

2. Zwei und ein halbes Jahrtausend bis zur Entdeckung des Atoms

Richard Feynman, ein sehr bekannter amerikanischer Physiker, wurde einmal gefragt: "Was halten Sie für die bedeutendste Erkenntnis der Naturwissenschaft im 20. Jahrhundert?" Seine Antwort lautete: "Materie ist aus Atomen aufgebaut."

2.1 Die Begriffe "Atom" und "Element" in der Antike

Am Rande dieser Vorlesung sollen auch einige grundsätzliche Aspekte naturwissenschaftlicher Forschung behandelt werden. In der ersten Stunde war es das Messen. Heute wollen wir über die Rolle der Begriffe in der Naturwissenschaft sprechen. Von Kant stammt der prägnante Satz: "Gedanken ohne Inhalte sind leer, Anschauungen ohne Begriffe sind blind." (Kritik der reinen Vernunft). Vereinfacht gesagt: Wir können an die Natur keine sinnvollen Fragen stellen, wenn wir nicht bereits vorher gewisse Vorstellungen davon haben, wie die Natur sein könnte. Man kann z.B. nicht nach Atomen suchen, wenn der Begriff der Teilbarkeit oder Unteilbarkeit nicht schon vorher als Möglichkeit gedacht worden ist. Oder noch anders gesagt: Jedes Experiment beginnt mit einer Hypothese, also einem Produkt des Denkens.

Der Beitrag der antiken Philosophen zur modernen Naturwissenschaft besteht darin, wichtige Fragen über die Natur gestellt und Konzepte und Begriffe geprägt zu haben. Sie haben nicht experimentiert, deshalb waren ihre Überlegungen spekulativ. Ihre Konzepte blieben jedoch über zwei Jahrtausende lebendig und prägten auch das Denken derjenigen Wissenschaftler, die seit dem 16. Jahrhundert die Natur messend befragt haben.

Im Mittelpunkt der heutigen Vorlesung stehen die Begriffe "Element" und "Atom", die von den Vorsokratikern eingeführt wurden. Empedokles (ca. 500 - 430 vor Chr.) begründete die Lehre von den vier Elementen: Erde, Wasser, Luft und Feuer, aus denen sich durch verschiedene Kombinationen alle nur möglichen Formen der in der Natur vorkommenden Materie ergeben. Die Leistung des Empedokles besteht nicht in der konkreten Angabe der 4 Elemente, die vom heutigen Standpunkt der Chemie etwas merkwürdig anmuten. Seine Denkleistung liegt vielmehr darin, die Möglichkeit zuzulassen, dass die ungeheure Vielfalt, der wir in der Welt begegnen, auf nur wenige Elemente zurückgeführt werden kann. Mit dem Begriff Element wurde auch - so würden wir das heute sagen - die Möglichkeit einer Frage an die Natur geschaffen. Die Doktrin der vier Elemente blieb bis zum Ende des Mittelalters vorherrschend, da man ja nie die Natur wirklich fragte. Später wurde der Begriff des Elementes für die experimentierenden Chemiker des 18. und 19. Jahrhunderts zu einem Schlüsselkonzept. Der Höhepunkt der vorsokratischen Lehren von der Materie war die Atomlehre des Leukipp (Mitte des 5. Jahrhunderts v.Chr.) und des Demokrit (ca. 450 - ca. 390 v. Chr.), von der leider nur sehr wenig in der Originalfassung erhalten geblieben ist. Die wissenschaftliche Einfachheit von Leukipps und Demokrits Postulaten ist bewundernswert: Die Materie ist aus sogenannten Atomen (griech. "unteilbar") aufgebaut, die sich durch ihre Gestalt voneinander unterscheiden. Sie bewegen sich im unendlichen Vakuum, und alle Vorgänge unterliegen der Naturgesetzlichkeit.

Um die Atomhypothese wurde öfter gestritten, und im Laufe der zwei Jahrtausende nach Leukipp und Demokrit gab es sowohl Befürworter als auch Gegner

der Theorie. So lehnten z.B. Aristoteles und später im Mittelalter auch die katholische Kirche diese Vorstellung ab - aus den verschiedensten Gründen. Wer nun letztlich recht hatte, das ist nicht wichtig. Denn auch diejenigen, die ein Konzept ablehnen, tragen dazu bei, das dieses Konzept eine Denkmöglichkeit und damit Ziel einer empirischen Überprüfung sein kann.

