



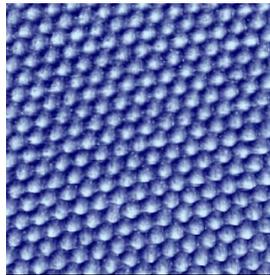
Brücke zwischen der modernen physikalischen Forschung
und dem Unternehmertum im Bereich Nanotechnologie

Quantenphysik

*Die Physik der sehr kleinen Teilchen mit großartigen
Anwendungsmöglichkeiten*

Teil 2

QUANTENEIGENSCHAFTEN & TECHNOLOGIE



Lernstation VIII: **Tunneleffekt & STM**

ÜBERSETZT DURCH:



Quantum Spin-Off wird von der Europäischen Union im Rahmen des LLP Comenius-Programms finanziert
(540059-LLP-1-2013-1-BE-COMENIUS-CMP).

Renaat Frans, Robert Sum

Kontakt:

renaat.frans@khlim.be

sum@nanosurf.com



Lifelong
Learning
Programme

Dieses Material gibt nur die Meinung der Autoren wieder. Die Europäische Kommission kann für den Einsatz der Informationen dieser Webseite nicht verantwortlich gemacht werden.

Inhaltsverzeichnis

LERNSTATION VIII: TUNNELEFFEKT UND RTM	3
1 Überwindung einer Potenzialbarriere ohne die benötigte Energie	3
1.a Nach der klassischen Physik können Teilchen nicht tunneln	3
1.b Licht kann eine Barriere durchdringen.	3
1.c Der Tunneleffekt im Alltag	5
2 Tunneleffekt: ein Merkmal von Wellen	5
3 Tunneleffekt auch bei Elektronen	7
3.a Eine Anwendung: Flash-Speicher	7
3.b Erklärung von Flash-Speicher anhand des Tunneleffekts von Elektronenwellen	8
3.c Tunneleffekt liegt vielen Prozessen zugrunde	9
4 Scanning Tunneling Microscopy (STM)	10
4.a Rastertunnelmikroskop	10
5 Konzepte der Lernstation VIII	15

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

Es gelten die folgenden Bedingungen:

- Attribution – Sie müssen die [entsprechenden Quellen nennen](#), einen Link auf die Lizenz bereitstellen und [angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden](#). Sie können dies auf beliebige sinnvolle Art und Weise tun, allerdings nicht so, dass suggeriert wird, der Lizenzgeber würde Sie oder Ihre Verwendung unterstützen.
- NonCommercial – Sie dürfen das Material nicht für [kommerzielle Zwecke](#) verwenden.

Sie dürfen:

- Teilen – das Material in Form beliebiger Medien oder Formate kopieren und weiter verteilen
 - Adaptieren – das Material neu zusammenstellen, transformieren und darauf aufbauen
- Der Lizenzgeber kann diese Berechtigungen nicht widerrufen, solange Sie die Lizenzbedingungen einhalten.

Auf das Werk ist wie folgt zu verweisen:

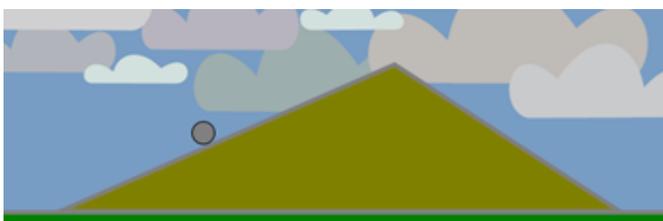
Frans R., Sum R. (2015) Quantum SpinOff Learning Stations: Tunnelling & STM.
Centre for Subject Matter Teaching KHLim, Diepenbeek Belgium - Nanosurf AG, Liestal



Lernstation VIII: Tunneleffekt und RTM

1 Überwindung einer Potenzialbarriere ohne die benötigte Energie

1.a Nach der klassischen Physik können Teilchen nicht tunneln



(Quelle: Concord.org)

Wenn Sie einen Ball über einen Hügel rollen möchten, müssen Sie ihm ausreichend (kinetische) Energie geben, damit er die Barriere potenzieller Energie überwindet, die der Hügel darstellt.

1. Wenn er nicht über ausreichend Energie verfügt, überwindet er den Hügel (nicht).
2. Wenn er über ausreichend Energie verfügt, überwindet er den Hügel (nicht).

Das Erstaunliche ist, dass *Quantenteilchen* wie Elektronen und Photonen (Lichtpartikel) im Gegensatz zu makroskopischen Bällen eine Barriere durchaus überwinden können, auch wenn sie nicht über die benötigte Energie verfügen. Tatsächlich kann die Quantenphysik in Abhängigkeit von der Teilchenenergie und der Höhe und Breite der Barriere die Wahrscheinlichkeit vorhersagen, mit der ein Quantenobjekt eine Energiebarriere durchtunnelt.

