

---

# Das Raster-Tunnelmikroskop

---

---

Übersicht	1
Vorgehen	2
Lernziele von Kapitel 1	2
1.1 Die Funktionsweise des Raster-Tunnelmikroskops	3
1.2 Der Aufbau des Raster-Tunnelmikroskops <i>easyScan</i>	9
1.3 Probenoberflächen	12
1.4 Ergänzungen: Verwandte des Raster-Tunnelmikroskops, Vertiefungen	15
Lernkontrolle	17
Lösungen zu den Aufgaben	18

---

## Übersicht

Sie haben in der Quantenphysik den Tunneleffekt kennengelernt. In diesem Kapitel lernen Sie ein Gerät kennen, das den Tunneleffekt benutzt. Das Raster-Tunnelmikroskop (RTM) ist eine völlig neue Art von Mikroskop. Es kann einzelne Atome abbilden.

Das RTM wurde Anfang der 80er Jahre am IBM-Forschungslabor in Rüschlikon erfunden. Im Unterschied zu den konventionellen Mikroskopietechniken wird hierbei nicht mehr Strahlung analysiert, die von der Probe reflektiert oder gestreut wurde. Man fährt vielmehr mit einer winzigen Sonde über die Oberfläche und nutzt den Tunneleffekt aus. Die räumliche Auflösung ist dann nicht mehr durch eine Wellenlänge begrenzt. Das Ergebnis: ein unerhörtes Auflösungsvermögen! Man kann mit dem Tunnelmikroskop Dimensionen vom Durchmesser eines Atoms “sehen”. In den Jahren nach der Erfindung gingen viele faszinierende Bilder atomarer Landschaften um die Welt. Bald folgten weitere, artverwandte Mikroskopiearten, wie zum Beispiel das Raster-Kraftmikroskop. Dessen Mikroskopspitze kann man auch als Werkzeug benutzen, um einzelne Atome auf der Oberfläche hin und her zu schieben. Heute sind alle diese Techniken und ihre Anwendungen ein aktiver Forschungsgegenstand (Stichwort: Nanotechnologie). Kein Wunder also, dass Binnig und Rohrer für ihre bahnbrechende Erfindung 1986 den Nobelpreis erhielten. Und für uns Grund genug, uns dieses Gerät ein bisschen genauer anzusehen...

Zu Beginn dieses Kapitels werden Sie das Prinzip dieses Gerätes kennenlernen. Interessant ist auch, wie man die physikalischen Grundgedanken technisch verwirklichen kann. Das erläutern wir am Beispiel eines RTM, das für Schulen geeignet ist: das *easyScan* von der Firma Nanosurf. In diesem Zusammenhang erfahren Sie auch etwas über Piezoelemente und

warum man sie braucht, um Atome abtasten zu können. Dann erhalten Sie einen kurzen Einblick in die Welt der Oberflächen, die Sie mit dem RTM untersuchen können. Im letzten Abschnitt erhalten Sie noch einige Anregungen, wie Sie Ihr neu erworbenes Wissen vertiefen können. Dabei lernen Sie einige mit dem Tunnelmikroskop verwandten Mikroskope kennen.

### **Vorgehen**

Am besten gehen Sie wie folgt vor: Zuerst studieren Sie die Lernziele. Dann arbeiten Sie den Stoff durch. Er ist mit Experimenten, Aufgaben und Gruppenarbeiten aufgelockert. Am Schluss des Kapitels finden Sie die Lösungen zu den Aufgaben.

Wenn Sie die Lernkontrollen mit eigener Anstrengung erledigt haben, gehen Sie zu Ihrem Lehrer, Ihrer Lehrerin oder der Tutorin, dem Tutor, um einen Kapiteltest zu absolvieren. Sollten Sie sich im Stoff aber noch unsicher fühlen, dann studieren Sie zuvor unbedingt nochmals die entsprechenden Abschnitte.

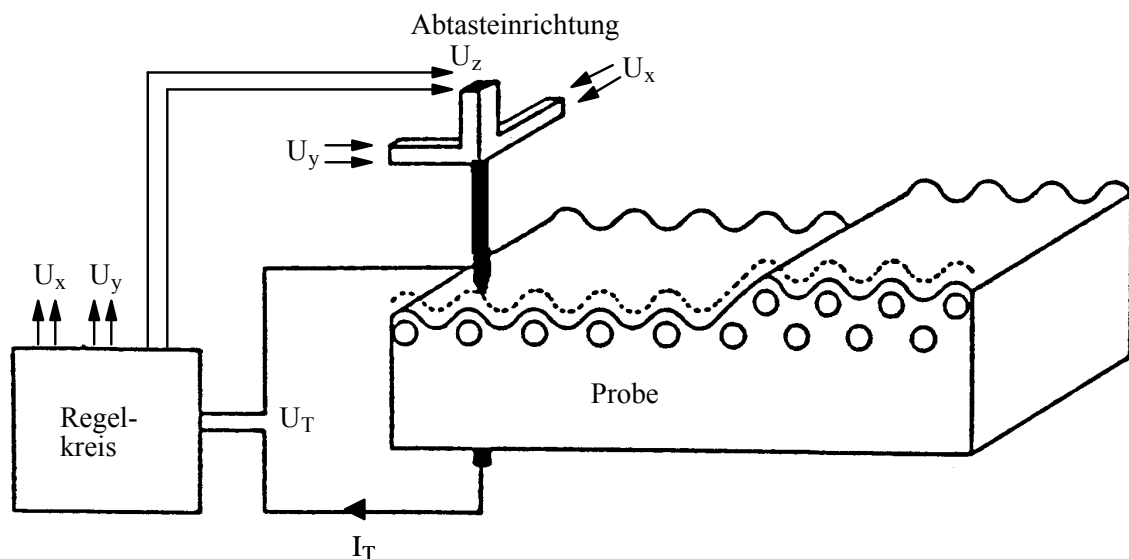
Genug jetzt mit den organisatorischen Dingen! Blättern Sie um und begeben Sie sich auf Entdeckungsfahrt in die Quantenphysik.