2.2 Chemische Bindungsgesetze: Hinweis auf Atome

Die wissenschaftliche Chemie nahm ihren Aufschwung im 18. Jahrhundert insbesondere durch A. de Lavoisier (1743 – 1794), der quantitative Meßmethoden in diesem Fach einführte. Er widerlegte die Phlogistontheorie und zeigte, dass Wasser aus Wasserstoff und Sauerstoff besteht. An diesem Beispiel sieht man, wie sich die neue, empirisch arbeitende Wissenschaft dem Elementbegriff näherte: Konkrete Stoffe der Natur wurden in andere Stoffe zerlegt, bis sie nicht mehr zerlegbar waren und elementar genannt wurden. Auf diese Weise stellte Lavoisier eine Liste der wesentlichen Elemente der heutigen anorganischen Chemie zusammen.

J. Dalton (1766 - 1844) entwickelte 1803 die "chemische Atomtheorie", welche die antiken Begriffe Element und Atom zusammenführte: Er postulierte, dass jedes Element aus Atomen besteht, die in physikalischer und chemischer Hinsicht identisch und gleich schwer sind. Verschiedene Elemente unterscheiden sich, weil sich ihre Atome z.B. in der Masse unterscheiden.

Die Atomtheorie wurde wesentlich gestützt durch die Beobachtung ganz einfacher Zahlenverhältnisse bei den Volumina oder den Massen derjenigen Substanzen, die sich in einer chemische Reaktion miteinander verbinden. Bei der Reaktion, in der Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser verbrennen, findet man z.B. für die Volumenverhältnisse:



Diese Beobachtung könnte man so verstehen, dass sich zwei Atome Wasserstoff und ein Atom Sauerstoff zu einem Molekül Wasser verbinden (unter der Voraussetzung, dass ein bestimmtes Gasvolumen bei gleichem Druck und gleicher Temperatur immer die gleiche Anzahl von Teilchen enthält, unabhängig von der Natur des Gases). Damit ergibt sich die Formel:



Man kann sich auch die Massen der reagierenden Substanzen anschauen und findet z.B.:



Hieraus folgert man, dass ein Sauerstoffatom 16 mal schwerer als ein Wasserstoffatom ist, und tut so einen ersten Schritt zu den relativen Atomgewichten.

Mit den Begriffen Element, Atom, Verbindung und Molekül war in der Chemie zu Beginn des 19. Jahrhunderts eine große Klarheit eingetreten. Bei den Chemikern hatte sich durchgesetzt, dass ein Element aus Atomen, eine Verbindung aus Molekülen besteht, und niemand zweifelte an deren Existenz

2.3 Positivismusdebatte: Gibt es Atome wirklich?

Auch die Physik des 19. Jahrhunderts konnte mit Hilfe der Atomhypothese eine Reihe von Phänomenen zwanglos erklären. Sie wurde z.B. Grundlage der kinetischen Gastheorie: Ein Gas ist eine Ansammlung von Teilchen (Atome oder Moleküle in der Sprache der Chemie), die sich nach den Gesetzen der Newtonschen Mechanik durch den Raum bewegen, an den Wänden reflektiert und aneinander gestreut werden. Loschmidt leitete aus dem Diffusionskoeffizienten den Wirkungsquerschnitt der Teilchen-Teilchen Streuung ab und erhielt damit einen Hinweis auf die Größe der Teilchen und die Zahl der Teilchen pro Volumeneinheit.