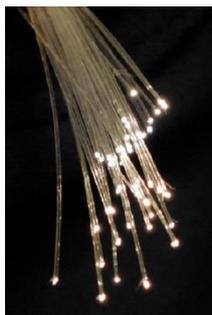
1.b Licht kann eine Barriere durchdringen.



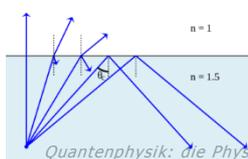
Wie Sie sich sicher noch erinnern, können Lichtstrahlen, die von einem optisch dichten Medium zu einem optisch dünnen Medium verlaufen, komplett reflektiert oder übertragen werden. Dieser Effekt beruht auf der sich ändernden Geschwindigkeit des Lichts, das im dichten Medium (schneller/langsamer) ist als im dünnen Medium.



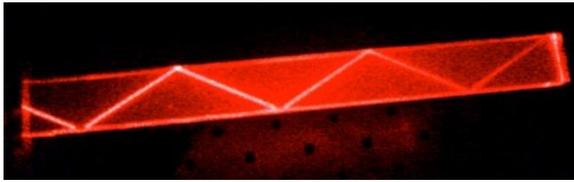
Wenn der Einfallswinkel einen bestimmten kritischen Winkel überschreitet, was vom relativen Brechungsindex abhängt, wird das Licht vom optisch dichten Medium komplett reflektiert.



(Quelle: Public Domain Wikipedia)



Quantenphysik: die Physik der sehr kleinen Teilchen mit großartigen Anwendungsmöglichkeiten



Auf diese Weise ist es möglich, dass Licht in Glasfasern verbleibt. Das heißt, das Licht kann das dichte Medium nicht verlassen, wenn der Einfallswinkel ausreichend groß ist.

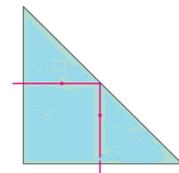


Aufgrund des Tunneleffekts ist es nun möglich, dass das Licht diese eigentlich unüberwindliche Barriere überwindet. Dies lässt sich in einem Experiment mit zwei Prismen nachweisen. Sie können sich das Experiment unter <http://www.youtube.com/watch?v=aC-4iSD2aRA> ansehen.

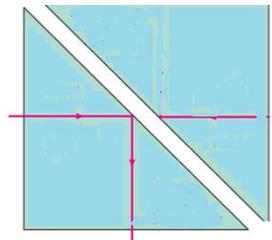
Frustrated Total Internal Reflection

Experiment: verhinderte Totalreflexion von Licht

Als Beispiel wollen wir einen Laserstrahl betrachten, der auf eine Seite des Prismas gerichtet ist, wie in der Abbildung gezeigt. Der Einfallswinkel ist hierbei ausreichend groß, um eine Totalreflexion zu erzeugen: Das Licht kann das Medium nicht verlassen.



Anschließend verwenden wir ein zweites Prisma. Wenn wir das zweite Prisma an das erste drücken (bei Bedarf beide Seiten mit Wasser benetzen), kann das Licht das erste Prisma verlassen und das zweite Prisma erreichen, obwohl eine Überwindung dieses Spalts im klassischen Sinn unmöglich ist.



Ein klassisches Teilchen kann nicht „wissen“, dass Sie ein zweites Prisma hinzuziehen. Es liegt am Quantenwellencharakter des Lichts, dass es den Spalt durchdringen kann.

Experiment: verhinderte Totalreflexion von Mikrowellen

Die Größe des Spalts zwischen den Prismen sollte der Wellenlänge des Lichts entsprechen. Bei rotem Licht beträgt sie circa 600 nm. Die beiden Prismen müssen sich also sehr nahe beieinander befinden. Bei Mikrowellen, die Wellenlängen im Zentimeterbereich aufweisen, kann nachgewiesen werden, dass ein Spalt von wenigen Zentimetern für den Tunneleffekt bereits ausreicht.

Eine Versuchsanordnung mit Mikrowellen-Durchtunnelung können Sie sich unter <http://www.sixtysymbols.com/videos/reflection.htm> ansehen.



(Quelle: Universität Nottingham)

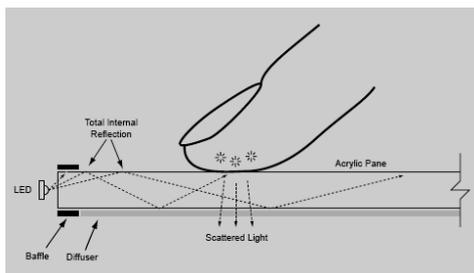
1.c Der Tunneleffekt im Alltag



Wenn Sie ein Glas Wasser in der Hand halten, können Sie Ihre Finger aufgrund der Totalreflexion des Lichts im Wasser nicht sehen.

Aber was passiert, wenn du deine Finger fest gegen das Glas drückst?