## **Lernziele von Kapitel 1**

- Sie verstehen das Funktionsprinzip der Raster-Tunnelmikroskops und wissen, welche Rolle dabei der Tunneleffekt spielt.
- Sie können mindestens drei Probleme bei der technischen Umsetzung nennen und wissen, wie diese gelöst wurden.
- Sie sind in der Lage, einem Mitschüler zu erklären, wie die RTM-Aufnahme einer Graphitoberfläche zustande kommt.
- Sie können zwei mit dem Tunnelmikroskop verwandte Mikroskope und deren Anwendung beschreiben

## 1.1 Die Funktionsweise des Raster-Tunnelmikroskops

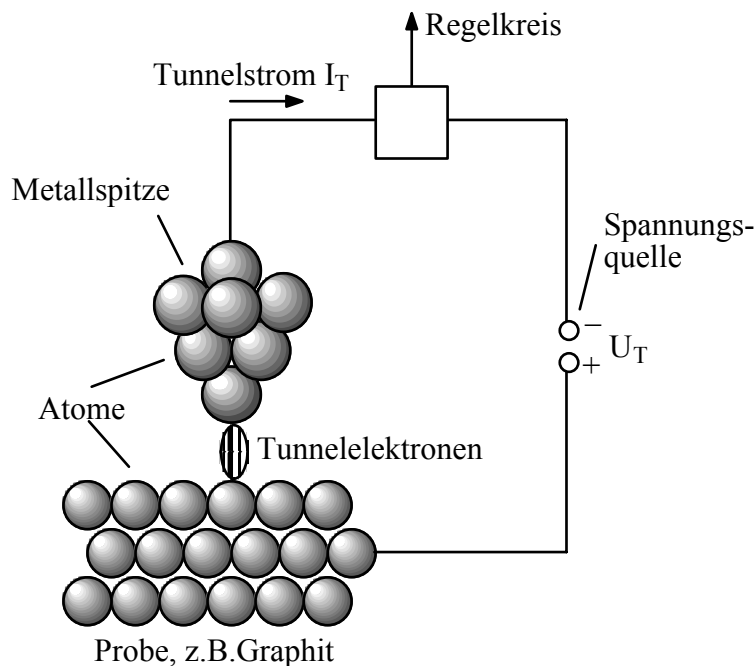
Beim Raster-Tunnelmikroskop wird eine feine Metallspitze sehr nahe an die Probenoberfläche herangeführt. Meistens beträgt der Abstand etwa  $1 \cdot 10^{-9}$  m, also einige Atomlagen. Für die Elektronen in der Probe und in der Spitze ist der Aufenthalt in der Zone dazwischen eigentlich verboten. Diese Zone ist aber so dünn, dass die Elektronen einfach hindurchtunneln können. Legt man jetzt eine kleine Spannung  $U_T$  an, fließt ein Tunnelstrom  $I_T$ , den man messen kann (Figur 1.1). Dieser Strom hängt stark vom Abstand zwischen der Spitze und den Strukturen auf der Oberfläche ab. Jetzt fährt man mit der Spitze über die Oberfläche und hält dabei entweder die Höhe der Spitze oder den Tunnelstrom konstant. Man registriert dabei den Tunnelstrom bzw. die Regelparame-ter. Fährt man immer in parallelen Linien über die Oberfläche, tastet man sie also ab wie ein Buch in Blindenschrift, dann erhält man ein dreidimensionales Bild der Oberfläche.



Figur 1.1: Prinzip des Raster-Tunnelmikroskops

Was hier so einfach klingt, enthält in Wirklichkeit einiges an Physik und die Lösung einer Reihe technischer Probleme. Zuerst werden wir uns mit den physikalischen Prinzipien genauer auseinandersetzen. Die technische Umsetzung behandeln wir weiter unten am Beispiel des easyscan-Rastertunnelmikroskops.

### Der Tunneleffekt beim Tunnelmikroskop



Figur 1.2 a: Vereinfachtes Schema zum Tunneln beim Tunnelmikroskop

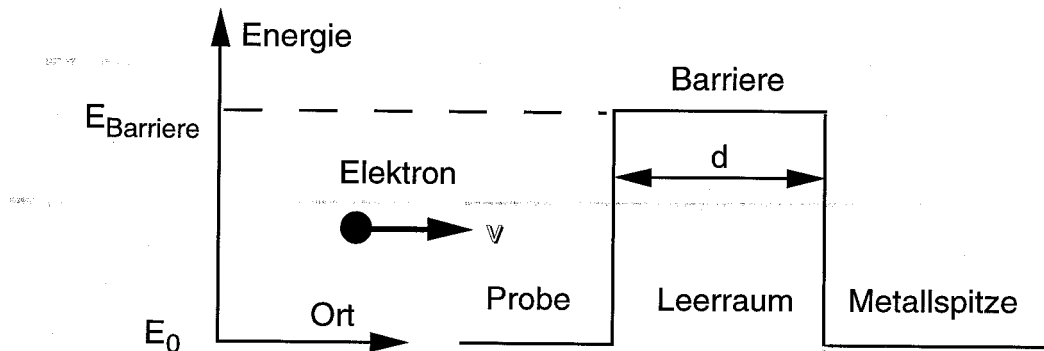
Figur 1.2 a) zeigt schematisch die Spitze, die Probenoberfläche und den Leerraum dazwischen. Im Stromkreis zwischen Probe und Spitze wird laufend die Stromstärke gemessen (Größenordnung Pikoampere  $10^{-12}$  A). Mit dem RTM kann man also nur leitende Proben untersuchen. Aktiv an der Abbildung beteiligt ist eigentlich nur die Spitze der Metallspitze, also die vordersten Atome. Je kleiner aber die Strukturen sind, die man abbilden will, desto schärfer muss auch die verwendete Spitze sein. Zum Glück ist es recht einfach, scharfe Spitzen herzustellen. Für eine räumliche Auflösung, die besser als der Atomdurchmesser ist, muss jedoch ein einziges Atom auf der Spitze der Nadel sitzen. Häufig kommt so ein Atom von der Probenoberfläche selbst. Es wird durch die hohen elektrischen Felder aus der Oberfläche gelöst und bleibt an der Spitze hängen.

