

der schwindelerregendsten Geheimnisse der Natur geworfen, von dem die Menschheit je Ahnung erhielt. Damals war er 23 Jahre alt.

Auf der Insel hielt er sich zur Linderung seiner Pollenallergie auf. Auf Helgoland – der Name bedeutet «heilige Insel» – gibt es praktisch keine Bäume und damit auch kaum Blütenstaub. «So baumlos [...] wie Helgoland mit seinem einen Strunk», heißt es bei James Joyce im *Ulysses*. Vor allem wollte er sich in das Problem vertiefen, von dem er wie besessen war: Niels Bohrs Ergebnisse bereiteten ihm schwerstes Kopfzerbrechen. Er schlief wenig, verbrachte seine Zeit in Einsamkeit und versuchte etwas zu berechnen, das Bohrs unverständliche Regeln rechtfertigte. Von Zeit zu Zeit unterbrach er die Arbeit, um auf Felsen zu klettern. In kurzen Pausen lernte er Gedichte aus Goethes *West-östlichem Divan* auswendig: aus der Sammlung, in der der deutsche Dichtorfürst seine Liebe zum Islam besingt.

Niels Bohr (1885–1962) war bereits ein angesehener Wissenschaftler. Er hatte einfache, aber seltsame Formeln erstellt, mit denen sich die Eigenschaften der chemischen Elemente bestimmen ließen, noch bevor sie gemessen werden konnten. Sie sagten zum Beispiel die Frequenz des Lichts vorher, das die Elemente in erhitztem Zustand aussenden – also die Farbe, die sie annehmen. Ein beachtlicher Erfolg. Allerdings waren die Formeln unvollständig: Die Intensität des emittierten Lichts ließ sich nicht berechnen.

Aber vor allem hatten diese Formeln etwas wirklich Absurdes: Sie beinhalteten ohne ersichtlichen Grund die Annahme, dass Elektronen den Atomkern nur auf *genau festgelegten* Bahnen umkreisten, in Abständen und mit Energien, die ebenfalls *genau festgelegt* waren. Und dann «sprangen» sie wie von Zauberhand von einer Kreisbahn auf die andere. Die ersten «Quantensprünge». Warum nur diese Umlaufbahnen? Was sind diese überraschenden «Sprünge» von einer Bahn auf die andere? Welche unbekannte Kraft kann ein Elektron so lenken, dass es sich derart seltsam verhält?

Das Atom ist der Grundbaustein von allem. Wie funktioniert es? Wie bewegen sich die Elektronen in seinem Inneren? Seit über zehn Jahren

beschäftigten sich Bohr und seine Kollegen im Kern mit diesen Fragen. Ergebnislos.

In Kopenhagen hatte Bohr die brilliantesten jungen Physiker, die er hatte auftreiben können, um sich geschart, um mit ihnen – wie in der Werkstatt eines Renaissancemalers – an den Geheimnissen des Atoms zu forschen. Zu ihnen zählte auch der herausragende, hochintelligente, überhebliche und unverschämte Wolfgang Pauli (1900–1958), der ein Freund und ehemaliger Kommilitone Heisenbergs war. Trotz seiner Überheblichkeit hatte er dem großen Bohr seinen Freund mit dem Hinweis vorgestellt, wenn man weiterkommen wolle, müsse man ihn rufen. Bohr hörte auf ihn und lud auch Heisenberg, der in Göttingen als Assistent des Physikers Max Born (1882–1970) arbeitete, im Herbst 1924 nach Kopenhagen ein. Heisenberg blieb einige Monate, in denen er mit Bohr vor Tafeln voller Formeln diskutierte. Der junge Bursche und der Meister unternahmen ausgedehnte gemeinsame Spaziergänge in den Bergen und redeten über die Geheimnisse des Atoms, über Physik und Philosophie. [2]

Heisenberg hatte sich intensiv mit dem Problem auseinandergesetzt, wie die anderen alles Mögliche versucht. Nichts funktionierte. Keine vernünftige Kraft schien die Elektronen auf den seltsamen Kreisbahnen und bei Bohrs seltsamen Sprüngen leiten zu können. Und doch ermöglichten es diese Bahnen und Sprünge, die atomaren Phänomene präzise vorherzusagen. Ratlosigkeit herrschte.