Ölfleckversuch

Wie groß sind ungefähr einfachere Moleküle oder Atome? Zur Beantwortung dieser Frage wird ein einfacher Versuch gemacht: Ein wenig Öl, das man auf eine genügend große Wasserfläche aufbringt, breitet sich zu einer sehr dünnen zusammenhängenden Ölschicht aus. Eine naheliegende Annahme ist, dass in dieser Schicht die Moleküle nicht mehr übereinander, sondern nur noch nebeneinander liegen. Dann ist die Schichtdicke d gleich dem Durchmesser der Moleküle. Die Dicke der Schicht lässt sich jedoch aus dem Volumen V des Tropfens und der "Oberfläche" der Schicht A berechnen. Hat die Schicht eine kreisförmige "Oberfläche" A mit dem Durchmesser D , so gilt

$$A = \pi D^2/4 \quad \text{und} \quad d = V/A.$$

Wie aber bestimmt man V ? Man zählt einfach ab, wie viele Tropfen 1 cm^3 enthält. Das hängt natürlich von der Öffnung der Bürette oder Pipette ab. Da uns jedoch nur die Größenordnung interessiert, gehen wir von 100 Tropfen/ cm^3 aus.

Nun besteht die Flüssigkeit nicht aus reinem Öl, sondern aus einer Mischung von Triolein und Leichtbenzin im Verhältnis 1 : 1000, d.h. in einem Tropfen ist nur $(1/100) \cdot (1/1000) \text{ cm}^3 = 10^{-5} \text{ cm}^3$ "Öl". Beim Aufbringen des Tropfens auf die Wasserfläche verdunstet das Leichtbenzin und nur das Öl bleibt übrig. Hätte man diese Verdünnung nicht vorgenommen, so brauchte man eine sehr viel größere Wasserfläche als uns im Hörsaal zur Verfügung steht.

Bestreut man die Wasseroberfläche mit Bärlapp-samen oder Mehl und bringt den Tropfen auf, so wird schließlich ein runder Fleck mit einem Durchmesser von etwa 10 cm oder einer Fläche von der Größenordnung $A \approx 100 \text{ cm}^2$ sichtbar. Daraus ergibt sich für die Dicke der Schicht

$$d = 10^{-5} \text{ cm}^3 / 100 \text{ cm}^2 = 10^{-7} \text{ cm} = 10^{-9} \text{ m} = 1 \text{ nm}$$

Der Durchmesser der Ölmoleküle ist also nicht größer als ein Milliardstel Meter.

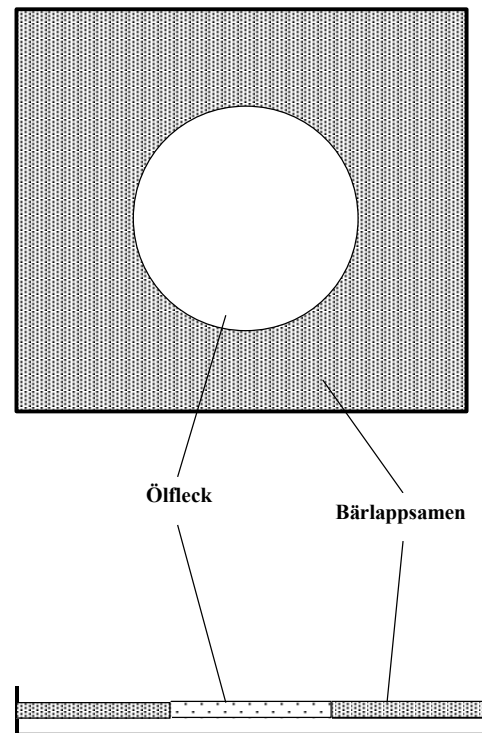


Abb. 2.1: Öltröpfchenversuch
oben: Aufsicht, unten: Seitenansicht

Trotz der Erfolge, insbesondere durch die Arbeiten von Boltzmann, wurde die Realität der Atome und Moleküle von weiten Kreisen, zu denen selbst Planck noch gehörte, nicht anerkannt. E. Mach stellte die einfache Frage: "Wer hat denn die Atome gesehen?"

Die Debatte um die Anerkennung des Atoms war stark philosophisch geprägt. Die dahinter liegende kritische Haltung wird "Positivismus" genannt. Dazu sagt der Brockhaus folgendes:

"Kennzeichnend für den Positivismus ist die grundsätzliche Beschränkung der Gültigkeit menschlicher Erkenntnis auf "Tatsachen", die durch objektive Erfahrung gegeben und als solche auch verifizierbar sind (das 'Positive'). Abgelehnt werden alle spekulativen Erkenntnisbereiche und -methoden jenseits positiv gegebener Erfahrungsinhalte. (...) Als Ideal der Erkenntnis gilt die in den exakten Naturwissenschaften erstrebte und größtenteils erreichte, auf dem Experiment beruhende Feststellung von Gesetzmäßigkeiten in mathematischer Form."