Die Leitungselektronen in einem Metall können sich im Inneren des Metalls praktisch frei bewegen. Sie können es jedoch nicht verlassen, weil sie von den positiven Atomrümpfen zurückgehalten werden. Wer sie trotzdem aus der Oberfläche herausholen will, muss Arbeit verrichten, nämlich die sogenannte Austrittsarbeit. Wir kürzen sie mit dem Buchstaben  $\Phi$  ab. In einem glühenden Metall reicht dazu die kinetische Energie der Wärmebewegung aus, wie Edison als erster beobachtet hat. Bei Zimmertemperatur dürfte jedoch nach den Gesetzen der klassischen Physik nichts passieren. Der Aufenthalt im Gebiet zwischen Spitze und Probe ist für das Elektron verboten. Dort ist ein zu hoher Potentialberg.

Wie Ihnen aus der Einführung in die Quantenphysik bekannt ist, ist für Quantenobjekte das Tunneln durch Barrieren der Höhe  $E_{\text{Barr}}$  und der Breite  $d$  unter folgender Bedingung erlaubt:

$$\text{Tunnelbedingung:} \quad d \cdot \sqrt{E_{\text{Barr}}} \leq h \cdot \sqrt{\frac{2}{m}}. \quad (*)$$

In einem Energie-Orts-Diagramm sieht das folgendermassen aus:



Figur 1.2b): Tunneln durch eine Potentialbarriere der Höhe  $E_{\text{Barr}}$  und der Breite  $d$ .

Hinweis: Der Potentialberg ist hier der Einfachheit halber als eckig angenommen worden.



### Aufgabe 1.1

a) Zeichnen Sie ein Energie-Orts-Diagramm für Metall und Aussenraum beim Tunnelmikroskop analog zum Diagramm in Figur 1.2b). Zeichnen Sie darin die Austrittsarbeit  $\Phi$  ein. Wie hängt  $\Phi$  von den Grössen  $E_0$  und  $E_{\text{Barr}}$  in Figur 1.2 b) ab?

b) Denken Sie nun bitte noch einmal klassisch. Argumentieren Sie anhand des Diagramms, warum ein Elektron bei Raumtemperatur im Metall bleibt und ein Elektron bei sehr hohen Temperaturen das Metall verlassen kann. Zeichnen Sie dazu die beiden Elektronen und ihre kinetischen Energien ins Diagramm ein.

Nun bedienen wir uns wieder der Quantenphysik. Den Fall von Probe und Metallspitze haben Sie im letzten Abschnitt schon kennengelernt: Figur 1.2 b) zeigt vereinfacht das Energiediagramm dafür. Das Elektron in der Probe wird von der Metallspitze durch eine Potentialbarriere getrennt. Obwohl es nach der klassischen Physik eingeschlossen bliebe wie ein zu langsamer Wagen bei der Berg- und Talfahrt, kann es nach der Quantenphysik die Energiebarriere durchtunneln.

### Die Tunnelbedingung

Jetzt können wir nachrechnen, ob die aus der Unschärferelation hergeleitete Tunnelbedingung (\*) beim Raster-Tunnelmikroskop erfüllt ist. Die Breite des Potentialberges entspricht gerade dem Abstand  $d$  von Probe zu Spitze, also etwa  $10^{-9}\text{m}$ . Seine Höhe  $E_{\text{Barr}}$  wird durch die Austrittsarbeit bestimmt und beträgt einige eV, also etwa  $10^{-18}\text{J}$ .

Es gilt also einerseits:

$$d \cdot \sqrt{E_{\text{Barr}}} \approx 10^{-9}\text{m} \cdot \sqrt{10^{-18}\text{J}} \approx 10^{-18}\text{J} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1/2}$$

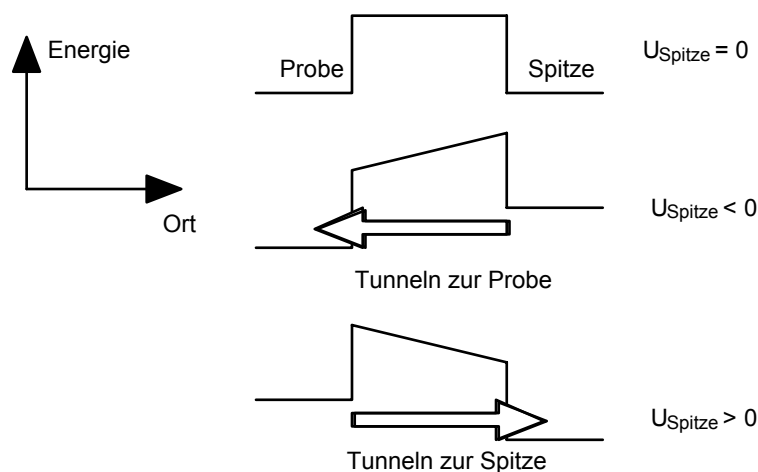
Andererseits ergibt sich ebenfalls:

$$h \cdot \sqrt{\frac{2}{m}} \approx 7 \cdot 10^{-34}\text{J} \cdot \text{s} \cdot \sqrt{2 \cdot 10^{30}\text{kg}^{-1}} \approx 10^{-18}\text{J} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1/2}$$

Diese Abschätzung der Grössenordnung zeigt, dass wir die komplizierten Prozesse beim Tunnelmikroskop mit der Unschärferelation verstehen können.

## Der Tunnelstrom

Vielleicht werden Sie jetzt sagen, dass Elektronen nicht nur aus der Probe in die Spitze tunneln können, sondern auch umgekehrt. Zurecht! Auch die Elektronen in der Metallspitze können zur Probe tunneln. Man kann also in Figur 1.2b) auch ein Elektron auf der Seite der Metallspitze zeichnen, für das die gleichen Überlegungen gelten. Im Bild ist der Einfachheit halber angenommen worden, dass Probe und Spitze die gleiche Austrittsarbeit haben. Legen wir nun eine kleine Spannung  $U$  an, fliesst ein Tunnelstrom. In welche Richtung der Strom fliesst, hängt natürlich von der Polarität der angelegten Spannung ab. Er kann also entweder von der Spitze zur Probe oder umgekehrt fließen. Figur 1.3 verdeutlicht diesen Sachverhalt: Im Energieschema wirkt sich eine zusätzlich angelegte Spannung so aus, als ob den Elektronen auf einer Seite der Energiebarriere zusätzlich Energie zugeführt worden wäre. Diese Elektronen können dann als elektrischer Strom auf die andere Seite fließen, ähnlich wie der Grundwasserfluss zwischen zwei benachbarten Seen auf unterschiedlicher Höhe. Das Potentialgefälle wird durch eine schräge Potentialbarriere dargestellt.