Der Effekt ist sehr ähnlich zu dem Experiment mit dem Prisma, welches oben beschrieben wurde. Die Rillen in Ihrer Haut werden sichtbar, weil das Licht den Spalt durchtunnelt. Das Licht dringt beim Drücken vom Glas durch den sehr kleinen (Luft)Spalt in die Rillen (Quelle: Public Domain Wikipedia).



Dieser Tunneleffekt mit Licht (Verhinderung der Totalreflexion) kann für die Produktion eines Touchscreens genutzt werden: Die Erkennung des reflektierten Lichts und damit der Position des Fingers auf dem Bildschirm erfolgt dabei über eine lichtempfindliche Zelle.

(Quelle: Universität New York: cs.nyu.edu/~jhan/ftirsense/)

2 Tunneleffekt: ein Merkmal von Wellen

Wir wollen nun versuchen, dieses Phänomen zu erklären.

Verhinderte Totalreflexion: Erklärung anhand des Tunneleffekts

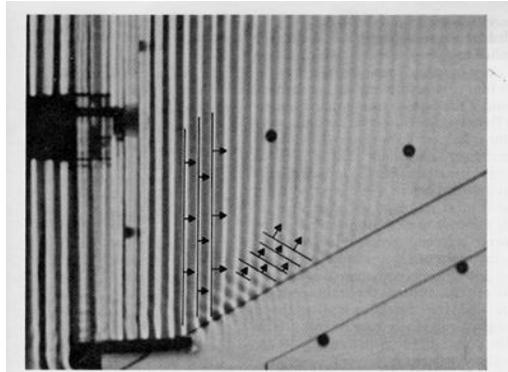
Solange sich das Licht komplett im Glas befindet, kann es nicht „wissen“, was hinter dem Glas liegt. Dazu muss es eine kurze Strecke, wenige Wellenlängen, in die verbotene Zone eindringen. Wenn ein zweites Glasstück innerhalb der Eindringstrecke platziert wird, kann der Strahl wieder erscheinen. Die Wahrscheinlichkeit der Durchdringung des Luftspalts nimmt mit zunehmender Dicke der Barriere ab.

Durchtunnelung von Wasserwellen

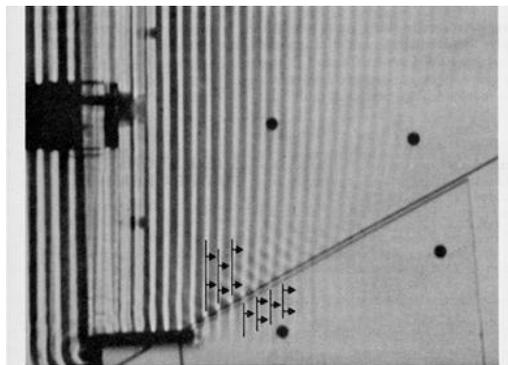
Die Totalreflexion wird durch eine plötzliche Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts im Grenzbereich bewirkt. So ist die Lichtgeschwindigkeit in Glas zum Beispiel wesentlich (langsamer/schneller) als in Luft.

Die Geschwindigkeit der Wasserwellen hängt zudem *von der Tiefe* des Wassers ab. In seichtem Wasser ist die Wellengeschwindigkeit geringer, und in tiefem Wasser breiten

sich die Wellen schneller aus. Aus diesem Grund können Sie bei Wasserwellen das Phänomen der Totalreflexion wie bei Licht in Materie beobachten.

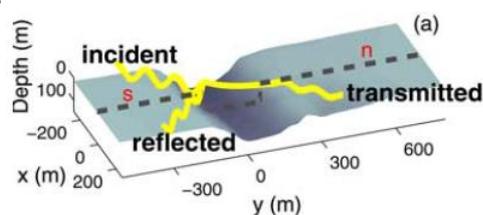


Die beiden schrägen Linien kennzeichnen einen Bereich, in dem das Wasser tiefer ist. Die Wellen, die von links kommen, werden in diesem tiefen Bereich reflektiert.

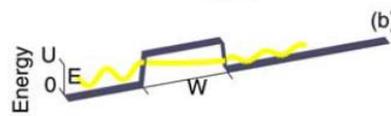


Wenn der vom tiefen Wasser erzeugte Spalt ausreichend verschmälert wird (in der Größenordnung der Wellen selbst), können die Wellen den Spalt durchtunneln und gelangen (teilweise) darüber.

Quelle Education Development Center,
Newton, MA USA



Der Tunneleffekt der Wellen lässt sich auch bei Meereswellen über Schluchten im Meeresboden beobachten!



J. Thomson, S. Elgar und T. H. C. Herbers (2005).
Reflection and tunneling of ocean waves observed
at a submarine canyon. *Geophysical research*

letters, 32(10).

3 Tunneleffekt auch bei Elektronen

Sowohl Licht *als auch Materie* besitzen den Welle-Teilchen-Dualismus, deshalb ist der Tunneleffekt nicht nur bei Photonen, sondern auch bei Elektronen möglich.

