

**29. Dezember 1959 hat Richard Feynman diesen Vortrag auf der Jahresversammlung der Amerikanischen Physikalischen Gesellschaft am California Institute of Technology (Caltech) gehalten.**

Die englische Originalversion „There's Plenty of Room at the Bottom" wurde in der Zeitschrift „Engineering and Science" (Februar 1960, S. 20 ff.) des Caltech erstmals abgedruckt und findet steht im Internet unter <http://nano.xerox.com/nanotech/feynman.html>. „Kultur & Technik" veröffentlicht hier mit freundlicher Genehmigung der „Engineering and Science", Caltech, erstmals die vollständige deutsche Übersetzung.

## **Viel Spielraum nach unten**

**Eine Einladung in ein neues Gebiet der Physik**

**Von Richard P. Feynman**

Ich glaube, Experimentalphysiker müssen Menschen wie Kamerlingh Onnes beneiden. Er hat ein scheinbar unerschöpfliches Gebiet wie die Tieftemperaturphysik entdeckt, in dem es immer noch weiter „nach unten" geht. So einer hat dann - zumindest für eine bestimmte Zeit - ein Monopol auf wissenschaftliche Abenteuer. Percy Bridgman eröffnete durch die Entwicklung eines Verfahrens zur Erzielung höherer Drücke auch so ein neues Gebiet, in das er selbst eindrang und uns alle mit hinein zog. Ein anderes Feld, das jahrelang für Neuigkeiten sorgte, war die Entwicklung eines immer höheren Vakuums.

Ich möchte ein Gebiet beschreiben, auf dem noch wenig getan wurde, aber im Prinzip sehr viel getan werden könnte. Dieses Gebiet unterscheidet sich von den anderen ein wenig. Es geht kaum um Aussagen zur Grundlagenphysik (also im Sinne von „Was sind ‚seltsame Teilchen‘?"), sondern es geht mehr um die „seltsamen" Phänomene, die in komplexen Situationen etwa der Festkörperphysik auftreten. **Und es geht - das ist der allerwichtigste Punkt - um eine enorme Anzahl technischer Anwendungen.**

Wovon ich reden möchte, ist die Manipulation und Steuerung von Dingen im winzigen Maßstab. Kaum fällt dieses Stichwort, hört man von Miniaturisierung und wie weit sie heute fortgeschritten ist. Von Elektromotoren, die so groß sind wie der Nagel eines kleinen Fingers. Und auf dem Markt soll es ein Gerät geben, mit dem man das Vaterunser auf einen Stecknadelkopf schreiben kann. Aber das ist noch gar nichts. Das ist höchstens der primitivste, zögerliche Schritt in die Richtung, die ich hier verfolgen will. Eine atemberaubende, noch viel kleinere Welt kommt darunter zum Vorschein! Wenn man im Jahr 2000 auf heute zurückblickt, wird man sich fragen, warum erst im Jahr 1960 jemand ernsthaft begann, in diese Richtung zu forschen. Warum können wir nicht die gesamten 24 Bände der Encyclopaedia Britannica auf einen Stecknadelkopf schreiben?

Sehen wir uns doch einmal an, was das bedeuten würde. Ein Stecknadelkopf hat einen Durchmesser von etwa 1/16 Inch (=1,6 mm). Vergrößert man ihn um den Faktor 25.000, ist die Fläche des Stecknadelkopfs so groß wie die Fläche aller Seiten der Encyclopaedia Britannica. Also muß man einfach die Schriftgröße der

Encyclopaedia 25.000mal verkleinern. Ist das überhaupt möglich? Das Auflösungsvermögen des Auges beträgt etwa  $1/120$  Inch (0,2 mm) - das entspricht ungefähr dem Durchmesser eines kleinen Punkts der feinen Halbtonreproduktionen in der Encyclopaedia. Wenn man diesen 25.000mal verkleinert, mißt er immer noch 80 Angström im Durchmesser, das ist soviel wie 32 Atome eines gewöhnlichen Metalls nebeneinander. Anders ausgedrückt: Einer dieser Punkte würde in seiner Fläche immer noch 1.000 Atome enthalten. Die Größe jedes Punktes kann also leicht den Erfordernissen des Photogravierverfahrens angepaßt werden, und es steht außer Frage, daß auf dem Stecknadelkopf genügend Platz ist, um die gesamte Encyclopaedia Britannica unterzubringen.

Man kann das sogar lesen, wenn es so geschrieben wird. Stellen wir uns vor, es sei in erhabenen Lettern aus Metall geschrieben: Was also in der Encyclopaedia schwarz ist, sind erhabene Buchstaben aus Metall, die jetzt  $1/25.000$  ihrer ursprünglichen Größe haben. Wie könnten wir das lesen?

Hätten wir so etwas geschrieben, könnten wir es mit Verfahren lesen, die schon heute üblich sind. (Man wird zweifellos bessere Methoden finden, sobald wir es tatsächlich geschrieben haben, vorsichtshalber nehme ich aber einfach Verfahren, die wir heute schon kennen.) Wir würden das Metall in plastisches Material pressen, also eine Form von ihm anfertigen, dann das plastische Material sehr vorsichtig abschälen und Siliziumdioxid aufdampfen, um einen sehr dünnen Film zu erhalten. Dann würden wir diesen Film „beschatten“, indem wir das Siliziumdioxid mit Gold schräg bedampfen, so daß all die kleinen Buchstaben deutlich erscheinen. Anschließend würden wir das plastische Material vom Siliziumdioxidfilm ablösen und schließlich mit einem Elektronenmikroskop hindurchsehen!

Keine Frage also, daß wir dieses Ding ganz leicht lesen könnten, wenn es in Form von erhabenen Buchstaben auf der Stecknadel 25.000mal verkleinert würde. Außerdem wäre es zweifelsohne ein Einfaches für uns, Kopien vom Original herzustellen. Wir müßten nur dieselbe Metallplatte in ein plastisches Material pressen, und schon hätten wir ein weiteres Exemplar.