Entmutigung treibt dazu an, nach äußersten Mitteln zu suchen. Heisenberg entschloss sich in der Einsamkeit auf der Nordseeinsel, radikale Ideen zu erkunden.

Radikal waren im Grunde die Ideen gewesen, mit denen Einstein (1879–1955) zwanzig Jahre zuvor die Welt verblüfft hatte. Einsteins radikales Denken hatte sich als wirksam erwiesen. Pauli und Heisenberg liebten seine Physik. Einstein war Mythos. War gar der Moment gekommen, so fragten sie sich, einen ebenso radikalen Schritt zu wagen, um aus der Sackgasse herauszufinden, in die sie in der Frage der Elektronen in den

Atomen geraten waren? Würde ihnen ein solcher Schritt gelingen? Mit Anfang zwanzig gibt man sich noch zügellos Träumen hin.

Einstein hatte gezeigt, dass die am tiefsten verwurzelten Überzeugungen irrig sein können. Das offensichtlich Erscheinende ist womöglich falsch. Selbstverständliche Annahmen aufzugeben kann zu einem besseren Verständnis führen. Er hatte gelehrt, sich nur auf das zu stützen, was wir sehen, nicht auf das, von dem wir glauben, dass es existieren müsse.

Pauli äußerte diese Ideen gegenüber Heisenberg häufig. Die beiden jungen Männer hatten an einem berausenden Honig genascht. Sie hatten die Diskussionen über die Beziehung zwischen Wirklichkeit und Erfahrung verfolgt, die sich zu Beginn des 20. Jahrhunderts durch die österreichische und deutsche Philosophie zogen. Ernst Mach (1838–1916), der auf Einstein entscheidenden Einfluss ausgeübt hatte, sagte die Notwendigkeit voraus, das Wissen rein auf Beobachtungen zu stützen und sich von jedweder stillschweigenden «metaphysischen» Annahme freizumachen. Dies sind die unterschiedlichen Zutaten, die sich wie die chemischen Bestandteile eines Sprengstoffs im Denken des ganz jungen Heisenberg mischen, als er sich im Sommer 1925 auf die Insel Helgoland zurückzieht.

Und dort hat er die zündende Idee, auf die man nur in der grenzenlosen Radikalität seiner Zwanziger kommt. Die Idee, die dazu bestimmt ist, die gesamte Physik, die gesamten Naturwissenschaften, unsere gesamte Konzeption von der Welt auf den Kopf zu stellen. Die Idee, die die Menschheit, wie ich glaube, nach wie vor nicht verdaut hat.

*ħ ħ*

Heisenbergs sprunghafter Gedanke ist so waghalsig wie einfach. Niemand schaffte es, die Kraft zu ermitteln, die die Elektronen in ihrem bizarren Verhalten leitete? Gut, dann verzichten wir auf eine neue Kraft. Nutzen wir stattdessen die, die wir schon kennen: die elektrische Kraft, die das Elektron zum Kern hinzieht. Wir finden keine neuen Bewegungsgesetze,

die Bohrs Kreisbahnen und Sprünge erklären? Gut, behalten wir die uns schon bekannten Bewegungsgesetze eben unverändert bei.

Ändern wir stattdessen unsere Art, das Elektron zu denken. Verzichten wir auf die Vorstellung, dass ein Elektron ein Objekt sei, das sich auf einer Kreisbahn bewegt. Verzichten wir darauf, die Bewegung des Elektrons zu beschreiben. Beschreiben wir nur das, was wir *von außen beobachten*: die Intensität und Frequenz des vom Elektron abgestrahlten Lichts. Stützen wir alles nur auf die Größen, die *beobachtbar* sind. Das ist die Idee.