Die Quantenphysik beschreibt diese Welleneigenschaften von Elektronen genau. Elektronenwellen können eine klassischerweise undurchdringliche Barriere durchtunneln.

Für die Quantenphysik ist es also nur natürlich, dass Elektronen eine Barriere durchtunneln können, auch wenn sie nicht über ausreichend Energie zur Überwindung dieser Barriere verfügen.

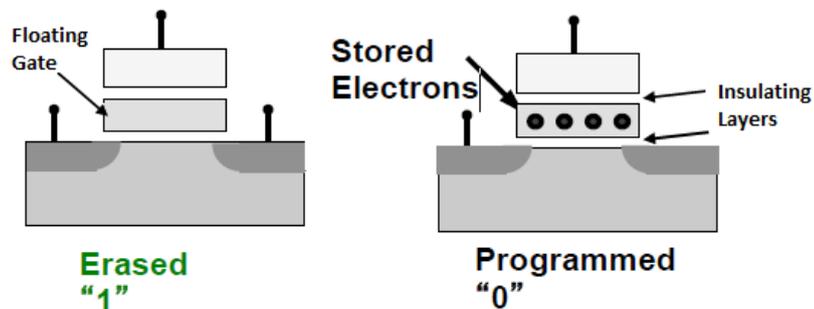
3.a Eine Anwendung: Flash-Speicher

Eine Anwendung, die auf der Durchtunnelung von Elektronen basiert, ist Flash-Speicher, der in USB-Sticks, Smart Cards und dergleichen zum Einsatz kommt. Ein solcher Speicher behält seine Daten ohne eine externe Energiequelle.

Er basiert auf der Speicherung von Elektronen. Die Elektronen werden in einem sogenannten Floating Gate gespeichert, das über Oxidschichten *vom übrigen Gerät isoliert ist*: Alle Elektronen darauf werden „gefangen“ und speichern dadurch die Informationen.

Die Elektronen werden durch die Isolierschicht getunnelt und im Floating Gate eingefangen. Nach der Durchtunnelung sollte die Barriere ausreichend dick gestaltet werden, damit die Elektronen dort über viele Jahr bleiben.

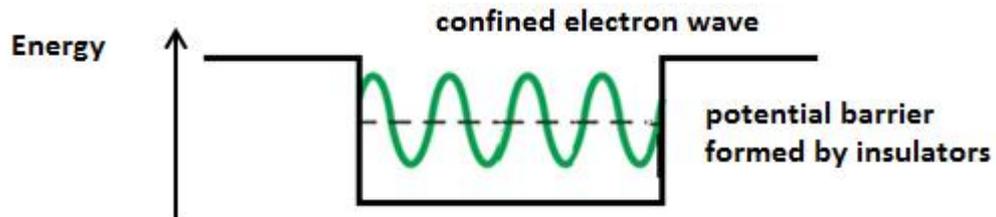
Die Durchtunnelung von Elektronen durch eine (elektrische) Potenzialbarriere lässt sich durch den Wellencharakter der Elektronen erklären, eine Hypothese der Quantenphysik.



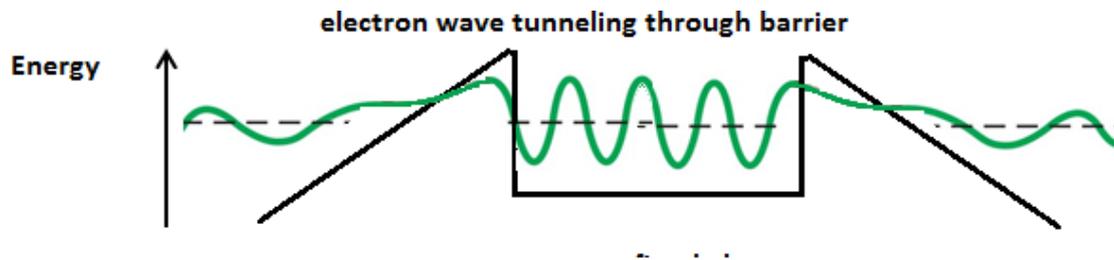
Quelle: Massachusetts Institute of Technology Open Course Ware

3.b Erklärung von Flash-Speicher anhand des Tunneleffekts von Elektronenwellen

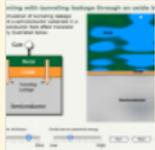
Die umgebenden Isolierschichten halten die Elektronen in der Energiekavität, wo sie viele Jahre lang ohne externe Energiequelle verbleiben können. Dies ist die Grundlage für nichtflüchtigen Speicher.



Über die Schaltung eines elektrischen Feldes über das Gate können die Potenzialbarrieren dünner gemacht werden, damit die Elektronen aus dem Gate oder wieder hinein gelangen können. Der Tunneleffekt ermöglicht das Schreiben von Nullen oder Einsen in das Gate.



Weitere Lernmaterialien zum Tunneleffekt und eine Simulation der Funktionsweise des Flash-Speichers finden Sie auf concord.org.