### **Wie können wir so klein schreiben?**

Hierfür gibt es noch kein Standardverfahren. Ich möchte aber behaupten, daß es nicht so schwierig ist, wie es zunächst scheint. Wir können beispielsweise die Linsen des Elektronenmikroskops umdrehen, um zu verkleinern oder zu vergrößern. Eine umgekehrt durch die Linsen des Mikroskops strahlende Ionenquelle könnte zu einem sehr kleinen Punkt fokussiert werden. Mit diesem Punkt könnten wir wie in der Bildröhre eines Fernsehers schreiben, in Zeilen von links nach rechts, und mit einer Einrichtung, die festlegt, welche Materialmenge pro Zeile abgelagert wird. Möglicherweise wäre diese Methode aufgrund der Raumladungsbegrenzung sehr langsam. Es wird schnellere Verfahren geben. Wir könnten zunächst einmal versuchen, mittels irgendeines photographischen Verfahrens eine Maske herzustellen, in der sich Löcher in Buchstabenform befinden. Dann können wir hinter den Löchern einen Lichtbogen erzeugen und Metallionen durch die Löcher ziehen. Anschließend könnten wir wieder unser Linsensystem verwenden und ein kleines Bild in Ionenform erzeugen, das das Metall auf der Stecknadel bringt. Noch einfacher wäre folgendes (obwohl ich nicht sicher bin, ob es funktioniert): Wir nehmen Licht und fokussieren es durch ein umgekehrtes optisches Mikroskop auf

einen sehr kleinen photoelektrischen Schirm. Dann lösen sich Elektronen an der Stelle vom Schirm, wo Licht hinfällt. Diese Elektronen werden von den Linsen des Elektronenmikroskops weiter verkleinert und treffen so fokussiert direkt auf die Metalloberfläche. Wird nun ein solcher Strahl das Metall wegätzen, wenn er nur lange genug einwirkt? Ich weiß es nicht. Aber falls das bei einer Metalloberfläche nicht funktioniert, muß man in jedem Fall irgendeine Oberfläche finden können, mit der unsere ursprüngliche Stecknadel so beschichtet wird, daß die auftreffenden Elektronen eine Materialveränderung hervorrufen, die wir später feststellen können. Bei diesen Instrumenten müßten wir uns auch nicht mit Intensitätsproblemen herumschlagen, wie man es von Vergrößerungen gewöhnt ist, wo man ein paar Elektronen auf einen immer größeren Schirm verteilen muß - ganz im Gegenteil. Das Licht einer Buchseite wird auf eine sehr kleine Fläche konzentriert. Daher ist es äußerst intensiv. Die paar Elektronen, die von dem photoelektrischen Schirm kommen, werden auf eine winzige Fläche verkleinert und weisen ebenfalls eine sehr hohe Intensität auf. Keine Ahnung, warum man das noch nicht gemacht hat!

Damit hätten wir also die Encyclopaedia Britannica auf einem Stecknadelkopf - nehmen wir uns nun alle Bücher der Welt vor. Die Library of Congress in den USA hat ungefähr 9 Millionen Bände, die Bibliothek des Britischen Museums 5 Millionen, und auch in der Französischen Nationalbibliothek gibt es 5 Millionen. Zweifellos gibt es Bände doppelt - sagen wir also, daß es auf der Welt etwa 24 Millionen Bände gibt, die von Interesse sind.

Was würde geschehen, wenn man sie alle im besprochenen Maßstab verkleinert drucken würde? Wieviel Platz wäre dafür nötig? Ganz klar: man benötigte die Fläche von etwa einer Million Stecknadelköpfe, da wir es nicht mehr nur mit den 24 Bänden der Encyclopaedia zu tun haben, sondern mit 24 Millionen Bänden. Die Million Stecknadelköpfe lassen sich in einem Quadrat von tausend Stecknadeln an jeder Seite oder auf einer Fläche von etwa 2,5 Quadratmeter unterbringen. Das heißt, die aus Siliziumdioxid hergestellte Replik mit dem hauchdünnen Überzug aus plastischem Material, mit der wir die Kopien angefertigt haben, befindet sich mit all diesen Informationen auf einer Fläche, die ungefähr so groß ist wie 35 Seiten der Encyclopaedia. Das sind etwa halb so viele Seiten wie in dieser Zeitschrift. Alle Information, die die gesamte Menschheit je in Büchern aufgeschrieben hat, kann man in einem Heft in der Hand herumtragen, und zwar nicht in einem Code verschlüsselt, sondern als simple Reproduktion der Originalbilder, -worte und so weiter - in kleinem Maßstab und ohne Einbuße bei der Auflösung.

Was würde unsere Bibliothekarin am Caltech wohl sagen, wenn ich ihr auf ihrem Weg von einem Gebäude zum anderen erzähle, daß in zehn Jahren all die Information, die sie nur mit Mühe und Not überschauen kann - 120.000 Bände vom Boden bis zur Decke gestapelt, Schubladen voller Karten, Lagerräume voller älterer Bücher - auf nur einer einzigen Karteikarte untergebracht werden können! Oder wenn, zum Beispiel, die Bibliothek der University of Brazil abgebrannt ist, könnten wir die Kopien aller Bücher unserer Bibliothek dahin schicken, indem wir in wenigen Stunden eine Kopie von der Originalplatte herstellen und in einen Umschlag stecken, der nicht größer oder schwerer ist als ein gewöhnlicher Luftpostbrief.

Aber: der Titel meines Aufsatzes lautet „Viel Spielraum nach unten“, nicht nur „Spielraum nach unten“. Ich habe dargelegt, daß Spielraum da ist, daß man die Größe von Dingen auf praktische Weise verkleinern kann. Jetzt möchte ich zeigen,

daß viel Spielraum da ist. Ich werde nicht darauf eingehen, wie das zu schaffen ist, sondern nur daß es im Prinzip möglich ist - oder anders gesagt: was nach den Gesetzen der Physik möglich ist. Ich werde also nicht die Anti-Schwerkraft erfinden, was nur dann möglich sein wird, wenn die Naturgesetze anders sind, als wir momentan annehmen. Ich möchte zeigen, was alles getan werden könnte, wenn die Gesetze so sind, wie wir glauben. Wir tun es nur noch nicht, einfach weil wir noch nicht dazu gekommen sind.

### **Information in kleinem Maßstab**

Angenommen, wir schreiben zur Darstellung der einzelnen Buchstaben nur ihren Informationsgehalt in einem Code aus Punkten und Strichen auf, anstatt die Bilder und alle Informationen direkt in ihrer gegenwärtigen Form zu vervielfältigen. Jeder Buchstabe stellt sechs oder sieben „Bits“ Information dar, man benötigt also nur etwa sechs oder sieben Punkte oder Striche für jeden Buchstaben. Anstatt nun alles wie vorher auf die Oberfläche eines Stecknadelkopfs zu schreiben, benutze ich jetzt auch das Innere des Materials.