Figur 1.3: Je nach angelegter Spannung tunneln Elektronen zur Probe oder zur Spitze

Die quantitativ ausgestaltete Quantenphysik erlaubt, abzuschätzen, wie gross dieser Tunnelstrom ist und wie er vom Abstand  $d$  zwischen Probe und Spitze abhängt. Wir müssen uns hier damit begnügen, einen Ausdruck für den Tunnelstrom anzugeben.

Es gilt:

$$I_T = c_1 \cdot U_T \cdot e^{-c_2 \sqrt{\Phi} \cdot d}$$

Der Tunnelstrom nimmt also exponentiell mit dem Abstand ab. Die Konstante  $c_1$  hängt dabei von der Elektronendichte in Probe und Spitze ab. Der Exponent enthält eine weitere Konstante  $c_2$  und die Austrittsarbeit der Metalle. Haben Spitze und Probe unterschiedliche Austrittsarbeiten, so muss hier der Mittelwert eingesetzt werden. Typische Arbeitsparameter sind folgende:  $I_T = 10^{-9}$  A,  $U_T = 100$  mV,  $\Phi = 5$  eV und  $d = 10^{-9}$  m. Mehr zu diesem komplexen Sachverhalt lernen Sie im Kapitel 3.

Wenn Sie sich die Gleichung für den Tunnelstrom noch einmal aufmerksam ansehen, werden Sie vielleicht folgendes bemerken: Das Tunnelmikroskop misst nicht einfach die Höhe von Strukturen auf der Probenoberfläche. Vielmehr hängt der Tunnelstrom neben dem Abstand  $d$  auch von der Elektronendichte ( $c_1$ ) in der Probe an der untersuchten Stelle ab. Sie werden dieser Tatsache bei der Graphitprobe wieder begegnen. Sie können sich so auch die Ringe in der Figur auf dem Titelbild erklären. Hier sind 48 Eisenatome im Kreis auf einer Kupferoberfläche angeordnet. Sie sehen mit dem RTM aber nicht nur diese Atome, sondern auch ringförmige Maxima der Elektronendichte dazwischen. Eine stehende Welle der Wahrscheinlichkeitsdichte der Elektronen!

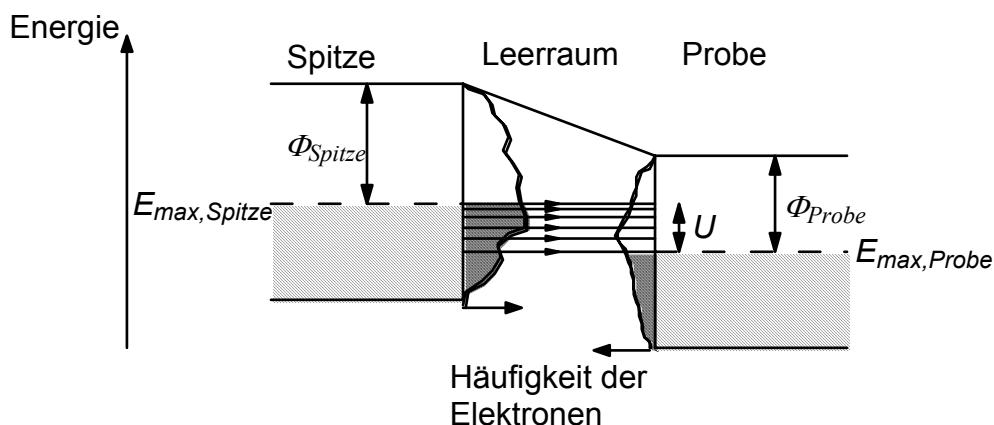


### Aufgabe 4.2

Um welchen Faktor ändert sich der Tunnelstrom, wenn man über ein Atom auf der Oberfläche fährt? Setzen Sie  $c_2 \approx \frac{10^{10}}{\sqrt{\text{eV} \cdot \text{m}}}$ .

**Wenn Sie es ganz genau wissen wollen (fakultativ):**

Unsere Vorstellung von eingeschlossenen Elektronen mit einer bestimmten Energie ist natürlich eine Vereinfachung. In Wirklichkeit sind in Metallen Elektronen verschiedener Energien bis zu einer Maximalenergie vorhanden. Auch kommen manche Energien häufiger vor als andere. Eine mögliche solche Häufigkeitsverteilung in der Probe ist in Figur 1.4 dargestellt. Vorsicht! In der Zeichnung hat die x-Achse zweierlei Bedeutung. Zum einen bezeichnet sie den Ort der Elektronen (also Spitze, Zwischenraum und Probe). Zum anderen sind die kleinen Pfeile, die im Zwischenraum eingezeichnet sind, aber die y-Achsen der Häufigkeitsverteilung der Elektronen. Diese Häufigkeit ist darüber eingezeichnet. Sie sagt, wieviele Elektronen bei einer bestimmten Energie vorhanden sind. Im Metall sind nur Elektronen mit Energien bis zu einer Maximalenergie  $E_{\text{max}}$  vorhanden, also im Diagramm nur in den schraffierten Bereichen. Beim Tunneln ins andere Metall dürfen bei einer bestimmten Energie nur so viele Elektronen dazukommen, wie von der Häufigkeitsverteilung dieses Metalls erlaubt (unschraffierter Teil der Häufigkeitsverteilung). Das Tunneln der Elektronen bei einer bestimmten Energie ist in der Zeichnung durch Pfeile angedeutet.

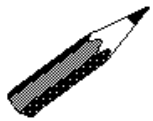


Figur 1.4: Der Tunnelstrom hängt von der Häufigkeitsverteilung der Elektronen im Metall ab

Wenn besonders viele Elektronen einer bestimmten Energie vorhanden sind und bei dieser Energie im anderen Metall besonders viele neue Elektronen erlaubt sind, ist auch der Tunnelstrom besonders gross. Die Konstante  $c_I$  in der Gleichung für den Tunnelstrom hängt demnach auch davon ab, wieviele Elektronen welche Energie besitzen dürfen. Wenn man die äussere Spannung verändert, kann man Informationen über diese Häufigkeitsverteilung der Elektronen in der Probe gewinnen. Es können Strukturen in der Elektronenhülle einzelner Atome sichtbar gemacht werden. Und daraus erfährt man wieder eine Menge über das untersuchte Material. Aus dieser Tatsache hat sich die Raster-Tunnelspektroskopie entwickelt.