Quantum Tunneling

Explore the unique concept of quantum tunneling and its importance to modern technology.

[Quantum Tunneling](#)

Simulationen des Quanten-Tunneleffekts auf Concord.org

3.c Tunneleffekt liegt vielen Prozessen zugrunde

Es wird immer offensichtlicher, dass der Quanten-Tunneleffekt eine wichtige Rolle in der Chemie und auch in der Biochemie spielt¹. Bei der Fotosynthese tunneln Elektronen zum Beispiel zwischen Molekülen, durchdringen Membranen usw. und ermöglichen so eine schnelle Energieübertragung. Die Forschung in diesem Bereich hat im neu aufkommenden Feld der Quantenbiologie viele Möglichkeiten eröffnet, und es ist sogar eine Methode zur Entwicklung effizienterer Solarzellen in Aussicht.

Auch Vorgänge wie der radioaktive Alphazerfall können nur mit dem Tunneleffekt erklärt werden: In diesem Fall ist es ein He-Kern, der aus einem grösseren Atomkern heraustunnelt. Die rein stochastische Natur von radioaktiven Prozessen lässt sich mit der Quanteneigenschaft der Teilchen erklären. Der Welle-Teilchen-Dualismus bietet eine Erklärung für das probabilistische Wesen der Natur, wie sie sich auf Nanoebene zeigt. Die Amplituden der quantenmechanischen Wellen sind proportional zur Wahrscheinlichkeit der Messung eines Energiequants (einem Teilchen) an unterschiedlichen Orten.

In elektronischen Schaltkreisen sind leitende Bereiche (von Metallen gebildet), in denen sich Elektronen bewegen, durch isolierende Schichten voneinander getrennt, in die Elektronen nach der klassischen Theorie nicht eindringen können. Diese isolierenden Bereiche fungieren als Barrieren für freie Elektronen, damit sich diese nur innerhalb der leitenden Bereiche bewegen können. In älteren Schaltkreisen waren die Barrieren sehr dick und die Durchtunnelung von Elektronen vernachlässigbar. Im Zuge immer *dünnere / dicker* werdender Barrieren wird der Tunneleffekt jedoch ein signifikanter Faktor, und die Barrieren verlieren einen Teil ihrer begrenzenden Funktion. Das stellt ein Problem bei der weiteren Miniaturisierung von Schaltkreisen dar. Andererseits eröffnen sich mit der Durchtunnelung Möglichkeiten für neue Anwendungen.

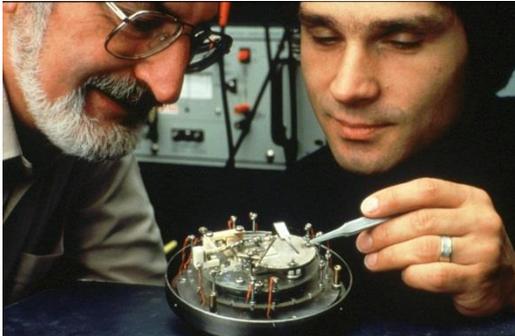
Während Sie diese Seite lesen, kommt es sowohl in der Natur als auch in der Technologie zu Trillionen von Tunnelereignissen. Der Tunneleffekt ist eine Eigenschaft der Natur, die Nanowissenschaftler und -Ingenieure noch besser verstehen müssen.

Eine faszinierende Anwendung der Elektronen-Durchtunnelung ist das Rastertunnelmikroskop – ein Gerät, mit dem es möglich ist, atomare, und sogar subatomare, Größenordnungen sichtbar zu machen.

¹ Siehe zum Beispiel: C. C. Moser, J. M. Keske, K. Warncke, R. S. Farid und P. L. Dutton (1992). Nature of biological electron transfer. *Nature*, 355(6363), 796-802.

4 Scanning Tunneling Microscopy (STM)

4.a Rastertunnelmikroskop



Das Rastertunnelmikroskop (oder Scanning Tunneling Microscope) wurde 1982 in der Schweiz am IBM Forschungslabor in Rüschlikon entwickelt und 1986 mit dem Physik-Nobelpreis ausgezeichnet. Mit dem STM konnte man erstmals „Atome sehen“ bzw. „ertasten“. Die dazu nötigen technischen und physikalischen Voraussetzungen werden im Folgenden besprochen.