Lassen Sie uns einen Punkt durch einen kleinen Fleck eines Metalls darstellen, den nächsten Strich durch einen angrenzenden Fleck eines anderen Metalls und so weiter. Vorsichtshalber nehmen wir an, daß ein Bit Information einen kleinen Würfel von 5 mal 5 mal 5 Atomen erfordert, das sind 125 Atome. Vielleicht benötigen wir hundert Atome und noch ein paar mehr, um sicherzustellen, daß die Information nicht durch Diffusion oder einen anderen Vorgang verlorengeht.

Ich habe die Anzahl der Buchstaben in der Encyclopaedia geschätzt und angenommen, daß jedes meiner 24 Millionen Bücher so groß ist wie ein Band der Encyclopaedia. Dann habe ich berechnet, wie viel Information das sind ( $10^{15}$  Bit). Für jedes Bit veranschlage ich 100 Atome. Es zeigt sich dann, daß alle Information, die der Mensch in allen Büchern der Welt sorgfältig zusammengetragen hat, in einen Würfel mit einer Kantenlänge von 1/200 Inch (0,1 mm) geschrieben werden kann - das ist das kleinste Staubkörnchen, das vom menschlichen Auge gerade noch erkannt werden kann. Es gibt also viel Spielraum nach unten! Kommen Sie mir nicht mit Mikrofilmen!

Die Tatsache, daß enorme Informationsmengen auf äußerst geringem Raum gespeichert werden können, ist Biologen natürlich längst bekannt. Erst so ließ sich verstehen, daß in der winzigsten Zelle alle Information für den Aufbau eines so komplexen Wesens wie uns selbst gespeichert werden kann. Alle Information - ob wir braune Augen haben, oder ob wir überhaupt in der Lage sind zu denken, oder daß sich im Embryo der Kieferknochen zunächst mit einem kleinen Loch in der Seite entwickeln soll, damit später ein Nerv hindurch wachsen kann - all' diese Information ist in einem sehr kleinen Teil der Zelle in Form langkettiger DNS-Moleküle enthalten, in denen ungefähr 50 Atome für ein Bit an Information über die Zelle verwendet werden.

### **Bessere Elektronenmikroskope**

Wenn ich etwas kodiert und mit 5 mal 5 mal 5 Atomen je Bit geschrieben habe, stellt sich die Frage: Wie könnte ich das heute lesen? Das Elektronenmikroskop ist noch nicht gut genug. Bei größter Sorgfalt und Mühe erreicht es nur eine Auflösung von

etwa 10 Angström. Wenn ich jetzt über diese ganzen kleinen Dinge rede, würde ich Sie gerne noch weiter beeindrucken: Wir müssen das Elektronenmikroskop um das Hundertfache verbessern. Das ist nicht unmöglich; es widerspricht nicht den Gesetzen der Elektronenbeugung. Die Wellenlänge des Elektrons in einem solchen Mikroskop beträgt nur 1/20 Angström - man sollte die einzelnen Atome eigentlich sehen können. Aber was würde es uns überhaupt bringen, wenn einzelne Atome klar und deutlich zu sehen wären?

Wir haben Freunde in anderen Fachgebieten, in der Biologie zum Beispiel. Wir Physiker schauen sie oft an und sagen: „Wißt ihr eigentlich, warum ihr so wenig Fortschritte macht?“ (Um ehrlich zu sein, kenne ich kein Gebiet, auf dem man raschere Fortschritte macht als in der heutigen Biologie.) „Ihr solltet mehr Mathematik anwenden, so wie wir.“ Sie könnten uns antworten, aber sie sind höflich. Und daher antworte ich für sie: „Damit wir schnellere Fortschritte machen können, solltet Ihr für uns das Elektronenmikroskop um das Hundertfache zu verbessern.“

Was sind die zentralen und grundlegenden Probleme der heutigen Biologie? Es sind Fragen wie: Welche Sequenz haben die Basen in der DNS? Was passiert bei einer Mutation? Wie hängt die Reihenfolge der Basen in der DNS mit der Reihenfolge von Aminosäuren im Protein zusammen? Welche Struktur hat die RNS? Besteht sie aus einer einzelnen Kette oder einer Doppelkette, und inwieweit ist sie hinsichtlich ihrer Basensequenz mit der DNS verwandt? Welchen Aufbau haben die Mikrosomen? Wie erfolgt die Proteinsynthese? Wohin geht die RNS? Wie sitzt sie? Wo sitzen die Proteine? Wohin gehen die Aminosäuren? Wo ist das Chlorophyll bei der Photosynthese, wie ist es angeordnet, wo sind die Karotinoide bei dieser Sache? Welches System wandelt Licht in chemische Energie um?

Viele dieser fundamentalen biologischen Fragen lassen sich sehr leicht beantworten. Man muß sich die Sache einfach ansehen! Man sieht die Reihenfolge der Basen in der Kette, man sieht die Struktur der Mikrosomen. Doch leider sieht das heutige Mikroskop in einem Maßstab, der einfach etwas zu grob ist. Macht das Mikroskop hundertmal stärker, und viele Probleme der Biologie würden sehr viel einfacher! Ich übertreibe natürlich, aber die Biologen wären einem sicher sehr dankbar dafür - und sie würden es der Kritik vorziehen, daß sie mehr Mathematik anwenden sollen.

Die Theorie der chemischen Prozesse beruht heute auf der theoretischen Physik. In diesem Sinne liefert die Physik das Fundament der Chemie. Aber der Chemie steht auch die Analyse zur Verfügung. Hat man eine fremde Substanz von der man wissen möchte, um was es sich dabei handelt, führt man einen langen und komplizierten Prozeß der chemischen Analyse durch. Heute kann man nahezu alles analysieren, daher komme ich mit meiner Idee etwas spät. Wenn die Physiker jedoch wollten, könnten sie sich genauso gut zu den Chemikern gesellen und sich mit dem Problem chemischer Analysen befassen. Eine Analyse irgendeiner komplizierten chemischen Substanz ließe sich ganz einfach durchführen: man müßte sie lediglich anschauen und gucken, wo die Atome sind. Der einzige Haken dabei ist, daß das Elektronenmikroskop hundertmal zu schwach ist. (Später möchte ich die Frage stellen: Können die Physiker etwas bei dem dritten Problem der Chemie tun, nämlich der Synthese? Gibt es ein physikalisches Verfahren zur Synthese einer beliebigen chemischen Substanz?)