Diese Ideen klingen durchaus vernünftig, sie geben jedoch keine Antwort auf die Frage, ob es Atome in der Realität gibt. In dem positivistischen Sinn sind die Beobachtungen, dass sich Gase nur in einfachen Volumenverhältnissen verbinden, akzeptable Gesetze, aber es ist nicht erlaubt, daraus auf die Existenz von Atomen zu schließen. Das ist sicherlich richtig. Solange man nur ein Gesetz hat, das durch die Atomhypothese eine "natürliche" Erklärung findet, ist es gewagt, von Atomen zu sprechen. Doch dadurch, dass viele verschiedene Phänomene durch die Atomhypothese erklärt werden konnten, wurde die Hypothese immer plausibler.

Damit war allerdings immer noch nicht geklärt, ob die Atome "wirklich" existieren oder nicht. Eine Möglichkeit, das zu entscheiden, ist, die Atome direkt sichtbar zu machen. Dies war jedoch damals noch nicht möglich, denn aus dem Öltröpfchen-Versuch ergibt sich, dass die Atome, wenn sie überhaupt existieren, wesentlich kleiner als die Wellenlänge des sichtbaren Lichtes sind und damit nicht mit einem Lichtmikroskop sichtbar gemacht werden können. Und andere Mikroskope gab es damals nicht. Der zweite, mehr indirekte Weg besteht darin, aus verschiedenen, unabhängigen Experimenten den gleichen Wert für bestimmte Eigenschaften der Atome abzuleiten.

Bei der Atomdebatte spielte die sogenannte Avogadro Zahl, die die Anzahl der Atome in einem Mol Substanz (ein Mol ist die Stoffmenge in ungefähr 1 g Wasserstoff oder 16 g Sauerstoff oder 200g Blei) angibt, eine große Rolle. Diese Zahl wurde seit der Mitte des 19. Jahrhunderts immer wieder bestimmt, allerdings mit großer Unsicherheit. Erst im Jahr 1905 konnte Einstein sie in zwei seiner Arbeiten verlässlich bestimmen, wodurch die Atome jetzt "wirklich" , d.h. allgemein anerkannt wurden. (Im gleichen Jahr erschienen außerdem Einsteins Veröffentlichungen zur Relativitätstheorie und zur Lichtquantenhypothese.)

Erst in jüngster Zeit konnte man mit Hilfe des Rastertunnelmikroskops die Atome wirklich direkt sichtbar machen.

Warum war die Positivismusdebatte dennoch nützlich? Auch wenn die von Mach und Ostwald angestoßene Debatte über das Wesen naturwissenschaftlicher Erkenntnis kurzzeitig den Fortschritt der Physik gebremst hat, so war sie wohl nötig. Denn die naturwissenschaftliche Forschung musste sich erst einmal radikal von der antiken Naturwissenschaft lösen, die auf reiner Spekulation aufgebaut war. Selbst zu Beginn der Neuzeit (Kepler, Galilei, ...) waren Physik und Metaphysik immer noch stark verschränkt. Daher musste man wohl zunächst "das Kind mit dem Bade ausschütten",

d.h. jede Spekulation als unphysikalisch verteufeln und nur die Sinneserfahrung gelten lassen.

Im 20. Jahrhundert kam man dann zu einem ausgeglichenerem Verhältnis: Man drang viel tiefer in den Bereich des Mikroskopischen ein, so dass die naive Sinneserfahrung versagte und komplizierte Experimente nötig wurden, um der Natur Informationen abzurufen. Außerdem erkannte man, dass Theorien immer auch ein Element des Spekulativen in sich bergen, das über die experimentelle Information hinausgeht.

Heute ist die Atomdebatte des 19. Jahrhunderts noch einmal bei den Quarks wieder aufgelebt, jedoch ohne die damalige Leidenschaft. Wir werden in dem entsprechenden Kapitel darauf eingehen.