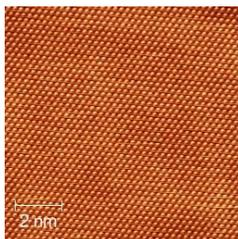
Heinrich Rohrer und Gerd Binnig mit ihrem ersten Rastertunnelmikroskop. (Quelle: IBM)

Anwendung der Wellennatur

Die Quantenmechanik lehrt, dass sich Elektronen im Atom nicht wie kleine Kügelchen auf Bahnen bewegen, sondern sich etwas „verschmiert“, in Bereichen aufhalten – sprich Orbitale, von welchen wir in der Lernstation V gesprochen haben. Dies ist eine Folge der Wellennatur der Elektronen. In einem Atomverbund z.B. einem Metall *können sich also Elektronen mit einer kleinen Wahrscheinlichkeit auch knapp ausserhalb der Oberfläche aufhalten*, was gemäss der klassischen Physik nicht möglich ist. Bringt man nun eine Messspitze nahe genug an diese Metalloberfläche, kann ein kleiner elektrischer Strom gemessen werden. Es sieht klassisch so aus, als würden die Atome durch diese Lücke bzw. Energiebarriere „hindurchtunneln“. Deshalb wird der Effekt auch „Tunneleffekt“ genannt.

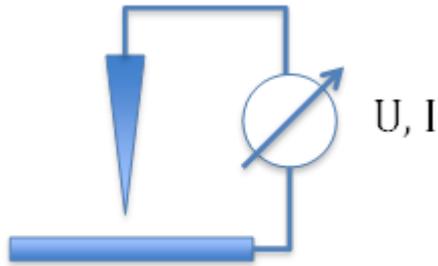


Das Rastertunnelmikroskop von NanoSurf



STM Bild: Atomare Struktur von Silber (Ag(111))

(Quelle: Universität Basel, Departement Physik)



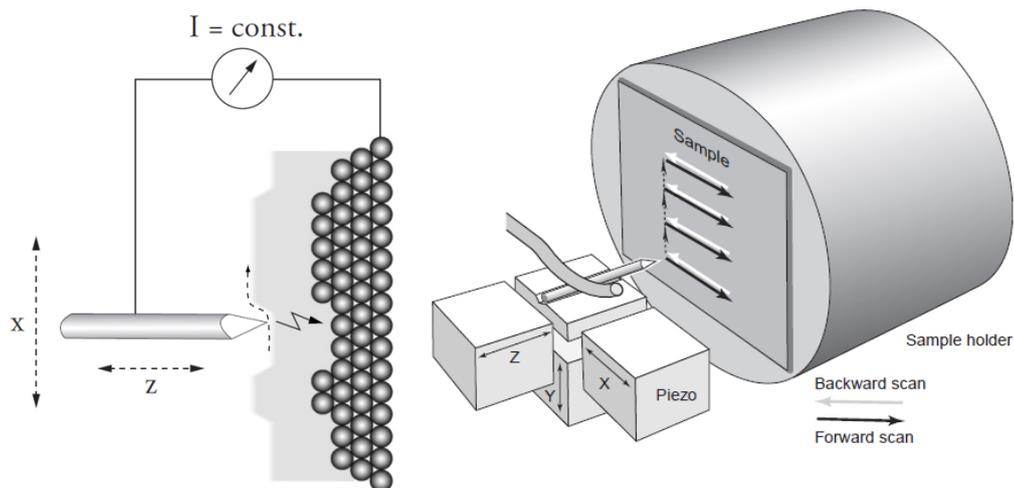
Da sich die Elektronen nur sehr knapp über der Oberfläche aufhalten – *in 1-2 Atomdurchmesser Abstand* – muss die Messspitze sehr nahe und genau an die Oberfläche gebracht werden. Dies war schon in den 1950iger Jahren bekannt, jedoch war nicht klar, wie das technisch umgesetzt werden könnte. Erst 1982 haben dies Gerd Binnig und Heinrich Rohrer mit einem Gerät, dem Raster-Tunnelmikroskop, umgesetzt.

Aufgabe 4.1:

Versuchen Sie sich klar zu machen, welche Einflüsse hinderlich sind, wenn eine Spitze mit einem Atomabstand ($\sim 0,1\text{nm}$) über einer Oberfläche positioniert werden muss.

Funktionsprinzip des STMs:

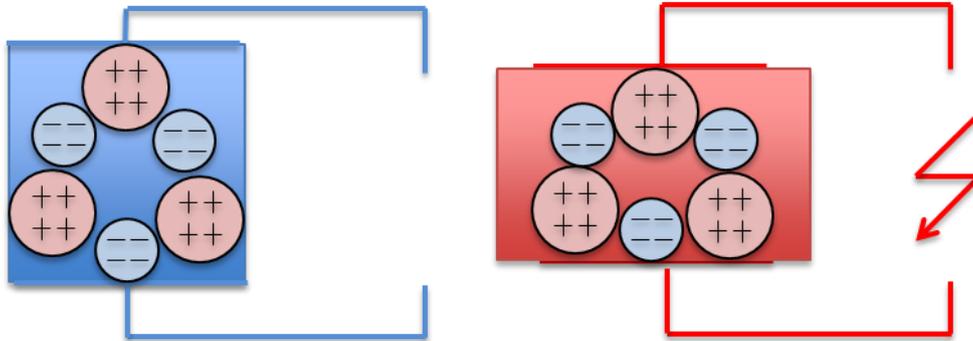
Das Rastertunnelmikroskop basiert auf der Messung des **Tunnelstroms** auf der Oberfläche der Probe. Hierzu wird eine Platin- oder Wolfram-Spitze verwendet, welche über die Oberflächen mit definiertem Tunnelstrom rastert. Der Stellmechanismus führt die Spitze derart entlang der Oberfläche, dass immer derselbe Strom gemessen wird. Die Nachführbewegungen² werden aufgezeichnet und ergeben ein Abbild der Oberfläche.