Das Elektronenmikroskop ist deshalb so schwach, weil der Blendenwert der Linsen nur 1:1.000 beträgt. Man verfügt über keine ausreichend große numerische Apertur. Und ich weiß durchaus, daß es Lehrsätze gibt, die die Unmöglichkeit beweisen, mit achsensymmetrischen stationären Feldlinsen einen Blendenwert zu erzeugen, der größer ist als so und so, und deshalb ist das Auflösungsvermögen gegenwärtig an seinem theoretischen Maximum angelangt. Doch in jedem Lehrsatz stecken gewisse Annahmen. Warum eigentlich muß das Feld symmetrisch sein? Ich stelle das als Streitfrage hin: Gibt es keine Möglichkeit, das Elektronenmikroskop leistungsfähiger zu machen?

## **Das grandiose biologische System**

Das Beispiel aus der Biologie vom Schreiben in kleinstem Maßstab hat mich auf etwas gebracht, das machbar sein müßte. Die Biologie schreibt nicht bloß Information, sie setzt sie auch um. Ein biologisches System kann überaus klein sein. Viele Zellen sind sehr winzig, aber sie sind äußerst aktiv. Sie stellen verschiedene Substanzen her, sie wandern umher, sie wackeln und tun alle möglichen grandiosen Dinge, alles in kleinstem Maßstab. Und sie speichern Information. Man führe sich die Möglichkeit vor Augen, daß auch wir eine Sache sehr klein machen können, die tut, was wir wollen - daß wir ein Objekt herstellen können, das in diesem Maßstab operiert!

Es könnte sogar wirtschaftlich interessant sein, Dinge sehr, sehr klein zu machen. Ich möchte an einige Probleme im Zusammenhang mit Rechenmaschinen erinnern. In Computern müssen wir eine enorme Menge von Information speichern. Die oben vorgestellte Art der Schriftaufzeichnung als Metallabscheidung ist dauerhaft. Viel interessanter für einen Rechner ist eine Möglichkeit, etwas zu schreiben, es wieder zu löschen und etwas anderes zu schreiben. (Gewöhnlich deshalb, weil wir das zum Schreiben benutzte Material nicht verschwenden möchten. Könnten wir es jedoch auf mikroskopisch kleinen Raum schreiben, wäre es egal; es könnte nach dem Lesen einfach weggeworfen werden. Die Kosten des Materials sind nicht sehr hoch.)

## **Miniaturisierung des Computers**

Ich weiß nicht, wie man das in so kleinem Maßstab in der Praxis machen wird, aber ich weiß, daß Rechenmaschinen sehr groß sind und ganze Räume füllen können. Warum können wir sie nicht ganz klein machen, aus kleinen Drähten, kleinen Bauteilen - und mit klein meine ich klein. Die Drähte zum Beispiel sollten einen Durchmesser von 10 bis 100 Atomen haben, und die Schaltkreise einige Tausend Angström breit sein. Jeder, der sich etwas genauer mit der logischen Theorie von Rechnern beschäftigt hat, ist zu dem Schluß gekommen, daß die Möglichkeiten von Rechnern sehr interessant sind, wenn sie nur um mehrere Größenordnungen komplizierter gemacht werden könnten. Wenn sie Millionenmal so viele Bauteile hätten, könnten sie Urteile fällen. Sie hätten Zeit zu berechnen, was das beste Verfahren ist, um die Berechnung durchzuführen, die sie gleich durchführen werden. Sie könnten das Analyseverfahren auswählen, das aufgrund ihrer Erfahrung besser ist als eines, das wir ihnen vorgeben. Und in vielerlei anderer Weise könnten sie neue qualitative Merkmale aufweisen.

Wenn ich Ihr Gesicht betrachte, erkenne ich sofort, daß ich es schon einmal gesehen habe. (Meine Freunde werden sagen, daß ich hier ein etwas unglückliches Beispiel

zur Veranschaulichung gewählt habe. Wenigstens erkenne ich, daß es sich um einen Menschen handelt, und nicht um einen Apfel.) Doch es gibt keine Maschine, die so schnell ein Bild von einem Gesicht aufnehmen und dann sagen kann, daß es ein Mensch ist, geschweige denn, daß es derselbe Mensch ist, den man ihr vorher gezeigt hat - wenn es nicht genau dasselbe Bild ist. Ob sich das Gesicht ändert, ob ich näher am Gesicht bin oder weiter weg, ob sich das Licht ändert, ich erkenne es trotzdem. Dieser kleine Computer, den ich in meinem Schädel herumtrage, kann das ganz leicht bewerkstelligen. Die Rechner, die wir bauen, können das nicht. Die Anzahl der Bauteile in meinem Schädel ist enorm viel größer als die Anzahl der Bauteile in unseren „wunderbaren“ Rechnern. Aber unsere mechanischen Rechner sind zu groß; die Elemente in meinem Schädel sind mikroskopisch klein. Und ich möchte welche herstellen, die noch kleiner sind.

Wenn wir einen Computer bauen wollten, der alle diese wunderbaren zusätzlichen qualitativen Fähigkeiten hätte, müßten wir ihn vielleicht so groß bauen wie das Pentagon. Das hat mehrere Nachteile. Erstens braucht das zuviel Material. Es gibt vielleicht nicht genügend Germanium auf der Welt für all die Transistoren, die in dieses riesige Ding eingebaut werden müßten. Erwärmung und Stromverbrauch sind weitere Probleme. Zum Betrieb des Rechners wäre ein ganzes Kraftwerk notwendig. Aber eine in der Praxis sogar noch bedeutendere Schwierigkeit ist, daß der Rechner auf eine bestimmte Geschwindigkeit beschränkt wäre. Wegen seiner Größe ist eine gewisse Zeit erforderlich, um Information von einem Ort zum anderen zu bringen. Die Information kann nicht schneller als mit Lichtgeschwindigkeit transportiert werden. Deshalb müssen wir unsere Computer, wenn sie immer schneller und besser werden, immer kleiner machen.

Aber es gibt jede Menge Platz, um sie kleiner zu machen. Ich kann in den Gesetzen der Physik nichts erkennen, was besagt, daß die Bauteile der Rechner nicht viel, viel kleiner gemacht werden können als sie jetzt sind. Das könnte sogar bestimmte Vorteile bieten.