### Was sieht man nun genau mit dem Tunnelmikroskop? (fakultativ)

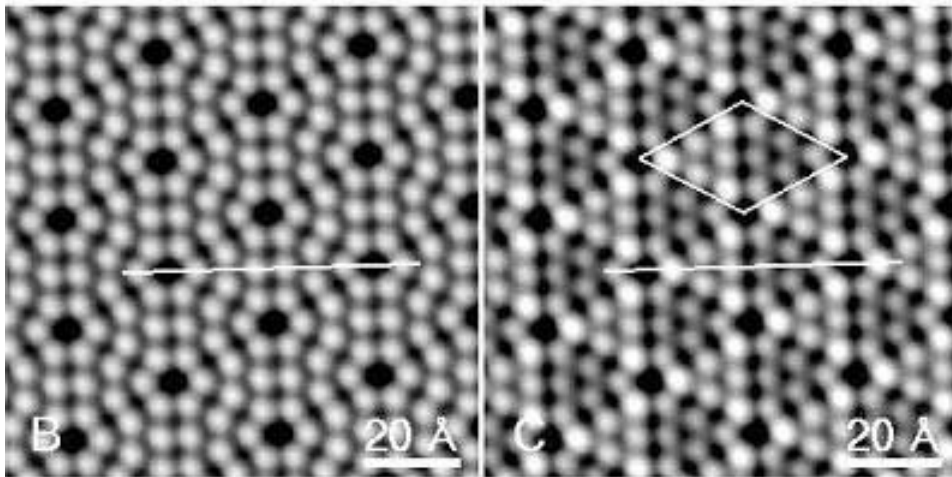
Genau genommen sehen wir die Fläche konstanten Tunnelstroms. Der Tunnelstrom ist proportional zur Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen im Festkörper und diese wiederum wird durch die Zustandsfunktion beschrieben. Was eine Zustandsfunktion ist und wie man diese mit Hilfe der Quantenmechanik berechnen kann, erfährst du in Kapitel 2. Der Tunnelstrom hängt nicht nur von der Probe ab, sondern auch von der Spitze. Wir „sehen“ nicht nur die Elektronen Verteilung auf der Probe sondern unser Bild wird auch von der elektronischen Zustandsverteilung der Spitze beeinflusst. Zur Erklärung moderner Experimente wird sogar die genaue Zustandsfunktion der Spitze berücksichtigt.



#### Aufgabe 1.3 (fakultativ)

- a) Wenn man die gleiche Probe mit zwei verschiedenen Spitzen misst, unterscheiden sich die gewonnenen Tunnelaufnahmen. Wie erklären Sie sich das?
- b) Können Sie eine Bedingung für geeignetes Spitzenmaterial ableiten?
- c) Im Bild 1.5 sehen sie zwei Aufnahmen einer Silizium Oberfläche. Die linke ist bei einer Spitzen-Oberflächen Spannung von -2V, die rechte bei +2.2V aufgenommen. Wie kann man die unterschiedlichen Aufnahmen interpretieren ? (welche Elektronen Zustände sieht man ?)

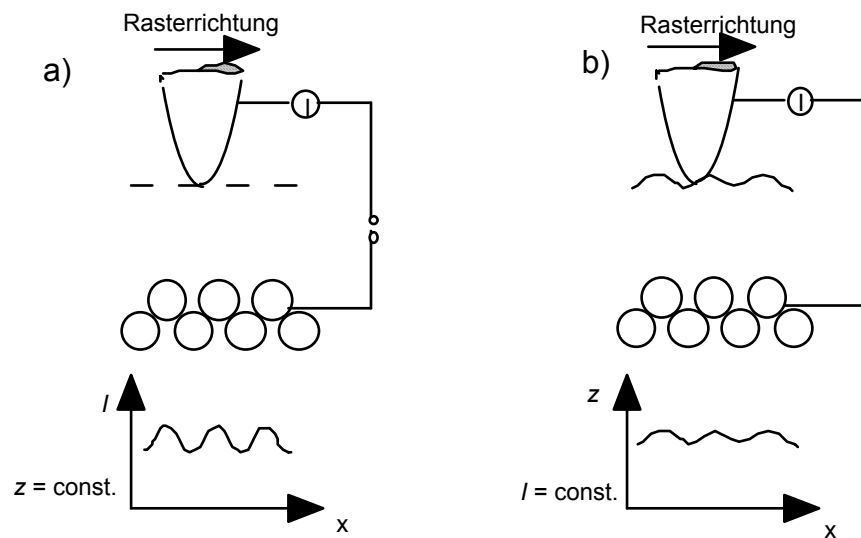




Figur 1.5: Tunnel Mikroskop Bilder einer Silizium-Oberfläche bei einer Spitzen-Proben Spannung von  $-2\text{ V}$  und  $+2.2\text{ V}$ .

### Zwei Betriebszustände

Prinzipiell kann ein Raster-Tunnelmikroskop in zwei Betriebszuständen laufen:



Figur 1.5: Rastern bei a) konstanter Höhe und b) konstantem Strom

1. Rastern bei konstanter Höhe (Figur 1.5 a): Die Spitze wird auf einer geraden Linie über die Probe geführt. Dabei misst man den Tunnelstrom.
2. Rastern bei konstantem Strom (Figur 1.5 b): Die Spitze wird so der Oberfläche nachgeführt, dass der Tunnelstrom konstant bleibt. Dabei registriert man, wie stark man die Höhe der Spitze ändern muss.

Das *easyScan* rastert bei konstantem Strom. Es ist aber auch möglich, bei konstanter Höhe zu rastern. Dazu muss man den Regler langsamer einstellen. Er folgt dann nur noch langsamen Veränderungen, z. B. thermischen Ausdehnungen.



#### Aufgabe 1.4

Überlegen Sie sich für jeden Betriebszustand einen Vor- bzw. Nachteil und notieren Sie diese in je ein bis zwei Sätzen.

