

Zeitschrift: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural

Herausgeber: Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF)

Band: 85 (1987)

Heft: 6

Artikel: Prinzip des Tunnelmikroskops

Autor: Ris, H.R.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-233450>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 20.02.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Prinzip des Tunnelmikroskops

H.R. Ris

Mit diesem Mikroskop ist es erstmals möglich, die atomare Oberflächenstruktur von Materialien zu erfassen, wie es mit der konventionellen Mikroskopie nicht möglich ist. Das Prinzip beruht auf dem schon lange bekannten Tunneleffekt, mit dem unter anderem auch der radioaktive Zerfall der Stoffe erklärt werden kann.

Grâce à ce microscope, nous avons pour la première fois la possibilité d'acquérir des connaissances sur la structure superficielle des matériaux, un domaine inatteignable pour la microscopie conventionnelle.

Son principe repose sur l'effet de tunnel déjà connu depuis longtemps, effet qui permet entre autres d'expliquer la désintégration radioactive des éléments.

Bekanntlich wurde ein Teil des Physik-Nobelpreises 1986 den beiden Zürcher Wissenschaftlern, dem Schweizer H. Rohrer und dem Deutschen G. Binnig, die im Jahre 1981 im Forschungsinstitut der IBM in Rüschlikon eine erste Version eines neuartigen Elektronenmikroskops entwickelt haben, verliehen.

Der Tunneleffekt als physikalisches Phänomen

Das Phänomen kann gut mit dem Blick auf eine Berg- und Talbahn erklärt werden, wie sie oft auf Jahrmärkten steht. Der Wagen kann nur über den Berg fahren, wenn seine kinetische Energie (Geschwindigkeitsenergie) grösser ist als die potentielle Energie (Lageenergie) auf der Bergkuppe. Ist die erstere kleiner, so erreicht er die Bergspitze nicht (Abb. 1).

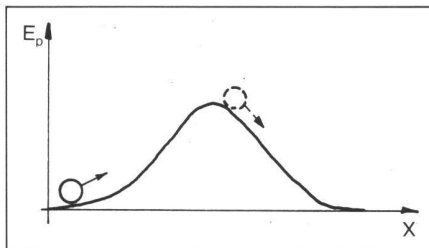


Abb. 1: Eine Kugel kann einen Berg nur überrollen, wenn ihre kinetische Energie grösser ist, als die potentielle Energie, die aufgewendet werden muss, um die Bergkuppe zu erreichen.

In der klassischen Physik galt dieses Prinzip auch für die Atomtheorie, obschon man Fälle kannte, bei der Teilchen auf der anderen Seite des Berges ankamen, auch wenn ihre kinetische Energie kleiner als erforderlich war. Man sprach dann davon, dass die Teilchen oder die Wellen den Berg untertunnelt haben.

Quantenmechanisch lässt sich dieses Verhalten aber erklären. Wenn auf eine

Potentialschwelle der Höhe U eine Teilchenwelle mit der Energie E zuläuft, die kleiner ist als U , so würde man eben gemäss der klassischen Physik annehmen, dass die Teilchenwelle die Potentialschwelle nicht überwinden kann. Aus der Quantenmechanik folgt aber, dass auf der anderen Seite der Potentialschwelle sich ein kleiner Teil der Teilchenwelle schwächer fortsetzt. Die Teilchen können also die Schwelle durchdringen, oder in der Fachsprache: die Potentialschwelle wurde untertunnelt (Abb. 2).

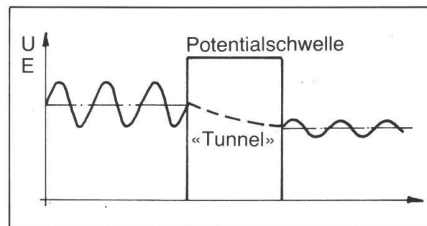


Abb. 2: Ein Strom fliesst nach einer Potentialschwelle, die höher ist als die Energie der Welle, in abgeschwächter Form weiter, da ein Teil der Strahlung die Schwelle untertunnelt.

Neue Horizonte

Dieses auf dem Prinzip des Tunneleffektes beruhende Mikroskop eröffnet der Festkörperphysik ganz neue Horizonte. Bekanntlich bilden die Elektronen um den Atomkern eine Art Hülle, wobei deren Bahnen nicht so genau definiert sind, wie das Niels Bohr in seinem Bohrschen Atommodell angab. Man neigt heute eher zur Annahme, dass sie eine Elektronenwolke bilden, mit nicht sehr genau definierten Rändern, so dass sie über weite Raumgebiete verschmiert erscheinen. Die äussere Abgrenzung eines Körpers ist also nicht genau definiert. Nähert man also zwei Körper, so können die Elektronenwolken sich durchdringen, ohne dass sich die Körper eigentlich berühren. Legt man eine Spannung an die beiden Körper, so kann ein berührungsloser Strom fließen, der *Tunnelstrom*. Dieser ist extrem stark vom Abstand der beiden Körper abhängig. Der

Tunnelstromeffekt tritt bei Abständen von weniger als 1 nm ein ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 1$ millionstel Millimeter). Diese kleinen Abstände sind zu vergleichen mit dem Atomdurchmesser, der bei etwa 0,3 nm liegt, oder der Wellenlänge des sichtbaren Lichtes, das zwischen 400 bis etwa 700 nm liegt! Abstandsänderungen in dieser Grössenordnung ergaben Tunnelstromänderungen um den Faktor 1000.