### **Miniaturisierung durch Aufdampfung**

Wie können wir so ein Gerät herstellen? Welche Art von Fertigungsverfahren würden wir anwenden? Da wir das Schreiben durch Positionierung von Atomen ja schon kennen, könnten wir das Material aufdampfen und dann den daneben befindlichen Isolator aufdampfen. Dann würden für die nächste Schicht eine weitere Drahtposition, ein weiterer Isolator und so weiter aufgedampft. So dampft man einfach auf, bis man einen Materialblock hat, der die Bauteile - Spulen und Kondensatoren, Transistoren und so weiter - in überaus feinen Abmessungen enthält.

Nur zum Spaß habe ich mir noch andere Möglichkeiten ausgedacht. Warum können wir diese kleinen Computer nicht irgendwie so herstellen wie die großen? Warum können wir keine Löcher bohren, Dinge abschneiden, löten, herausstanzen, verschiedene Formen gestalten, alles en miniature? Wo liegen die Grenzen bei der Verkleinerung einer Sache, ab wann kann sie nicht mehr geformt werden? Wie oft haben Sie zu sich selbst gesagt, wenn Sie sich mit etwas frustrierend Kleinem beschäftigt haben, vielleicht mit der Armbanduhr Ihrer Frau: „Wenn ich nur einer Ameise beibringen könnte, das zu tun!“ Ich möchte Ihnen hier die Möglichkeit vorstellen, einer Ameise beizubringen, wie sie einer Milbe beibringt, dies zu tun. Was

sind die Möglichkeiten kleiner, aber beweglicher Maschinen? Sie können nützlich sein oder nicht, aber es würde sicher Spaß machen, sie herzustellen.

Denken Sie an eine Maschine, zum Beispiel ein Auto, und fragen Sie nach den Problemen bei der Herstellung einer unendlich kleineren Version dieser Maschine. Angenommen, wir benötigen bei der vorbestimmten Bauweise des Automobils eine feste Präzision der Teile - vielleicht eine Genauigkeit von  $4/10.000$  Inch (0,01 mm). Wenn beispielsweise ein Teil der Zylinderform ungenauer ist, funktioniert die ganze Sache nicht besonders gut. Mache ich das Teil zu klein, muß ich mir wegen der Größe der Atome Gedanken machen: Ich kann keinen Kreis aus "Kugeln" machen, wenn der Kreis zu klein wird. Wenn nun der Fehler von  $4/10.000$  Inch einem Fehler von 10 Atomen entspricht, kann ich die Abmessungen eines Automobils 4.000mal verkleinern. Das Auto ist dann 1 mm lang. Wenn Sie Ihr Auto neu konstruieren, so daß es mit einer viel größeren Toleranz funktionieren würde - was überhaupt nicht unmöglich ist - können Sie eine viel kleinere Maschine herstellen.

Es ist interessant zu überlegen, welche Probleme solche kleinen Maschinen in sich bergen. Wenn die Teile im selben Maße belastet werden, verkleinern sich die Kräfte so wie die Fläche, die man verkleinert. Faktoren wie Gewicht und Trägheit werden also relativ unbedeutend, und die Materialfestigkeit ist im Verhältnis viel größer. Die Spannungen und Ausdehnung des Schwungrads durch die Fliehkraft hätten zum Beispiel nur dann das gleiche Verhältnis, wenn die Rotationsgeschwindigkeit im selben Verhältnis erhöht würde wie wir die Größe verkleinern. Andererseits haben die von uns verwendeten Metalle eine körnige Struktur, und das wäre bei einem kleinen Maßstab sehr ärgerlich, weil der Werkstoff nicht homogen ist. Kunststoffe, Glas und andere amorphe Dinge sind sehr viel homogener, daher müßten wir wohl unsere Maschinen aus solchen Werkstoffen fertigen.

Es gibt Probleme im Zusammenhang mit der Elektrik des Systems, also mit den Kupferdrähten und den magnetischen Teilen. Die magnetischen Eigenschaften sind bei sehr kleinem Maßstab anders wirksam als bei großem Maßstab, das „Domänenproblem“ tritt auf. Ein großer Magnet, der aus Millionen von Domänen besteht, läßt sich in sehr kleinem Maßstab nur mit einer einzigen Domäne herstellen. Die elektrische Anlage kann nicht einfach verkleinert werden, man muß sie neu planen. Ich kann mir aber keinen Grund vorstellen, warum das nicht gehen sollte.

### **Probleme bei der Schmierung**

Auch bei der Schmierung gibt es einiges Interessantes. Die wirksame Viskosität von Öl wäre im Verhältnis immer höher, wenn wir die Verkleinerung durchführen (und wenn wir die Drehzahl soweit erhöhen, wie wir können). Erhöhen wir die Drehzahl nicht so weit, und wechseln wir von Öl zu Kerosin oder einer anderen Flüssigkeit, ist das Problem nicht so gravierend. Möglicherweise aber brauchen wir gar nicht zu schmieren! Selbst wenn die Lager trocken laufen - sie könnten gar nicht heißlaufen, da die Wärme aus einer so kleinen Maschine sehr, sehr schnell entweicht. Der rasche Wärmeverlust würde verhindern, daß das Benzin explodiert, daher kommt ein Verbrennungsmotor nicht in Frage. Es können jedoch andere chemische Reaktionen angewandt werden, die Energie auch ohne Erhitzen freisetzen. Eine externe Versorgung mit elektrischer Energie wäre für so kleine Maschinen wahrscheinlich am praktischsten.

Welchen Nutzen hätten solche Maschinen? Wer weiß? Mit einem winzigen Automobil könnten höchstens die Milben umherfahren, und ich glaube, ganz so weit geht unsere christliche Einstellung nun doch nicht. Aber wir sind schon auf die Möglichkeit gestoßen, kleine Bauteile für Computer in vollständig automatisierten Fabriken herzustellen, die mit Drehbänken und anderen Werkzeugmaschinen kleinster Dimension ausgestattet sind. Die kleine Drehbank müßte übrigens nicht genau unserer großen Drehbank gleichen. Es bleibt Ihrer Phantasie überlassen, die Bauweise so zu verbessern, daß die Eigenschaften von Dingen im kleinsten Maßstab voll genutzt werden und zugleich alles vollautomatisch läuft.