2.4 Atome sichtbar machen mit dem Rastertunnelmikroskop

Das Rastertunnelmikroskop (RTM)

Das RTM bietet die Möglichkeit, die Anordnung einzelner Atome auf der Oberfläche eines Objekts nachzuweisen und darzustellen, indem man mit einer sehr feinen Nadel die Struktur der Oberfläche zeilenweise abtastet. Man erhält zunächst die Höhenprofile der einzelnen Zeilen – alle Zeilenhöhenprofile ergeben ein Bild von der Höhenstruktur der Oberfläche.

Das Verfahren steht in Analogie zum Verhalten eines blinden Fußgängers, der den Weg vor sich mit einem Stock abtastet. Unebenheiten, die kleiner sind als die Spitze seines Stocks erkennt er nicht.

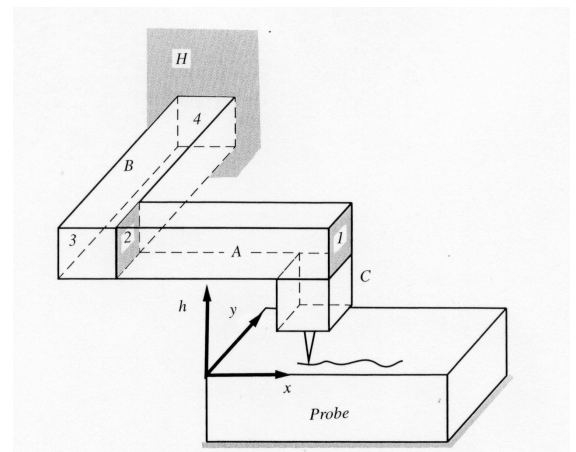
Daraus ergibt sich die Forderung an das RTM: Wenn man atomare Strukturen sehen möchte,

- darf die Nadelspitze nur aus einem oder wenigen Atomen bestehen,
- muss die Einstellung der Position entsprechend genau und reproduzierbar sein.

Abtasten der Probe – Zeile für Zeile

Dies geschieht mit Hilfe eines piezoelektrischen Körpers, z.B. eines Quarzkristalls: Legt man an seine Enden eine Spannung, so ändert sich die Länge des Kristalls. ($100 \text{ V} \hat{=} 0,1 \text{ mm} = 10^{-4} \text{ m}$, , $1 \text{ mV} \hat{=} 1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). Auf diese Weise kann man sowohl die x- als auch die y-Koordinate des Nadelortes "atomgenau" einstellen.

Abb. 2.2: Schematischer Aufbau eines RTM



Höhenposition der Nadel

Auch dies geschieht mit einem Piezokristall. Die Höhe in Bezug auf ein bestimmtes Nullniveau ist also durch vorsichtiges Heranfahren der Nadelspitze an die Oberfläche bestimmbar. Doch es gibt folgendes Problem:

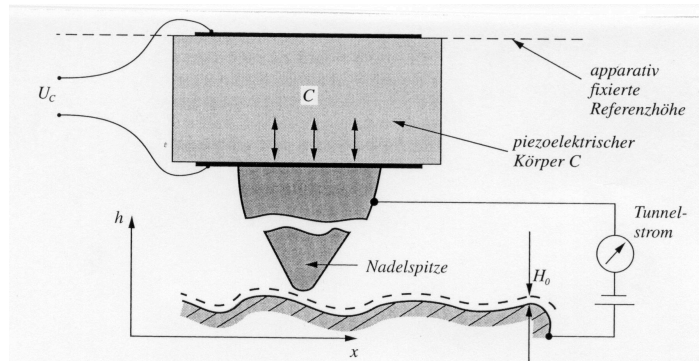


Abb. 2.3: Darstellung des Abtastvorgangs einer Metalloberfläche mit einem RTM

Man kann nicht sehen, wann die Nadel gerade aufsetzt. Eine so feine Nadel wäre beim Berühren wohl schon ruiniert.