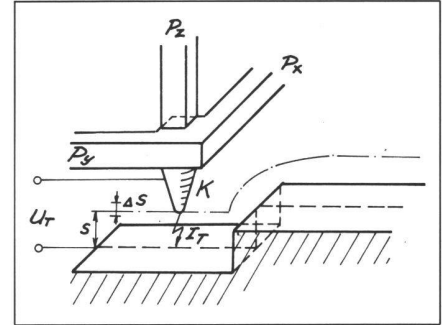


Abb. 3: Zum Messprinzip des Tunnelmikroskops: Der Abtastkopf K wird im Abstand s entlang der Oberfläche des Prüflings geführt, wobei der Tunnelstrom I_T fliesst. Dieser wird konstant gehalten durch Änderung des Abstandes s .

Die angelegte Spannung U_T ist ein Mass für die Anwesenheit einer Elektronenwolke, und die Bewegungen des Tastkopfes bestimmen die Koordinaten eines Atoms. Mit 3 Piezokristallen P wird der Abtastkopf in die 3 Richtungen x , y und z positioniert.

Oberflächenatome

In Abb. 3 ist das Messprinzip dargestellt. Eine Messspitze wird an der Oberfläche des zu messenden Körpers vorbeigeschoben und der Abstand in senkrechter Richtung jeweils so verändert, dass der Messstrom konstant bleibt. Die Höhe der Spitze folgt somit der Struktur der Oberflächenatome, die man auf einem Plotter oder einem Grafik-Videoschirm darstellen kann. Wird dieser Vorgang mehrfach seitlich verschoben, erhält man auf dem Aufzeichnungsgerät die Anordnung der Atome auf der Materialoberfläche und damit eine dreidimensionale Abbildung. Abb. 4 zeigt als Beispiel die Oberfläche von Graphit, wo die grauen Hügel die Stellen der Graphitatombe zeigen. Es kann aber auch jede beliebige andere Oberfläche abgetastet werden.

Weniger als ein Atomdurchmesser

Die Bewegungen in vertikaler und horizontaler Richtung erzeugt man durch piezoelektrische Elemente, die in der Lage sind, die Sonde mit einer Genauigkeit zu führen, die weniger als ein Atomdurchmesser beträgt. Die maximale Auflösung in vertikaler Richtung ist besser als 0,01 nm, und die

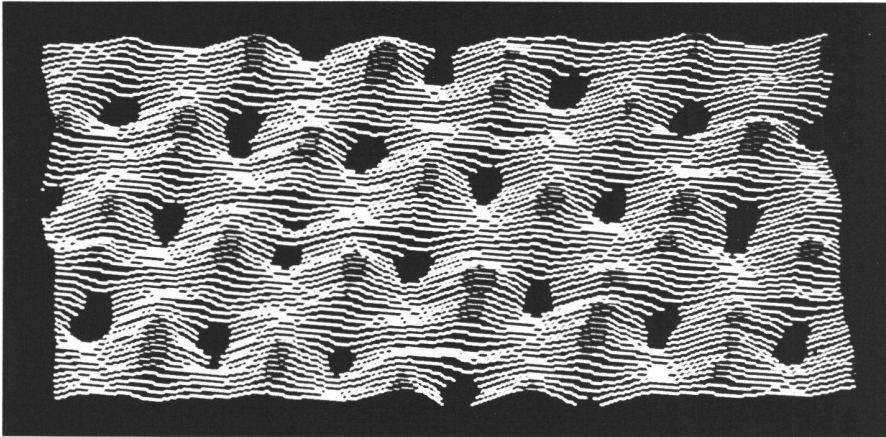


Abb. 4: Oberflächendarstellung von Graphit: Die grauen Stellen, die als Hügel erscheinen, stellen Atome dar.

horizontale Auflösung ist besser als 0,2 nm. Somit kann man die Elektronenwolke an der äusseren Grenzschicht jedes Materials nachweisen. Man ist also in der Lage, erstmals die wahre Oberflächenstruktur eines Materials abzubilden. Dies ist mit keinem anderen Mikroskop möglich. Abb. 5 zeigt den mechanischen Aufbau mit der Vibrationsdämpfung des Abtastsystems, das bequem in einer Hand Platz findet.

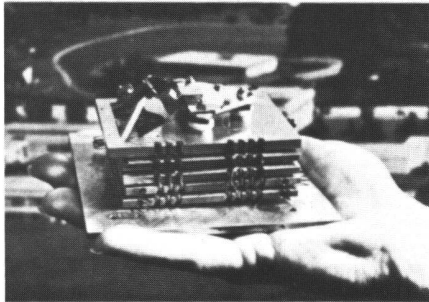


Abb. 5: Mechanischer Aufbau des Mikroskops mit Vibrationsdämpfungselementen. Das Ganze findet bequem in einer Hand Platz.