Heisenberg versucht, das Verhalten des Elektrons neu zu berechnen, indem er dazu nur die beobachteten Größen heranzieht: die Intensität und das Spektrum des emittierten Lichts. Von ihnen ausgehend, versucht er die Energie des Elektrons neu zu berechnen.

Was man beobachtet, sind die Effekte der Sprünge des Elektrons von einer Kreisbahn Bohrs zur anderen. Heisenberg ersetzt die physikalischen Variablen durch *Tabellen*, in denen in der Kopfzeile die jeweilige Endbahn und in der ersten Spalte die jeweilige Ausgangsbahn eingetragen ist. Jedes durch den Schnitt einer Zeile und einer Spalte gebildete Tabellenfeld beschreibt den Sprung von einer bestimmten Umlaufbahn zu einer anderen. Heisenberg bringt die Zeit auf der Insel im Versuch zu, diese Tabellen zur Berechnung von etwas zu nutzen, das die Bohr'schen Regeln erklärt. Er schläft kaum. Es gelingt ihm nicht, die Berechnungen für das Elektron im Atom durchzuführen. Sie sind zu schwierig. Er versucht es mit einem einfacheren System: einem Pendel. In diesem vereinfachten Fall sucht er nach den Bohr'schen Regeln.

Am 7. Juni werden die Dinge allmählich klar:

«Als sich bei den ersten Termen wirklich der Energiesatz bestätigte [sich mit den Bohr'schen Regeln zu decken schien], geriet ich in eine gewisse Erregung, sodass ich bei den folgenden Rechnungen immer wieder Rechenfehler machte. Daher wurde es fast drei Uhr nachts, bis das endgültige Ergebnis vor mir lag. [Er] hatte sich in allen Gliedern als gültig erwiesen [...]

[Und] so konnte ich an der mathematischen Widerspruchsfreiheit und Geschlossenheit der damit angedeuteten Quantenmechanik nicht mehr zweifeln. Im ersten Augenblick war ich zutiefst erschrocken. Ich hatte das Gefühl, durch die Oberfläche der atomaren Erscheinungen hindurch auf einen tief darunter liegenden Grund von merkwürdiger innerer Schönheit zu schauen, und es wurde mir fast schwindlig bei dem Gedanken, da ich nun dieser Fülle von mathematischen Strukturen nachgehen sollte, die die Natur dort unten vor mir ausgebreitet hatte.» [3]

Worte, die einen erschauern lassen. Durch die Oberfläche der Phänomene zeigt sich ein «Grund von merkwürdiger innerer Schönheit». Sie erinnern an die Worte, die Galileo Galilei (1564–1641/42) schrieb, als er in seinen Messungen zum Fall von Objekten entlang einer schiefen Ebene eine mathematische Regelmäßigkeit entdeckte, das erste von der Menschheit entdeckte mathematische Gesetz, das die Bewegung von Objekten auf der Erde beschreibt: «Keine Erregung ist wie die, wenn man hinter der Unordnung des Anscheins das mathematische Gesetz erblickt.»

*ħ ħ*

Am 9. Juni 1925 kehrt Heisenberg von Helgoland an seine Universität zurück: Göttingen. Er schickt eine Abschrift der Ergebnisse an seinen Freund Pauli mit dem Kommentar, es sei alles noch sehr vage und ihm unklar, aber es sehe so aus, als würden sich die Elektronen nicht mehr auf Kreisbahnen bewegen.

Am 9. Juli überreicht er eine Abschrift der Arbeit Max Born, dem Professor, bei dem er Assistent ist (nicht zu verwechseln mit Niels Bohr in Kopenhagen), mit dem Hinweis, er habe eine verrückte Arbeit verfasst und es fehle ihm der Mut, sie zur Veröffentlichung bei einer Fachzeitschrift einzureichen. Er bittet ihn, sie zu lesen und ihn zu empfehlen.

Am 25. Juli reicht Max Born Heisenbergs Arbeit bei der «Zeitschrift für Physik» ein. [4]

Intuitiv hat er die Bedeutung des von seinem jungen Assistenten vollzogenen Schritts erkannt. Er versucht die Dinge zu klären. Er zieht