Einer meiner Freunde (Albert R. Hibbs) schlägt eine sehr interessante Möglichkeit für relativ kleine Maschinen vor. Obwohl es zunächst nach einer ziemlich verrückten Idee klingt, wäre es seiner Meinung nach für die Chirurgie interessant, wenn man den Chirurgen sozusagen verschlucken könnte. Man setzt den mechanischen Chirurgen ins Blutgefäß, er geht in das Herz hinein und „sieht“ sich dort um. (Natürlich muß er dann die Daten ausspucken.) Er stellt fest, welche Herzklappe die fehlerhafte ist, nimmt ein kleines Messer und schneidet sie heraus. Andere kleine Apparate könnten dauerhaft in den Körper eingebracht werden, um ein schlecht funktionierendes Organ zu unterstützen.

Nun kommt die interessante Frage: Wie stellen wir so einen winzigen Mechanismus her? Das möchte ich Ihnen überlassen, aber lassen Sie mich eine seltsam anmutende Möglichkeit vorschlagen. Sie wissen, daß es in Atomkraftwerken Material und Maschinen gibt, die man nicht anfassen kann, weil sie radioaktiv verseucht sind. Zum Lösen von Muttern, Eindrehen von Schrauben und so weiter gibt es in Kraftwerken daher eine Reihe von Greifhänden mit Fernbedienung. Betätigt man hier eine Reihe von Hebeln, kann man dort die "Hände" steuern und hin und her drehen, wodurch man eigentlich alles sehr schön im Griff hat.

Die meisten dieser Vorrichtungen sind insofern recht einfach gebaut, als es ein bestimmtes Kabel gibt, das wie eine Marionettenschnur direkt von den Steuerelementen zu den "Händen" verläuft. Natürlich wurden aber für diesen Kontrollprozeß auch schon Servomotoren verwendet, so daß die Verbindung elektrisch und nicht mechanisch hergestellt ist. Wenn man die Hebel dreht, drehen diese einen Servomotor, was eine Änderung der elektrischen Ströme in den Drähten und somit eine Neupositionierung eines Motors am anderen Ende zur Folge hat. Ich würde gerne eine ganz ähnliche Vorrichtung bauen - Greifhände, die per Fernbedienung elektrisch arbeiten. Ich möchte aber die Greifhände besonders sorgfältig von modernen, für gewöhnlich im großen Maßstab arbeitenden Maschinenschlossern herstellen lassen, so daß die Greifhände nur noch ein Viertel so groß sind wie diejenigen, mit denen man normalerweise arbeitet. Dann haben wir eine Vorrichtung, mit der man Prozesse bei einem Viertel der Größe verrichten kann: Kleine Servomotoren mit kleinen Händen spielen mit kleinen Muttern und Schrauben, sie bohren kleine Löcher; diese sind dann viermal kleiner. Aha! Ich fertige also eine viermal kleinere Drehmaschine, viermal kleinere Werkzeuge, und ich produziere im Maßstab von einem Viertel noch einige weitere Hände, die im Verhältnis wieder ein Viertel der Größe aufweisen. Das bedeutet - von meinem Standpunkt aus - ein Sechzehntel der Größe. Wenn ich damit fertig bin, stelle ich von meinem großen System eventuell durch Transformatoren eine direkte Verdrahtung zu den 16mal kleineren Servomotoren her: Dadurch kann ich nun die 16mal kleineren Hände manipulieren.

Sie verstehen nun das Prinzip. Ein ziemlich schwieriges Programm, aber durchaus eine Möglichkeit. Sie mögen einwenden, daß man in einem Schritt wesentlich weiter gehen kann als nur von eins bis vier. So etwas muß natürlich sehr sorgfältig geplant werden, und es ist dabei nicht unbedingt notwendig, einfach Hände nach zu bauen. Bei gründlicher Überlegung könnte man wahrscheinlich noch auf ein wesentlich besseres System kommen, mit dem solche Dinge zu bewerkstelligen wären. Mit einem Pantographen, also einem Gerät zum Verkleinern und Vergrößern von Zeichnungen, läßt sich sogar schon jetzt viel mehr als der Faktor Vier in nur einem einzigen Schritt erreichen. Wegen des Spiels der Löcher und der Unregelmäßigkeiten der Ausführung kann man jedoch nicht direkt mit einem Pantographen arbeiten, der einen kleineren Pantographen herstellt, der dann einen noch kleineren Pantographen erzeugt. Das Ende des Pantographen wackelt mit einer relativ viel größeren Unregelmäßigkeit als die, mit der man seine Hände bewegt. Bei dieser Verkleinerung würde ich feststellen, daß das Ende des Pantographen am Ende des Pantographen am Ende des Pantographen so stark zittert, daß es zu überhaupt nichts Vernünftigem mehr nutze wäre.

Auf jeder Stufe muß die Präzision des Apparats verbessert werden. Wenn wir zum Beispiel mit einem Pantographen eine kleine Drehbank hergestellt haben und feststellen, daß ihre Leitspindel unregelmäßig ist - unregelmäßiger als die der großen Drehbank -, könnten wir die Leitspindel bearbeiten, bis sie in ihrem Maßstab so genau ist wie unsere ursprüngliche Leitspindel in unserem Maßstab. Wir können glatte Flächen machen, indem wir unebene Oberflächen in Dreiergruppen, also in drei Paaren, aneinander reiben. Die Flächen werden dann glatter als der Ausgangsgegenstand. Also ist es keinesfalls unmöglich, durch geeignete Verfahren die Präzision im kleinen Maßstab zu verbessern. Wenn wir solche Geräte bauen, muß daher bei jedem Schritt die Genauigkeit der Ausrüstung verbessert werden, indem wir ein Weilchen auf einer unteren Ebene arbeiten und exakte Leitspindeln, Johansen-Prüfkörper und alle anderen Materialien exakt herstellen, die wir bei genauer Maschinenarbeit auch auf der höheren Ebene verwenden. Auf jeder Ebene müssen wir verweilen und all die Teile für die nächste Ebene vorbereiten. Ein solches Programm ist langwierig und schwierig. Vielleicht können Sie sich ja ein besseres Verfahren vorstellen, um den kleinen Maßstab schneller zu erreichen.

Doch nach all dem Aufwand haben Sie bislang nur eine einzige Minidrehbank, die allerdings viertausendmal kleiner ist als gewöhnlich. Wir wollten aber eigentlich einen gewaltigen Computer bauen, indem wir Löcher mit dieser Drehbank bohren und dann kleine Unterlegscheiben für den Computer herzustellen. Wie viele Unterlegscheiben kann man mit dieser einen Drehbank herstellen?

