Quantenbaustein verdoppelt sich die Rechenpower ebenfalls. Möglich ist dies (nur) unter Ausnutzung der gegenüber der klassischen Physik andersartigen Gesetzmäßigkeiten. Quantencomputing ist auf diese Weise – theoretisch – in der Lage, Komplexitätsbarrieren zu überwinden und den einen oder anderen »heiligen Gral« zu finden.

Zerlegung in Primfaktoren – eine Killerapplikation

Ein Klassiker potenzieller Anwendungen im Quantencomputing mit hoher praktischer Relevanz besteht in der Zerlegung einer natürlichen Zahl in ihre Primfaktoren. Das, was als ein abstraktes zahlentheoretisches Problem erscheint, spielt eine zentrale Rolle in fortgeschrittenen Verschlüsselungsverfahren. Eine effiziente Lösung für das Finden der Primfaktoren macht solche Verfahren unsicher. Das heißt, dass damit verschlüsselte Texte in vergleichsweise kurzer Zeit entschlüsselt werden können.

Eine Implementierung der Primzahlzerlegung mithilfe eines Quantenalgorithmus setzt, wie schon angedeutet, eine hohe Zahl ungestörter Quantenbausteine beziehungsweise effiziente Verfahren einer Fehlerkorrektur voraus. Dies ist ein Problem, das ingenieurtechnisch (noch) nicht leicht zu lösen ist.

Weitere Anwendungsbereiche

Mikroprozesse dienen nicht nur als Werkzeug, als Bausteine, für das Quantencomputing. In der Quantenchemie ist es zum Beispiel ein Ziel, das Verhalten von Molekülen auf der Basis der elementaren quantenmechanischen Gesetze zu berechnen. Dies könnte die Tür öffnen für die gezielte Entwicklung neuer Pharmazeutika, indem die Wechselwirkungen solcher Pharmazeutika mit Zellmembranen berechnet werden. Eine Simulation mit klassischen Digitalcomputern überschreitet auch hier schnell kritische Komplexitätsschranken. Mit quantenmechanischen Prozessen selbst wieder quantenmechanische Prozesse zu simulieren, ist ein Ansatz, der neue Möglichkeiten eröffnet.

Verheißungen im Überblick

In Aussicht gestellte Überwindungen von Komplexitätsschranken lassen einen Probleme attackieren, deren Lösungen klassisch aussichtslos erschienen:

- ✔ die Berechnung komplexer zell-physiologischer Vorgänge mit dem Ziel, »Designer-Medikamente« passgenau produzieren zu können
- ✔ die Lösung von Optimierungsaufgaben, vergleichbar dem Travelling-Salesman-Problem
- ✔ die Berechnung von Halbleitereigenschaften, allgemein Berechnungen in der Festkörperphysik
- ✔ die Bereitstellung nicht »knackbarer« Verschlüsselungsverfahren
- ✔ die Berechnung quantenmechanischer Prozesse (etwa in der Hoffnung, in der Kernfusionsforschung schnellere Fortschritte zu erzielen)

Und natürlich ist ein genereller Geschwindigkeitsgewinn manchmal einfach eine feine Sache. Das gilt nicht nur »aus Freude am (schnellen) Fahren«, wie ein bekannter Autohersteller es mal auf den Punkt brachte.

Spezialisten ist bekannt, dass das Travelling-Salesman-Problem zu einer besonders hartnäckigen Klasse, der Klasse der sogenannten NP-vollständigen Probleme, gehört. Es ist strittig, ob das Quantencomputing in der Lage sein wird, solche Probleme vollumfänglich zu lösen. Die Standpunkte hierzu scheinen manchmal mehr auf persönlichen »Vorlieben« zu beruhen. Ganz hoffnungslos erscheint (uns) das Attackieren NP-vollständiger Probleme nicht. So kann man für das unter Experten bekannte 3-SAT-Problem – es gehört ebenfalls zur Klasse der NP-vollständigen Probleme – einen sogenannten adiabatischen Quantencomputer konzipieren, der ein solches Problem lösen kann (siehe Kapitel 14). Offen ist, ob die Zeitdauer für die notwendigen langsamen (adiabatischen) Änderungen der Randbedingungen hinreichend begrenzt werden kann, um nicht doch wieder bei einem exponentiellen Zeitbedarf zu landen.