Aufbau des Messsystems

Das Tunnelmikroskop hat wenig mit dem klassischen Mikroskop zu tun. Es ist nur mit anderen Systemen der Computertechnik bedien- und einsetzbar. Abb. 6 zeigt das Blockdiagramm der Anlage.

In Teil A ist der Abtastkopf mit dem piezoelektrisch betriebenen Dreibeinturm für die räumliche Bewegung der Testspitze und der ebenfalls piezoelektrisch betriebenen «Laus» gezeigt, auf dem der Prüfling montiert ist.

Im Teil B ist die Kontrolleinheit untergebracht. Sie bedient den Servoregelkreis, der während der Verschiebung der Abtast-

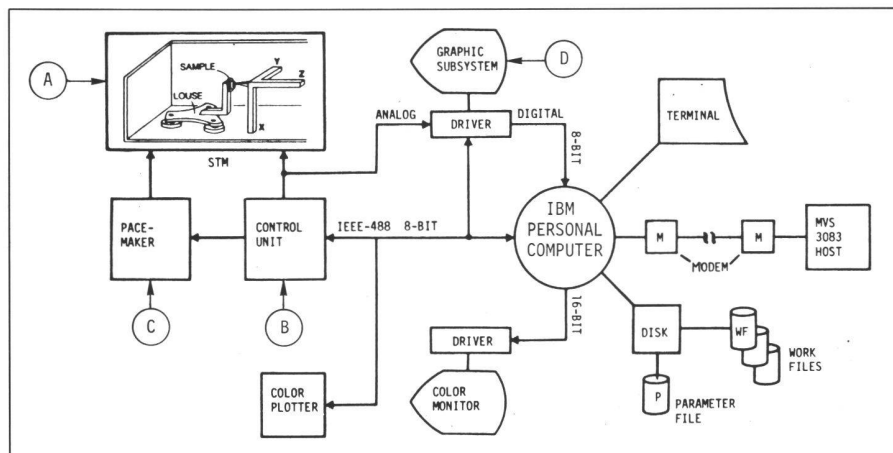


Abb. 6: Blockdiagramm der Messeinrichtung: A Abtastsystem – B Kontrolleinheit – C Schrittmacher – D Grafiksystem (Bild: Syslogic AG).

spitze relativ zum Prüfling den Strom konstant hält. Die aus dem Regelkreis abgeleitete Spannung ist linear und damit ein Mass für die Oberflächenbeschaffenheit des Prüflings.

In Teil C ist die Schrittmachereinheit für die Bewegungssteuerung des Prüflings enthalten, und Teil D stellt das Grafiksystem dar, das die bildliche Auswertung der betrachteten Oberfläche ermöglicht.

Anwendung des Tunnelmikroskops

Bei den heute extrem miniaturisierten elektronischen Bauteilen bestehen einzelne Elemente zum Teil nur aus einigen Dutzend bis einigen hundert Atomen. Daher ist die Kenntnis der Oberfläche solcher Strukturen ausserordentlich wichtig, weil die Leitfähigkeit und andere elektrische Eigenschaften zum Teil von der Oberflächenstruktur abhängig sind.

Im Gegensatz zur Struktur von festen Körpern, wo die Atome meist kristallin und daher stabil angeordnet sind, wirken auf die Oberflächenatome asymmetrische Kräfte, weil die eine Seite des Körpers ja ins Nichts mündet. Die genaue Kenntnis der Oberflächenstruktur ist daher in vielen Gebieten der Technik äusserst wichtig, denkt man zum Beispiel nur an die Chemie, Elektronik, Kristallzüchtung oder andere Gebiete. Grundsätzlich kann die Oberflächenstruktur von Kristallen auch aus der Beugung von Elektronen niedriger Energie (LEED-Technik) bestimmt werden, aber die mathematische Interpretation der Beugungsdiagramme ist sehr schwierig. So werden sich sicher auch zum Beispiel in der Dünnschichtforschung neue

Aspekte in der Erkenntnis eröffnen. Die bis jetzt aufgenommenen atomaren Oberflächenstrukturen von Gold, Silizium, Nickel und anderen Stoffen waren bis heute unbekannt oder stark umstritten. So ist es eigentlich erst jetzt möglich, ein Modell der Oberflächenstruktur von Silizium anzugeben, das den beobachtbaren Ergebnissen standhält.

Das neue Mikroskop kann auch wie eine Art Teleobjektiv verwendet werden, wenn als Zielhilfe ein gewöhnliches Mikroskop verwendet und dann der Abtastkopf auf die interessierende Fläche gerichtet wird. Die höchste Auflösung des Mikroskops wird im Vakuum erreicht, wo dann Flächen in der Grössenordnung von einigen Atomdurchmessern beobachtet werden können.

Adresse des Verfassers:
Hans Rudolf Ris
Rankstrasse 19
CH-8413 Neftenbach