### **Hundert winzige Hände**

Wenn ich meine ersten Greifhände im Maßstab von 1:4 fertige, mache ich gleich 'mal zehn Garnituren. Ich erzeuge zehn Garnituren von „Händen“ und verdrahte diese mit meinen ursprünglichen Hebeln, so daß sie genau synchron und parallel arbeiten. Wenn ich nun meine neuen Vorrichtungen wieder viermal so klein fertige, lasse ich von jeder zehn Kopien herstellen, so daß ich einhundert „Hände“ im Maßstab von 1:16 habe.

Wo werde ich die Million Drehbänke aufstellen, die ich schließlich haben werde? Das ist kein Problem, denn das Volumen ist viel kleiner als das von nur einer einzigen

Drehbank der vollen Größe. Wenn ich zum Beispiel eine Milliarde kleiner Drehbänke fertige, jede 1/4000 so groß wie eine gewöhnliche Drehbank, steht reichlich Material und Platz zur Verfügung, weil in der Milliarde kleiner Drehbänke weniger als 2 Prozent des Materials einer großen Drehbank enthalten sind.

Sie sehen, die Materialkosten fallen nicht ins Gewicht. Ich will daher eine Milliarde kleiner Fabriken bauen, genaue Ebenbilder voneinander, die gleichzeitig produzieren und Löcher bohren, Teile stanzen und so weiter.

Während wir den Maßstab verkleinern, treten eine Reihe interessanter Probleme auf. Nicht alle Dinge lassen sich einfach proportional verkleinern. So können Materialien durch die molekulare Anziehung (van der Waalssche Kräfte) zusammenkleben. Ein Beispiel: Nachdem man ein Teil hergestellt hat und nun die Mutter von einer Schraube dreht, fällt sie nicht zu Boden — die Schwerkraft ist einfach nicht spürbar. Es wäre sogar schwierig, die Mutter von der Schraube herunterzudrehen. Das ist ganz so wie in alten Filmen, in denen ein Mann mit völlig verklebten Händen ein Glas Wasser loszuwerden versucht. Und es wird mehrere Probleme dieser Art geben, die wir anpacken müssen.

### **Atome neu anordnen**

Dennoch scheue ich mich nicht, in letzter Konsequenz über die Frage nachzudenken, ob wir zu guter Letzt - in ferner Zukunft - die Atome so anordnen können, wie wir wollen. Die bloßen Atome, bis ins kleinste! Was würde geschehen, wenn wir die Atome einzeln so anordnen könnten, wie wir sie haben möchten (natürlich in gewissen Grenzen, man kann sie zum Beispiel nicht so plazieren, daß sie chemisch instabil sind)?

Bisher haben wir uns damit zufrieden gegeben, im Boden nach Mineralien zu graben. Wir erhitzen sie, bearbeiten sie im großen Maßstab und hoffen, eine reine Substanz mit nur soundso viel Verunreinigung zu erhalten. Wir müssen aber immer eine gewisse Atomanordnung akzeptieren, die uns die Natur vorgibt. Uns liegt beispielsweise keine Anordnung vor, wo die Fremdatome wie auf einem Damebrett genau im Abstand von 1.000 Angström oder in irgendeinem anderen Muster angeordnet sind.

Was könnten wir überhaupt mit Schichtstrukturen anfangen, die genau die richtigen Schichten aufweisen? Welche Eigenschaften würden Materialien haben, wenn wir die Atome wirklich nach unseren Vorstellungen anordnen könnten? Es wäre sehr interessant, das einmal theoretisch zu untersuchen. Ich kann mir nicht genau vorstellen, was geschehen würde. Aber ich habe keine Zweifel: Bei einer gewissen Kontrolle über die Anordnung sehr kleiner Dinge bekommen wir zweifelsohne eine weitaus größere Palette möglicher Eigenschaften der Stoffe, und damit auch viel mehr Möglichkeiten, was wir tun können.

Denken Sie etwa an ein Stück Material, in dem wir kleine Spulen und Kondensatoren (oder deren Entsprechungen) von 1.000 oder 10.000 Angström in einem Schaltkreis herstellen können, die alle auf einer großen Fläche nebeneinander angeordnet sind, wobei kleine Antennen aus dem anderen Ende herausragen - eine ganze Reihe von Schaltkreisen also. Ist es zum Beispiel möglich, aus einer ganzen Reihe von Antennen Licht abzustrahlen, wie wir Radiowellen von einer Antennenanlage

ausstrahlen, um die Radioprogramme nach Europa zu senden? Das gleiche wäre es, Licht in einer bestimmten Richtung mit sehr hoher Intensität abzustrahlen. (Es könnte allerdings sein, daß ein solcher Strahl technisch oder wirtschaftlich nicht sehr nützlich ist.)

Ich habe über einige Probleme im Zusammenhang mit dem Bau elektrischer Schaltungen im kleinen Maßstab nachgedacht. Der elektrische Widerstand ist dabei ein ernstes Problem. Baut man einen entsprechenden Schaltkreis im kleinen Maßstab, erhöht sich seine Eigenfrequenz, weil die Wellenlänge kleiner wird. Die Eindringtiefe jedoch nimmt nur mit der Quadratwurzel des Maßstabsverhältnisses ab, daher stellt Widerstand eine immer größere Schwierigkeit dar. Möglicherweise läßt sich der Widerstand durch die Nutzung von Supraleitung besiegen, wenn die Frequenz nicht zu hoch ist - oder durch andere Tricks.

### **Atome in einer kleinen Welt**

Wenn wir schließlich in der sehr, sehr kleinen Welt ankommen - sagen wir, bei Schaltkreisen aus sieben Atomen -, passiert dort einiges, was uns völlig neue Konstruktions-Möglichkeiten bietet. Atome verhalten sich im kleinen wie sonst nichts im großen, weil sie den Gesetze der Quantenmechanik unterliegen. Während wir also den Maßstab verkleinern und mit den Atomen herum fummeln, haben wir es mit gänzlich anderen Gesetzen zu tun. Man kann davon ausgehen, daß wir dann andere Dinge tun werden. Wir können verschiedene andere Fertigungsmöglichkeiten anwenden. Wir können nicht nur Schaltkreise benutzen, sondern ein System mit quantisierten Energieniveaus oder den Wechselwirkungen quantisierter Spins. Wenn wir nur genügend verkleinern, werden wir ferner feststellen, daß wir alle unsere Vorrichtungen derart in Massenproduktion herstellen können, daß sie absolut perfekte Kopien voneinander sind. Zwei große Maschinen können wir nicht so bauen, daß die Abmessungen ganz genau die gleichen sind. Wenn aber eine Maschine nur 100 Atome hoch ist, muß man sie nur bis zu einem halben Prozent genau bauen, um sicherzustellen, daß die andere Maschine exakt gleich groß ist, nämlich 100 Atome hoch!