Berechenbarkeit und ihre Grenzen

Eine hinreichende Würdigung des Quantencomputing erfordert einen Blick auf die Entwicklungen, die das physikalische Weltbild in den Jahrhunderten durchlaufen hat.

Dass sich die Naturvorgänge überhaupt einer mathematischen Berechnung zugänglich zeigen, ist so selbstverständlich nicht. Die Frage, ob Geschwindigkeit in der Berechnung von Naturvorgängen ein Problem sein kann, stellte sich also gar nicht erst.

Heute sagen wir das Wetter voraus, indem wir die physikalischen Gesetze der Wärmelehre nutzen. Luftdruck, Temperatur, Wärmeaustausch und vieles mehr werden jeweils in Beziehung gesetzt, um valide Voraussagen zu erhalten. Dieselben Formeln zeigen, wie man über physikalische Eingriffe (»Geoengineering«) potenziell zielgerichtet Einfluss auf das zukünftige Geschehen nehmen kann. Gibt es Alternativen? Nun, einige Naturvölker kennen den Ritus von »Regentänzen«. Und wer entscheidet, was wahr ist? Der objektive Erfolg oder Misserfolg sollte Klarheit schaffen. Andererseits sind der Fantasie, die eigenen ans Herz gewachsenen Vorstellungen zu immunisieren, schier keine Grenzen gesetzt.

Die ersten validen Berechnungen wurden im Altertum in der Astronomie durchgeführt. Die dahinterstehenden Modellvorstellungen (ptolemäisches Weltbild zum Beispiel) waren noch stark verbesserungsbedürftig und dennoch ein erster rationaler Schritt. Verteidigt wurde dieses Weltbild am Ende nur noch aus religiösen Gründen.

Die nächsten Schritte wurden eingeleitet von Galileo Galilei und Isaac Newton, die hier stellvertretend als besondere Vertreter genannt werden. Galilei trug die Methodik des genauen Messens in die Wissenschaft und bereitete ihre Mathematisierung vor. Newton gelang ihre vorläufige Vollendung, indem er zeigen konnte, dass die im Himmel wirkenden Gesetze, die zur Himmelsmechanik führten, auch auf der Erde galten. Er brachte gewissermaßen den Himmel auf die Erde. Himmel und Erde wurden zu einem Universum mit einer einheitlichen Gesetzmäßigkeit.

Weitere Vereinheitlichungen in der Physik

Im weiteren Verlauf wurde die Mechanik ergänzt durch Untersuchungen zur Elektrizität, zum Magnetismus, zur Optik und zur Wärmelehre, um die wichtigsten Stränge zu nennen. Auch hier stellte sich immer wieder heraus, dass zunächst getrennte Erfahrungsbereiche wie die Elektrizität und der Magnetismus als zusammengehörig gelten können. Die maxwellschen Gleichungen als Rahmen für die Beschreibung der elektromagnetischen Phänomene können als ein Triumph in der Wissenschaftsgeschichte angesehen werden. Es folgte die Vereinigung von Optik und Elektromagnetismus durch den Nachweis, dass Lichtwellen als elektromagnetische Wellen angesehen werden können. Sogar die Wärmelehre konnte durch die Brille der Mechanik analysiert werden, indem man naheliegende statistische Überlegungen mit ins Spiel brachte.

Man darf sagen: Die Physik »hatte einen Lauf«.

Die Welt als prinzipiell berechenbares Uhrwerk

Auch wenn die letzte Vereinheitlichung, zum Beispiel von der Mechanik und der Elektrodynamik, noch nicht vollzogen war, so galt als verbindende Vorstellung, dass die gefundenen Gleichungen den Ablauf der in der Natur ablaufenden Prozesse bestimmen (»determinieren«). Das Universum hatte etwas von einem verallgemeinerten Uhrwerk. Und da die Gesetzmäßigkeiten in mathematische Formeln gefasst werden konnten, erschien das Universum in einem (nur) theoretischen und dennoch wichtigen Sinn als vorherberechenbar.

Der Mathematiker und Astronom Pierre Laplace erfand hierzu einen Dämon, den man »Laplaceschen Dämon« nannte. Stünde diesem Dämon der Anfangszustand des Universums und seine Gesetzmäßigkeiten zur Verfügung, läge die gesamte Zukunft des Universums offen vor ihm.