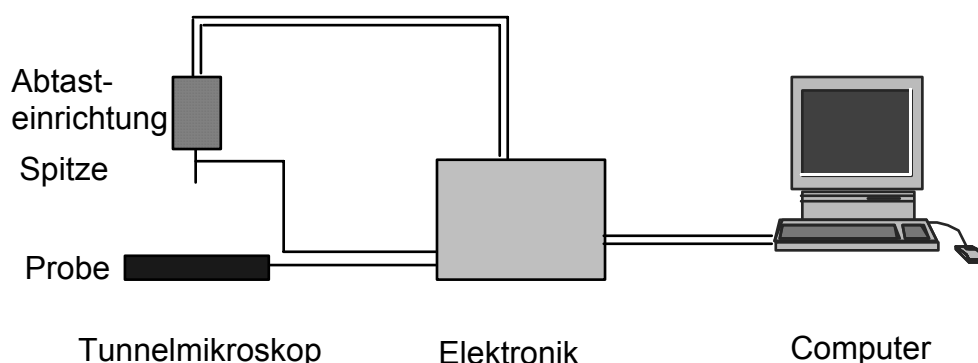


#### Wir fassen zusammen:

Mit dem Raster-Tunnelmikroskop kann man die Oberflächen leitender Proben im atomaren Bereich bildhaft darstellen. Man kann also Atome sichtbar machen! Der Tunnelstrom hängt dabei von der Elektronendichte und exponentiell vom Abstand zwischen Spitze und Probe ab. Je nach angelegter Spannung tunneln die Elektronen durch die Potentialbarriere zur Spitze oder zur Probe. Je nach Betriebsart hält man die Höhe über der Probe oder den Tunnelstrom konstant.

## 1.2 Der Aufbau des Raster-Tunnelmikroskops *easyScan*

Nachdem Sie jetzt die physikalischen Grundlagen des Raster-Tunnelmikroskops verstanden haben, sind Sie sicher gespannt, wie so ein Gerät in der Praxis funktioniert. Wir wollen das am Beispiel des RTM *easyScan* von Nanosurf erklären. Dabei werden wir experimentellen Schwierigkeiten begegnen und sehen, wie diese gelöst wurden.



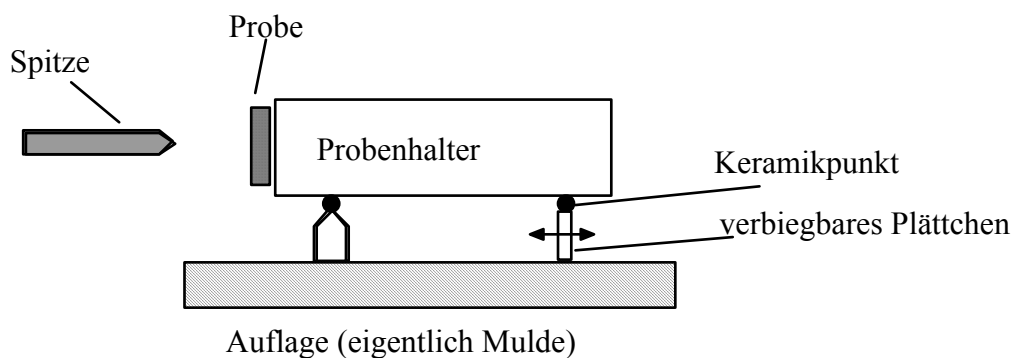
Figur 1.6: Schematischer Aufbau des *easyScan*

Das *easyScan* besteht aus drei Teilen: dem Tunnelmikroskop selbst, der elektronischen Ansteuerung und einem Computer (Figur 1.6). Das eigentliche RTM ist ein kleines Gerät, das man leicht in einer Hand halten kann und das etwa ein Kilogramm wiegt. Sein Herzstück

enthält die Spitze und die Probe auf einem kleinen Metallzylinder. Als Spitze verwendet man ein speziell abgeschnittenes Stück eines Platiniridiumdrahtes. Den Zylinder mit der Probe kann man zunächst von Hand in die Nähe der Spitze bringen. Wie aber kann man jetzt die Probe so kontrolliert an die Spitze annähern, dass sie im richtigen Abstand anhält, ohne dass die Spitze in die Probe gerammt wird?

### Grobe Abstandseinstellung

Wir haben also das Problem, dass wir einen relativ grossen Weg in vielen sehr kleinen Wegstücken zurücklegen wollen. Beim *easyScan* wurde das Problem folgendermassen gelöst: Der Metallzylinder mit der Probe liegt in einer Mulde, in der er magnetisch festgehalten wird. Dabei liegt sein hinteres Ende auf zwei Keramikpunkten, die auf einem senkrecht stehenden Plättchen angebracht sind (siehe Figur 1.7, Die Grössenverhältnisse sind übertrieben!). Dieses Plättchen verbiegt sich, wenn man eine Spannung anlegt (ein Piezoelement, siehe nächster Abschnitt). Jetzt legt man eine Sägezahnspannung an. Die Spannung steigt also langsam linear an. Dabei verbiegt sich das Plättchen und der Probenzylinder darauf wird nach vorne geschoben. Wenn die Spannung ihren Maximalwert erreicht hat, fällt sie sehr schnell wieder auf ihren Anfangswert zurück. Dadurch klappt das Plättchen ruckartig wieder in seine Anfangsposition. Diese Bewegung ist aber zu schnell für den daraufliegenden Probenzylinder. Er wird nicht wieder mit zurückbewegt, sondern bleibt ein Stückchen näher an der Spitze liegen. Mit diesem “Reibungsmotor” kann der Probenzylinder also Mikrometer für Mikrometer an die Spitze herangeschoben werden. Sobald die Elektronik jedoch einen Tunnelstrom im Nanoamperebereich feststellt, wird dieser Annäherungsvorgang abgebrochen. Spitze und Probe haben jetzt den richtigen Abstand voneinander und die Messung kann beginnen.



Figur 1.7: Der Reibungsmotor schiebt den Probenhalter zur Spitze

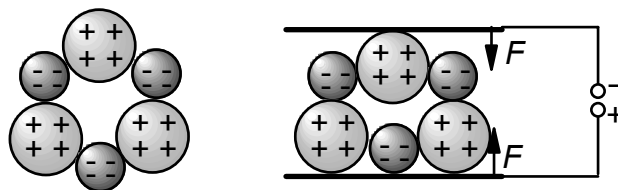
**Aufgabe 1.5**

- a) Erklären Sie, warum der Zylinder bei der langsamen, nicht aber bei der schnellen Bewegung mitgeschoben wird. Denken Sie daran, dass die beschleunigende Kraft von der Haftreibung aufgebracht werden muss.
- b) Verdeutlichen Sie sich den Vorgang, indem Sie einen kleinen Gegenstand (z.B. Kugelschreiber) auf einem Blatt Papier entlang bewegen wie den Probenzylinder auf der Unterlage. Halten Sie Ihre Beobachtungen in drei bis vier Sätzen fest.