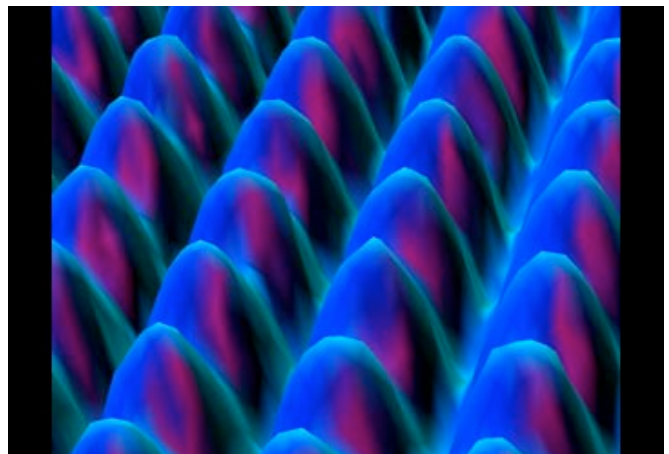
Folgerung: Man muss den direkten Kontakt vermeiden und die Spitze nur bis auf einen bestimmten Abstand H_0 an die Oberfläche heranfahren. Wie kann man aber erkennen, dass die Spitze bis auf diesen bestimmten Abstand, z.B. 1 nm an die Oberfläche herangefahren ist?

Tunneleffekt – Tunnelstrom

Legt man zwischen Nadel und Oberfläche, die beide gute Leiter seien - eine Spannung, so fließt ein Strom, dessen Stärke vom Abstand H empfindlich abhängt. Klassisch gesehen dürfte überhaupt kein Strom fließen, der Zwischenraum wirkt als Isolator. Bei sehr kleinem H jedoch tritt ein quantenmechanischer Effekt auf: der Zwischenraum kann von den elektrischen Ladungsträgern (Elektronen) durchquert werden, wie ein Berg durch einen Tunnel. Dieser Effekt heißt Tunneleffekt, der zugehörige Strom Tunnelstrom. Die sich einstellende Stromstärke hängt sehr stark vom Abstand H ab. Mit Hilfe des Tunnelstroms kann man den Abstand H_0 einstellen und durch Variieren der Höhe konstant halten.

Das Einstellen, Aufnehmen und Auswerten der vielen tausend Einzeldaten geschieht automatisch und gesteuert durch einen Computer.

Abb. 2.4:
Die polierte Oberfläche eines Nickelkristalls, abgetastet mit einem RTM. Jede Spitze entspricht einem Nickelatom



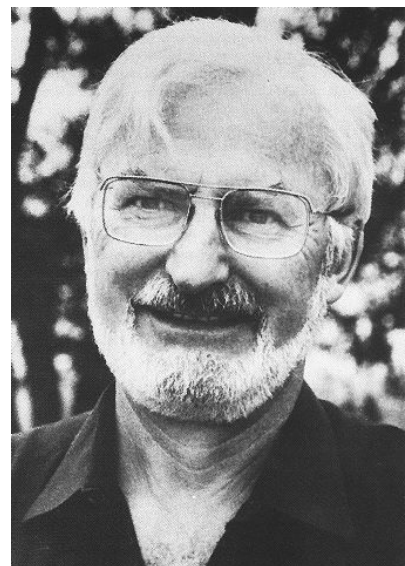
2.5 Biographien: Gerd Binnig (* 1947) und Heinrich Rohrer (* 1933)

Gerd Binnig, der in Frankfurt am Main geboren wurde und auch bis zu seinem 31. Lebensjahr in der Frankfurter Gegend lebte, hatte bereits als Zehnjähriger den Wunsch, später Physik zu studieren. So begann er 1967 sein Studium an der Universität Frankfurt, hinterfragte jedoch seine Fächerwahl im Verlaufe des Studiums häufiger. Während ihm insbesondere die theoretische Physik unphilosophisch und wenig fantasievoll erschien, machte ihm die Musik in dieser Zeit umso mehr Freude. Über Binnigs Studium wird berichtet: *"He found the conventional approach to teaching the subject tedious. It was dry textbook stuff, revealing none of the missteps, mystery and mess that constitute the drama and delight of scientific discovery."* Mit dem



Beginn der Diplomarbeit bekam dann die Physik für ihn eine neue Bedeutung. Die Arbeit in der Gruppe, das wirkliche physikalische Arbeiten, machte ihm sehr viel mehr Freude als das reine Studium. Vielleicht hat dazu auch die Heirat einer Psychologin im Jahre 1969 beigetragen, von der gesagt wird, dass sie wohl auch hin und wieder als Psychotherapeutin ihres Mannes gewirkt habe. Sie war es auch, die ihn 1978 überzeugte, ein Angebot des IBM-Laboratoriums in Zürich anzunehmen. Dass hierbei noch andere Faktoren eine Rolle gespielt haben, geht aus folgendem Zitat hervor: *"And it was only after serious reflection, anxious discussions with his wife and some time on the excellent football field near the Zurich laboratory, that Dr. Binnig decided to go to work for IBM."*