Figur 4.1: Funktionsprinzip des STMs

² Die Bewegung der Spitze entlang der Oberfläche, bzw. die Stellgröße der entsprechenden Piezostellelemente in der x-z Ebene (vgl. Fig 4.1).

Für diese heikle Positionier-Aufgabe eignen sich so genannte Piezokristalle, z.B. Quarz oder Blei-Zirkontitanat. Diese Piezokristalle dehnen sich minimal aus, wenn eine elektrische Spannung angelegt wird. Umgekehrt erzeugen sie eine Spannung, wenn sie zusammengedrückt werden.

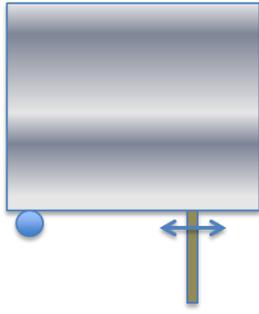


Figur 4.2: Funktionsprinzip Piezokristall: Piezokristalle leiten eine Ladung weiter, wenn sie zusammengedrückt, verdreht oder zerstört werden. Beim Zusammenpressen eines Piezokristall generieren wir eine elektrische Spannung, somit können wir einen elektrischen Strom durch ihn erzeugen, indem wir zwei Seiten zusammen verbinden und so einen Stromkreis erhalten (siehe rechtes Bild). Der umgekehrte Prozess ist im linken Bild dargestellt: Der Kristall wird automatisch mechanisch verformt, wenn eine Spannung auf der gegenüberliegenden Seite angelegt wird.

Aufgabe 4.2:

Wo begegnen uns im Alltag Piezokristalle?

Die nächste technische Herausforderung zum Bau eines STM ist die Annäherung der Spitze zur Oberfläche der zu messenden Probe. Dazu können aufwändige präzise Mikrometerschrauben mit Schrittmotorantrieb verwendet werden oder einfache Piezo Schrittmotoren.



Die Arbeitsweise ist folgende: Wir brauchen einen Zylinder, welcher auf einer Auflage (blau) liegt und eine bewegliche Piezokristall-Lamelle (grün), die durch eine elektrische Spannung vor- und zurückbewegt werden kann. Wird die Lamelle langsam nach rechts bewegt, so kann der Zylinder der Bewegung folgen; wird die Lamelle schnell nach rechts zurück bewegt, so kommt der Zylinder aufgrund seiner Trägheit nicht mit und bleibt liegen. Wiederholt man diesen Ablauf, so fährt der Zylinder nach rechts.

Mit dieser Art von Motoren können 50-100-Nanometer grosse Schritte ausgeführt werden, so dass eine Probe in den Stellbereich der Mess-Spitze gebracht werden kann.

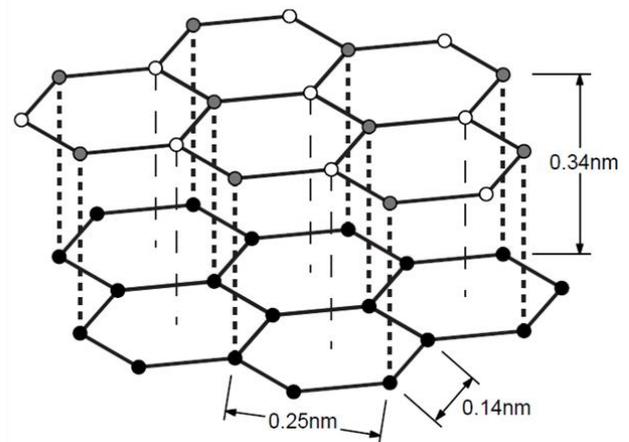
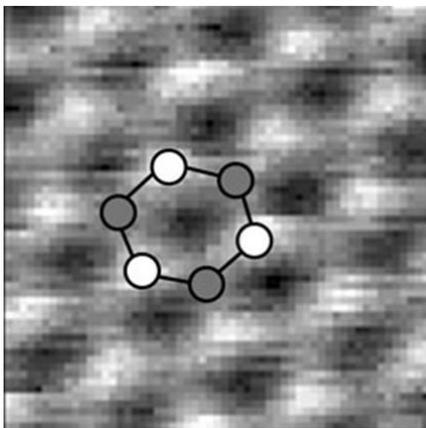
Aufgabe 4.3: Temperaturempfindlichkeit:

Berechnen Sie, wie stark sich der Zylinder ausdehnt bei einem Kelvin Erwärmung.