## Piezoelemente ermöglichen atomare Auflösung

Die vielleicht schwierigste Frage bei der Entwicklung des Raster-Tunnelmikroskops war diese: Wie ist es möglich, mit einer Spitze so über eine Oberfläche zu fahren, dass man dabei eine Genauigkeit von weniger als  $10^{-11}$  m erreicht? Mit anderen Worten: Wie bewegt man eine makroskopische Apparatur in Schrittweiten, die kleiner als ein Atomdurchmesser sind? Dazu kommt, dass man diese Genauigkeit in drei Dimensionen braucht! Das Werkzeug für so feine Bewegungen sind die sogenannten Piezoelemente. Ohne leistungsfähige Piezoelemente wäre das Raster-Tunnelmikroskop nicht möglich! Wie oft in der Physik hat eine Erfindung eine andere erst ermöglicht.

Wir wollen an dieser Stelle kurz den piezoelektrischen Effekt erläutern, weil er die Grundlage für die Piezoelemente ist. Wenn Sie damit schon vertraut sind, können sie diesen Absatz getrost überspringen. Der piezoelektrische Effekt wurde 1880 von Pierre Curie entdeckt. Bei einigen Kristallen, wie z.B. Quarz oder Bariumtitanat, kann man durch mechanische Kräfte auf gegenüberliegende Seiten des Kristalls eine elektrische Spannung erzeugen. Druck auf diese Flächen bewirkt nämlich eine Ladungsverschiebung im Kristall. Entgegengesetzte Ladungen sammeln sich so an den gegenüberliegenden Kristallflächen.



Figur 1.8: Piezokristalle (z.B. Quarz: Si positiv, O negativ) erzeugen beim Anlegen einer Spannung eine deformierende Kraft  $F$ .

Auch die Umkehrung dieses Effektes ist möglich (Figur 1.8). Ein elektrisches Feld kann einen Piezokristall verformen, also auseinanderziehen oder zusammendrücken. Die Längenänderung ist angenähert linear mit der angelegten Spannung. Piezoelemente verwenden diesen inversen piezoelektrischen Effekt. Um sie zu charakterisieren, benutzt man den Begriff der Konversion. Man bezeichnet damit das Verhältnis von angelegter Spannung zu erreichter Verlängerung des Kristalls. Typische Konversionen sind  $\frac{\Delta U}{\Delta h} = \frac{100 \text{ V}}{1 \mu\text{m}}$ . (Beim

easyScan sind es  $24 \text{ V}/\mu\text{m}$ ). Die sehr geringen Längenänderungen können zur genauen Positionierung im Raster-Tunnelmikroskop verwendet werden. Als Ergebnis ist die vertikale Auflösung nur durch mechanische und elektrische Störungen begrenzt. Es wurden bereits Werte von  $5 \cdot 10^{-12}$  m erreicht. Die horizontale Auflösung liegt für eine einatomige Spitze bei  $2 \cdot 10^{-11}$  m.



### Aufgabe 1.6

- a) Ist es möglich, mit der obengenannten Konversion der Piezoelemente eine Verschiebungsgenauigkeit von einer Atomlage zu erreichen?
- b) Wie würden Sie die minimale und maximale Spannung der Steuer-elektronik bemessen, wenn Sie eine quadratische Probe von 350 nm Seitenlänge untersuchen wollten?

### Schwingungsdämpfung

Die Piezoelemente ermöglichen uns eine sehr genaue Positionierung von Probe und Spitze und erlauben damit das Abtasten der Probe. Um diese Genauigkeit aber auch einhalten zu können, muss man ein weiteres Problem in den Griff kriegen, nämlich die mechanischen Erschütterungen. Durch Schritte im Gebäude oder Schall in der Luft können Spitze und Probe viel stärker gegeneinander bewegt werden als durch die Piezoelemente. Das RTM muss deshalb einen Mechanismus zur Dämpfung solcher Schwingungen besitzen. Die ersten Tunnelmikroskope hatten dazu ausgeklügelte Dämpfungssysteme. Mittlerweile wurden einfachere und trotzdem leistungsfähige Methoden entwickelt. Das *easyScan* ist ein gutes Beispiel dafür. Es steht auf einer weichen Gummimatte, die auf einer zwei Kilogramm schweren Granitplatte mit Füßen aus Schaumstoff steht. Die Gummimatte dämpft hochfrequente Schwingungen, während die Füße aus Schaumstoff vor niederfrequenten Schwingungen schützen. Diese einfache Schwingungsdämpfung reicht zusammen mit der starren Konstruktion des Scanners aus, um atomare Auflösung zu erreichen.



### Wir fassen zusammen:

Nachdem ein Motor unter Ausnutzung der Reibung Probe und Spitze angenähert hat, übernehmen Piezoelemente die Positionierung.

Piezoelemente können sich durch eine angelegte Spannung verformen. Die vertikale Auflösung ist durch mechanische und elektrische Störungen begrenzt, die horizontale Auflösung durch die Ausdehnung des Spitzenatoms.

Für eine gute Auflösung des RTM ist die Dämpfung von Schwingungen notwendig.

## 1.3 Probenoberflächen

“Das Volumen des Festkörpers schuf Gott, seine Oberfläche wurde vom Teufel gemacht.” sagte einmal Wolfgang Pauli. Was hat den berühmten Physiker zu so einer Aussage veranlasst? Im wesentlichen sind es drei Gründe, die die Oberfläche so schwierig machen: Teilchenzahl, Sauberkeit und Anordnung der Oberflächenatome.

### 1. Teilchenzahl

Die Menge der Atome, die an der Oberfläche sitzen, ist sehr viel kleiner als die im Volumen. Eine einfache Abschätzung zeigt das. Während in einem Kubikzentimeter Volumen etwa  $10^{23}$  Atome ( $\approx 10^{-1}$  mol) enthalten sind, sind in einem Quadratzentimeter Oberfläche nur etwa  $10^{15}$  Atome ( $\approx 10^{-9}$  mol). Daher erhält man mit vielen Analysemethoden praktisch nur Informationen über die Teilchen im Volumen.