Ein Universum, das sich lückenlos berechnen lässt, strahlt eine gewisse Faszination aus (je nach Temperament mit himmlischen oder höllischen Oberschwingungen). Ein solches Universum ist denkmöglich und wird gerne als »Blockuniversum« bezeichnet. Der Zeit*ablauf* kann dabei als eine Illusion angesehen werden, was von Einstein gegenüber dem Philosophen Rudolph Carnap in einem persönlichen Gespräch exakt so formuliert wurde. Für Einstein war das ein folgerichtiger Gedanke, denn seine 1915 formulierte allgemeine Relativitätstheorie suggerierte eine solche Vorstellung. Es ist deshalb nicht verwunderlich, dass sich Einstein zeitlebens gegen die Vorstellung wehrte, Gott könne würfeln.

Hollywood wäre nicht Hollywood, wenn es solche Ideen nicht aufnehmen würde. Und so konstruiert der Held im Film »Paycheck« eine auf der allgemeinen Relativitätstheorie basierende Superlinse (eine Gravitationslinse), die um das gesamte Universum herum in sich gekrümmte Weltlinien aufspürt, womit die Zukunft sichtbar wird.

In einem wichtigen Sinne kann man Einstein und seine (spezielle und allgemeine) Relativiätstheorie zur klassischen Physik zählen, und zwar als krönenden Abschluss dieser. Die eigentliche Revolution deutete sich zeitgleich mit diesem Abschluss auf dem Gebiet der Mikrophysik an, bei dem – Ironie der Geschichte – Einstein selbst als Geburtshelfer fungierte.

Neue Vorstellungen – neue Formeln – neue Datenstrukturen

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts deutete nun vieles darauf hin, dass die Physik vor ihrer Vollendung stehen könnte. Als der spätere geistige Vater des Quantenkonzepts, Max Planck, vor der Berufswahl stand, riet ihm ein befreundeter Professor ab, noch Physik zu studieren: Dort sei im Wesentlichen schon alles entdeckt, es seien nur noch ein paar »Aufräumarbeiten« zu erledigen …

Für politisch interessierte Menschen klingt das, wenn man sich diese Bemerkung erlauben darf, ein wenig wie die Aussage des Politikwissenschaftlers Francis Fukuyama vom »Ende der Geschichte«. Leider kümmern sich weder die Physik noch die Historie um unsere Lieblingsvorstellungen.

Es ist wiederum eine Ironie des Schicksals, dass gerade Max Planck, dem man das Ende der Physik prophezeit hatte, die Tür zu einer ganz neuen Physik aufsperrte. Getrieben vom Wunsch, eine *theoretische* Begründung für die von ihm vorab gefundene Strahlungsformel heißer Körper zu finden, führte er, und das war ein revolutionärer Akt, die nach ihm benannte Naturkonstante h ein.

Hinter der später als »Plancksches Wirkungsquantum« bezeichneten Größe – ursprünglich notiert mit h, später mit $\hbar := \frac{h}{2\pi}$ bezeichnet – verbarg sich nämlich die Vorstellung kleinstmöglicher übertragbarer Energieportionen. Man mag es vergleichen mit den einzelnen Tropfen aus einem undichten Wasserhahn, die ebenfalls stets eine Mindestgröße haben. Hier deutete sich ein erstes Aufweichen des Grundsatzes an, dass die Natur keine Sprünge mache.

Die Natur zeigte zum ersten Mal einen »granularen« Charakter, der erst sichtbar wird, wenn man sie gewissermaßen durch ein starkes Vergrößerungsglas betrachtet. Eine vergleichbare Erfahrung können wir machen, wenn wir eine Lupe vor einen Bildschirmmonitor halten. Das, was vorher stetig erscheint, erweist sich bei genauem Hinsehen als gekörnt.

Aufgrund der extremen Kleinheit der planckschen Konstante – sie beträgt $6{,}610^{-34}$ Joulesekunden [Js] – war in früheren Experimenten der Physik diese Körnung nie wirklich in Erscheinung getreten. Man konnte im doppelten Wortsinne über sie »hinwegsehen«. Da sie aber bei aller Winzigkeit ungleich 0 war, erzwang sie ein neues Naturverständnis, ein neues Weltbild mit letztlich ganz anderen, eben den quantenmechanischen Gesetzmäßigkeiten.