Im Gegensatz zu Gerd Binnig entschied sich Heinrich Rohrer, der 1933 im Kanton St. Gallen in der Schweiz zur Welt kam, eher zufällig für ein Physikstudium. Während der Schulzeit, deren letzte Jahre er in Zürich verbrachte, interessierten ihn die klassischen Sprachen ebenso wie die Naturwissenschaften. Die Entscheidung für die Physik fiel erst kurz vor der Registrierung an der ETH Zürich im Jahre 1951. Nach seinem Studium, das er u.a. bei Wolfgang Pauli absolviert hatte, begann er 1955 mit seiner Doktorarbeit.



Hierbei entschied sich Rohrer wiederum rein zufällig für ein Thema aus dem Gebiet der Festkörperphysik, was schließlich in einer Zusammenarbeit und langjähriger Freundschaft mit Bruno Lüthi mündete. So trat er 1963 auf dessen Rat in das IBM-Forschungslabor in Zürich ein, wo er die Freiheit hatte, diejenigen Fragestellungen zu verfolgen, die er für interessant hielt.

Der gute Kontakt zu dem inzwischen nach Frankfurt berufenen Prof. Lüthi führte dazu, dass Gerd Binnig, der dort am Physikalischen Institut promoviert hatte, ebenfalls in das IBM Forschungslabor wechselte. Das Zusammentreffen mit Heinrich Rohrer und dessen

Art, Physik zu treiben, entfachte in Binnig ein weiteres Mal die ein wenig verloren gegangene Neugier in die Physik.

Die gemeinsame Arbeit der beiden Forscher im neuen Aufgabenbereich "Halbleiter-Oberflächen-Charakterisierung" hatte die Entwicklung des Raster-Tunnel-Mikroskops zum Ergebnis.

Ausgangspunkt für das RTM war die von Rohrer an Binnig übertragene Aufgabe, eine Apparatur zu bauen, mit der man winzige Fehlstellen in dünnen Materialschichten entdecken kann. Dies war ein Problem, das IBM lösen wollte, um schnellere Computer zu bauen. Mitglieder der Arbeitsgruppe bei IBM berichten, dass die wesentlichen Ideen zum Bau des Geräts auf Gerd Binnig zurückgingen, insbesondere die Ausnutzung des Tunneleffekts. Auch wenn während der Arbeiten einige seiner Mitarbeiter dachten, dass er verrückt wäre, gab es andere, die sein experimentelles Talent auf eine Stufe mit Einsteins oder Schrödingers Theorien stellten.

Der Erfolg gab Dr. Binnig schließlich recht: Am 18. März 1981 gelang es zum ersten Mal, die Abhängigkeit des "Tunnelstromes" vom Abstand einer extrem feinen Spitze und einer Oberfläche nachzuweisen. Kurze Zeit darauf konnten erstmals atomare Stufen auf einer Oberfläche gezeigt werden. 1985 schließlich wurde die atomare Auflösung des Rastertunnelmikroskops einhellig anerkannt. Ein Jahr später wurden Gerd Binnig und Heinrich Rohrer vom IBM Forschungslaboratorium Zürich für ihre genial einfache Erfindung mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet.

Den Schritt vom Forschungsinstrument zum Werkzeug machte das Rastertunnelmikroskop im Jahre 1989. Der Amerikaner Don Eigler bemerkte, dass er beim Mikroskopieren einige Atome auf der untersuchten Oberfläche mit der Mikroskopspitze verschoben hatte. Mit etwas Übung gelang es ihm, Atome gezielt zu manipulieren. Dies war eine Technik, die heute zum Standard gehört.

Quellen:

1. The Economist Technology Quaterly, Sept. 18th 2004, S. 37
2. <http://nobelprize.org/physics/laureates/1986/index.html>
3. <http://www.deutsches-museum.de/ausstell/meister/rtm.htm>