Länge Zylinder 2.5cm, Ausdehnungskoeffizient Eisen: $\alpha = 11,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Welche Vorkehrungen müssen demnach für einen reibungslosen Betrieb getroffen werden?

Das Raster-Tunnelmikroskop misst nicht nur die Form der Oberfläche, sondern gleichzeitig auch die elektrische Leitfähigkeit nahe der Probenoberfläche. Wird an einem Ort ein höherer Strom gemessen, kann dies auch daher kommen, dass dort die Elektronen weniger stark an die Atome gebunden sind, als an anderen Orten. Diesen Effekt kann man bei der Messung von Graphit sehen.

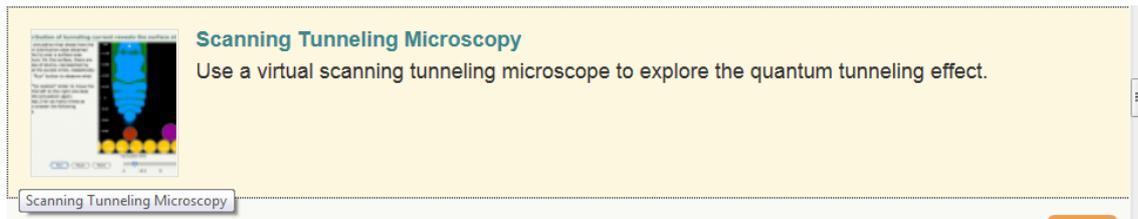


Links, eine Messung des atomaren Gitters einer Graphitoberfläche – man sieht jedoch nicht die hexagonale Struktur des aus Streuexperimenten bekannten Gitters. Es scheint so, dass man nur jedes 2-te Kohlenstoffatom im STM Bild sieht.

Aufgabe 4.4:

Wie erklären Sie sich anhand der Struktur der Graphitlagen, dass nur jedes 2.te Atom sichtbar ist?

Sie können auf concord.org mehr Lernmaterialien zum Rastermikroskop finden



Simulationen vom STM auf Concord.org

Lösungen:

4.1:

Vibrationen, thermische Ausdehnung.

4.2:

Piezo-Lautsprecher, Schwingquarz in Uhren und Radios, Piezo-Anzünder³

4.3:

$\Delta L \approx \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T = 295\text{nm}$. Das Raster-Tunnelmikroskop misst im Bereich von Nanometern und die Ausdehnung sind mehrere hundert Nanometer, so dass die Messung erheblich gestört wird. Es müssen Vorkehrungen zur Thermischen Stabilisierung getroffen werden, wie z.B. Luftzugabschirmung mit einer Haube, keine direkte wärmende Lichtquelle benutzen oder genügend Zeit zur Stabilisierung lassen.

4.4:

Es gibt 2 verschiedenen Positionen im Graphitgitter: die „grauen“ mit einem Nachbar in der unteren Gitterebene – die Elektronen dieser Atome wechselwirken mit dem Atomen der unterliegenden Lage und sind deshalb stärker gebunden. Die „weissen“ Atome haben keinen Nachbarn in der unterliegenden Ebene und können die Elektronen leichter abgeben und sind dadurch deutlicher sichtbar.

³ Piezoanzünder werden in Gasgrills oder Feuerzeugen verwendet.

5 Konzepte der Lernstation VIII

Klassische Konzepte

Makroskopische Objekte können nur die Barriere der potentiellen Energie überwinden, wenn sie **genügend kinetische Energie** haben.

Totalreflexion tritt auf, wenn **Lichtstrahlen**, die von einem optisch **dichten** Medium zu einem optisch **dünnen** Medium verlaufen, wobei der Einfallswinkel **grösser** ist als der kritische Winkel.

Der gleiche Effekt kann mit Wasserwellen beobachtet werden, da die Geschwindigkeit der Wasserwellen von der **Tiefe** des Wassers abhängt. Wenn jedoch der vom tiefen Wasser erzeugte Spalt ausreichend **schmal** ist, - in der Größenordnung der Wellen selbst – dann können die Wellen den Spalt durchtunneln und gelangen (teilweise) darüber hinaus.

Quanten Konzepte

Teilchen können durch eine Energiebarriere durchtunneln aufgrund ihres **Quantenwellencharakters**.

Das ist ein Quanteneffekt, da tunneln **Quantum für Quantum** geschieht - jedes Photon hat eine Wellennatur.

Aufgrund der **Wellen-Teilchen Dualität** können Elektronen und Materie allgemein ebenfalls tunneln. Das heisst sie können durch eine Energiebarriere tunneln, obwohl sie nicht genügend Energie haben, um die Barriere zu überwinden.

Die Möglichkeit von Quantenobjekten durch eine Energiebarriere durch zu tunneln, hängt von der **Teilchenenergie** und der **Höhe und Breite** der Barriere ab.