Auf atomarer Ebene haben wir neue Arten von Kräften, neue Möglichkeiten und neue Effekte. Die Probleme der Herstellung und Reproduktion von Materialien werden durchaus neuartig sein. Wie schon gesagt, bin ich von den biologischen Phänomenen begeistert, bei denen chemische Kräfte in sich ständig wiederholender Weise genutzt werden, um alle möglichen verrückten Wirkungen hervorzurufen (eine dieser Wirkungen ist der Autor).

In meinen Augen sprechen die Prinzipien der Physik nicht gegen die Möglichkeit, Dinge Atom für Atom zu manipulieren. Das ist kein Versuch, Gesetze zu brechen, sondern es ist etwas, was im Prinzip getan werden kann, aber in der Praxis noch nicht getan wurde, einfach weil wir zu groß sind.

Schließlich können wir eine chemische Synthese durchführen. Ein Chemiker kommt zu uns und sagt: „Hier, ich will ein Molekül haben, dessen Atome so und so angeordnet sind. Stellt mir dieses Molekül her.“ Der Chemiker macht mysteriöse Dinge, wenn er ein Molekül herstellen will. Er sieht, daß die Strukturformel einen Ring hat, daher mischt er dies und jenes, er schüttelt und fummelt herum. Und am Ende eines solchen schwierigen Prozesses gelingt ihm gewöhnlich die Synthese dessen,

was er will. Bis ich meine Vorrichtungen zum Arbeiten bringe, so daß wir die Herstellung tatsächlich physikalisch durchführen können, hat er herausgefunden, wie man absolut alles synthetisieren kann, daher wird meine Vorrichtung wirklich zwecklos sein.

Es ist aber interessant, daß es im Prinzip für einen Physiker möglich wäre (glaube ich jedenfalls), jede chemische Substanz, die ein Chemiker aufschreibt, herzustellen. Erteilen Sie die Aufträge, und der Physiker synthetisiert die Substanzen. Wie? Plazieren Sie die Atome dort, wo der Chemiker sie haben will, und stellen Sie so die Substanz her. Die Probleme der Chemie und Biologie könnten stark vereinfacht werden, wenn wir auf atomarer Ebene arbeiten und dabei auch noch zusehen können - eine Entwicklung, die meiner Meinung nach nicht aufzuhalten ist. Nun könnten Sie fragen: „Wer soll das machen, und warum sollte er es machen?“ Ich habe bereits auf einige wirtschaftliche Anwendungen hingewiesen, aber ich weiß, daß Sie es vielleicht einfach nur zum Spaß machen würden. Machen Sie sich doch den Spaß! Veranstalten wir einen Wettbewerb zwischen verschiedenen Laboratorien. Ein Laboratorium soll einen winzigen Motor herstellen, den es an das andere Laboratorium sendet. Dieses soll ihn mit einem Teil zurücksenden, das in die Welle des ersten Motors paßt.

### **High-School-Wettbewerb**

Einfach spaßeshalber, und um das Interesse der Jugend an diesem Gebiet zu wecken, würde ich vorschlagen, daß jemand mit den entsprechenden Kontakten zu High-Schools eine Art High-School-Wettbewerb veranstaltet. Schließlich haben wir auf diesem Gebiet noch nicht einmal begonnen, und selbst die Kinder können kleiner schreiben, als jemals vorher geschrieben wurde. Man könnte einen Wettbewerb zwischen den High-Schools in Gang setzen. Die High-School von Los Angeles könnte ein Stecknadel an die High-School von Venice senden, auf der steht: „Was haltet Ihr davon?“ Die Stecknadel wird zurückgeschickt, und in einem i-Tüpfelchen steht „Nicht besonders toll“.

Vielleicht ist das kein Anreiz für Sie, und nur Wirtschaftlichkeit ist ein wahrer Anreiz. Dann möchte ich etwas tun, was aber im Augenblick nicht möglich ist, weil ich dazu noch nichts vorbereitet habe. Ich habe die Absicht, einen Preis in Höhe von \$1.000 für den ersten auszuschreiben, der die Information einer Buchseite so auf eine 25.000mal kleinere Fläche (im linearen Maßstab) bringt, daß sie mit einem Elektronenmikroskop gelesen werden kann.

Und wenn ich herausgefunden habe, wie ich es formulieren soll, damit ich nicht in ein Kreuzfeuer von Auseinandersetzungen über Definitionen gerate, möchte ich einen weiteren Preis über \$1.000 ausschreiben, den der erste erhalten soll, der einen funktionierenden Elektromotor herstellt, einen rotierenden Elektromotor, der von außen gesteuert werden kann und ohne Zuleitungen nur die Größe eines Würfels von 1/64 Inch (0,4 mm) Kantenlänge hat. Ich rechne nicht damit, daß diese Preise sehr lange auf Bewerber warten müssen.

*Diese Preise sind tatsächlich längst vergeben. Dieses und weitere Details aus Feynmans Leben können Sie in der Biographie „Richard Feynman. Leben und Werk des genialen Physikers“ von James Gleick nachlesen (in deutsch erschienen bei Droemer Knauer 1993).*

Richard P. Feynman (1918-1988) gilt als einer der größten und originellsten Physiker des 20. Jahrhunderts. Er studierte am MIT und in Princeton, machte seinen Ph.D. bei John A. Wheeler und arbeitete eine Zeit lang in Los Alamos an der Berechnung der kritischen Masse von Uran. Nach dem Krieg entwickelte Feynman eine einfache Methode, um das komplexe Verhalten von Elementarteilchen zu beschreiben - die „Feynman-Diagramme“. In den 50er Jahren ging er an das California Institute of Technology (Caltech) und erhielt schließlich 1965 gemeinsam mit Julian Schwinger und Shin-ichiro Tomonaga den Physik-Nobelpreis für seine Arbeiten zur Quantenelektrodynamik. Einer breiteren Öffentlichkeit wurde Feynman durch Bücher sowie seine Mitarbeit bei der Aufklärung der Challenger-Katastrophe von 1986 bekannt.