Seine damalige Gefühlswelt beschreibt Max Planck wie folgt: *»Kurz zusammengefaßt kann ich die ganze Tat als einen Akt der Verzweiflung bezeichnen. Denn von Natur bin ich friedlichen und bedenklichen Abenteuern abgeneigt. Aber … eine theoretische Deutung mußte … um jeden Preis gefunden werden, und wäre er noch so hoch … «*

»Billardkugel-Universum« und Billardkugel-Computer

Auch Max Planck blieb wie Einstein ein Vertreter eines deterministisch zu beschreibenden Universums, eines Universums also, in dem der Zufall keinen Platz haben sollte:

»In dem Kampf zwischen Determinismus und Indeterminismus stehe ich immer noch auf Seiten des ersteren, da ich der Meinung bin, daß die aufgetauchten Schwierigkeiten im Grunde nur einer unangemessenen Fragestellung entspringen.«

Nun kam man aber um gewisse Fragestellungen nicht herum. So verloren die bisher vereinfacht als kleine Billardkugeln gedachten Teilchen in der Mikrowelt ihre »Härte« und »verschmierten«. Damit verloren aber auch die bisher benutzten Datenstrukturen zur Beschreibung dieser Teilchen ihren Sinn. Dem Teilchen eindeutige Orts- und Geschwindigkeitskoordinaten zuzuweisen, passte plötzlich nicht mehr, zumindest dann, wenn man sehr genau hinschaute. Die bisher benutzten 6-dimensionalen Vektoren zur Beschreibung der Teilchen (3 Ortskoordinaten und 3 Geschwindigkeitskomponenten) mussten ersetzt werden durch unendlich dimensionale Vektoren. Damit verbunden war ein kompletter Umbau des benutzten mathematischen Apparates, der Algorithmen. Physikalische Größen, die bis dahin als skalare Größe, als einfache Zahl, beschrieben wurden, wie zum Beispiel die Energie, wurden nun durch komplette Matrizen, allgemein »Operatoren«, ersetzt und repräsentiert. Auch die Beschreibung der Dynamik (die Bewegungsgesetze) erhielt durch die Entwicklung der sogenannten Schrödingergleichung (siehe Anhang G) eine komplett andere Form. Kurz gesagt: Es blieb kein Stein auf dem anderen.

Da stellt sich die Frage, warum die Physiker das alles mitmachten. Nun, erstens machten gar nicht alle Physiker mit. Besonders hartgesottene Experimentalphysiker wie Johannes Stark und Philipp Lenard – auf ihren Gebieten erfolgreich bis zum Nobelpreis, politisch allerdings auf die schiefe Bahn geraten – lehnten die neuen Vorstellungen rundweg ab. Erträglich wurde die neue Theorie dadurch, dass man sie als eine Erweiterung der alten Vorstellungen auffassen konnte. Es zeigte sich nämlich, dass im Grenzfall makrophysikalischer Phänomene dann, wenn die plancksche Konstante h auf Grund ihrer Kleinheit keine Rolle spielt, die neuen Gleichungen gewissermaßen in die alten klassischen Gleichungen übergingen.

Vor dem Hintergrund des Verhältnisses zwischen klassischer und moderner Physik muss die Informatik noch als eine klassische Wissenschaft angesehen werden. Ihre Modelle sind »mechanistisch«, was dadurch sichtbar wird, dass man theoretisch (!) einen Computer mittels makroskopischer Billardbälle basierend auf klassischen Bewegungsgesetzen realisieren könnte (siehe Abbildung 1.2). Die Informatik ist so gesehen noch ein Abbild der Vorstellungen eines Laplace und seines laplaceschen Dämons.

Abkehr von den Billardkugeln

Die Quantenmechanik hat, wie schon angedeutet, vom mathematischen Apparat her keinen Stein auf dem anderen gelassen. Für die Interpretation der in den neuen Datenstrukturen, den unendlich dimensionalen Vektoren, enthaltenen Komponenten hatte dies weitreichende Konsequenzen. Waren bis dahin die Informationen bezüglich Ort und Geschwindigkeit von Teilchen jeweils getrennt in einem 6-dimensionalen Vektor abgelegt, so sind hier solche Informationen unentwirrbar miteinander verwoben. Die Informationen, die den Ort eines Teilchens betreffen, beinhalten *gleichzeitig* auf subtile Weise Informationen über seine Geschwindigkeit. Dies führte Heisenberg zu seiner berühmten Unschärferelation und bahnte der Vorstellung den Weg, dass Teilchenbahnen nicht exakt vorhergesagt werden können. Damit war der Vorstellung von Unbestimmtheit (vulgo: Zufall) die Tür geöffnet.

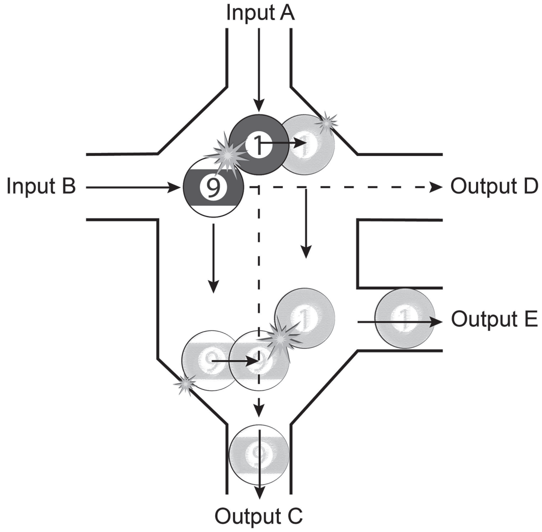

Abbildung 1.2: Ein mechanistisches Bauteil für einen Billardball-Computer. Dieses Bauteil hat zwei Eingänge, Input A und Input B, durch die jeweils Billardbälle eintreten können. Sie werden als Eingaben zweier klassischer Bits, x und y, angesehen. Tritt beim Eingang »Input A« ein Billardball (Nummer 1) ein, habe x den Wert 1. Tritt kein Billardball hier ein, habe x den Wert 0. Analog gelte für den Eingang »Input B«, dass beim Eintreten des Billardballs (hier mit der Nummer 9) das Bit y den Wert 1 erhält, ansonsten den Wert 0. Verfolgt man die Bahnen der Billardkugeln in Abhängigkeit von deren Eintreten oder Nichteintreten an den entsprechenden Eingängen, erkennt man, dass genau dann am Ausgang »Output E« eine Billardkugel austritt, wenn sowohl bei »Input A« als auch bei »Input B« eine Billardkugel eingetreten ist. »Output E« kann damit als Ausgabe des Ergebnisses von $x \wedge y$ angesehen werden. Analog können die Ausgänge »Output D« beziehungsweise »Output C« als Ausgaben der Ergebnisse von $\neg x \wedge y$ beziehungsweise $x \wedge \neg y$ angesehen werden. Man beachte, dass die Operationen prinzipiell reversibel sind, was damit zusammenhängt, dass keine der Kugeln nach den Operationen vernichtet wird.

Der im Text erwähnte unendlichdimensionale Vektor zur Beschreibung eines Mikroteilchens kann die Form einer sogenannten Wellenfunktion $\psi(x)$ annehmen. Dabei ist ψ eine komplexwertige Funktion, die jeder Ortskoordinate x (hier eindimensional genommen) eine komplexe Zahl $\psi(x)$ zuweist. Die Bedeutung der Zahl $\psi(x)$ liegt in der einer Wahrscheinlichkeit $P(x)$, mit der sich das beschriebene Teilchen am Ort x aufhält. Dazu wird der Betrag $|\psi(x)|$ der komplexen Zahl $\psi(x)$ quadriert:

$$P(x) = |\psi(x)|^2.$$

Informationen über die Geschwindigkeit des Teilchens erhält man nun über die Fouriertransformierte $\varphi(y)$ der Wellenfunktion $\psi(x)$ (die in den Formeln auftauchende plancksche Konstante $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ ist hier der Einfachheit halber weggelassen):

$$\varphi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ixy} \psi(x) dx.$$

Die Wahrscheinlichkeit $P(y)$, dass das Teilchen die Geschwindigkeit y aufweist, ist dann gleich

$$P(y) = |\varphi(y)|^2.$$

Dies zeigt, dass die Information $\varphi(y)$ über die Geschwindigkeit bereits in der Information über den Ort $\psi(x)$ via der Fouriertransformierten von $\psi(x)$ enthalten ist. Die Informationen über Ort und Geschwindigkeit sind in der mathematischen Repräsentation der Mikroteilchen nicht trennbar, was sich im Experiment bestätigt.