## 2. Sauberkeit

Um Oberflächen zu studieren, müssen wir sie sauber und rein halten. Bei Atmosphärendruck treffen aber in jeder Sekunde  $10^{23}$  Gasteilchen auf einen Zentimeter der Oberfläche. Jedes Atom wird also pro Sekunde etwa  $10^8$  mal getroffen. Auch wenn nur ein kleiner Bruchteil dieser Teilchen auf der Oberfläche haften bleibt, so ist doch die Zeitspanne, während der die frisch gereinigte Oberfläche sauber bleibt, sehr kurz.

## 3. Anordnung der Atome

Ein Atom im Volumen der Festkörpers ist ganz von anderen Atomen umgeben, ein Atom an der Oberfläche dagegen nur von anderen Oberflächenatomen und den Atomen gerade unter der Oberfläche. Die Oberflächenatome können sich deshalb zum Teil ganz anders anordnen als die Atome im Inneren. Die Eigenschaften der Oberfläche können sich deshalb sehr stark von denen des Volumens des Körpers unterscheiden.

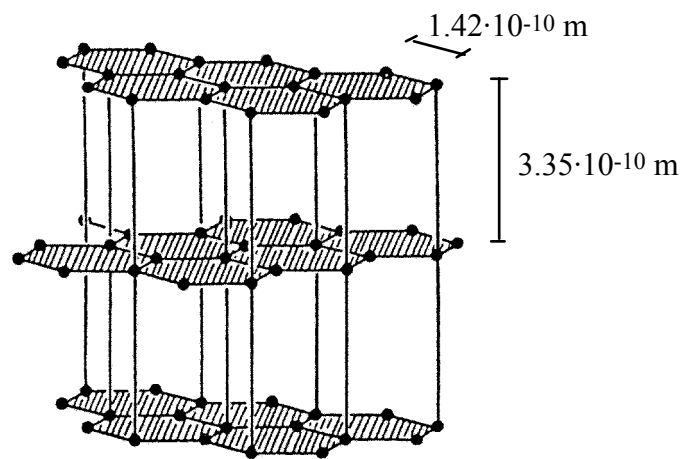
Diese Gründe sind dafür verantwortlich, dass wir viel weniger über die Oberfläche des Festkörpers wissen, als über sein Inneres. Und das, obwohl die Oberfläche von immenser Bedeutung ist: Die meisten chemischen Reaktionen laufen an Oberflächen ab (Denken Sie nur an Katalyse und Korrosion!), biologische Vorgänge spielen sich oft in Bereichen mit grosser Oberfläche ab (etwa in Gehirn, Magenschleimhaut oder Haut) und die Oberfläche ist bei vielen technischen Anwendungen wichtig (z.B. Reibung, Verkleben, Sensoren usw.). In den letzten Jahren wurde deshalb sehr viel auf diesem Gebiet geforscht. Wie Sie sich sicher vorstellen können, war es ein grosser Durchbruch, als man die Oberflächenatome mit dem Raster-Tunnelmikroskop endlich “sehen” konnte.

## Proben, die man gut mit dem *easyScan* untersuchen kann

Bevor Sie die Proben mit dem *easyScan* untersuchen werden, wollen wir Sie mit ihrer Struktur vertraut machen und überlegen, was wohl mit dem Tunnelmikroskop abgebildet wird. Dabei beschränken wir uns auf zwei Proben, nämlich Graphit und Gold.

### A) Graphit

Graphit ist – wie auch Diamant– eine der Erscheinungsformen des Kohlenstoffes. Wie Figur 1.9 zeigt, ist er aus ebenen Schichten aufgebaut, in denen regelmässige Sechsecke aus Kohlenstoffatomen in der Art einer Bienenwabe verknüpft sind.



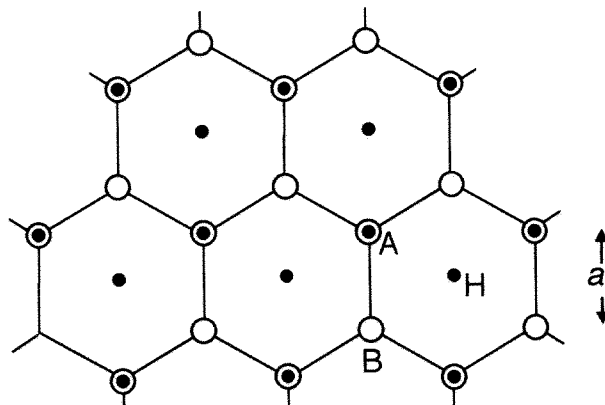
Figur 1.9: Schichtgitter beim Graphit



Die Netzebenen sind nur locker durch eine schwächere Bindung miteinander verknüpft, was zu einem sogenannten Schichtgitter führt. Der kürzeste Abstand zwischen Kohlenstoffatomen aus zwei benachbarten Schichten beträgt  $3.35 \cdot 10^{-10}$  m, während miteinander verbundene Atome innerhalb einer Schicht nur  $1.42 \cdot 10^{-10}$  m weit voneinander entfernt sind. Die Gitterkonstante des Graphits kann zum Beispiel durch Elektronenbeugung bestimmt werden (Kann man Atome sehen? p.37). Die lockere Bindung der Netzebenen untereinander hat einen grossen Vorteil für uns. Sie erlaubt uns nämlich direkt vor einer RTM-Aufnahme eine saubere, sehr ebene Oberfläche herzustellen. Dazu müssen Sie den Kristall nur zwischen zwei Netzebenen spalten! Sie können dafür einen Klebstreifen auf die Oberfläche kleben und zusammen mit den obersten Schichten wieder abziehen.

Schön, werden Sie sagen, dann sehen wir also mit dem Tunnelmikroskop die Kohlenstoffsechsecke in der obersten Netzebene. Leider ist es nicht ganz so einfach. Sie können nämlich nur jedes zweite Kohlenstoffatom abbilden. Aber wo sind die fehlenden Atome? Sehen Sie sich die Graphitoberfläche doch noch einmal genauer an, diesmal in der Draufsicht (Figur 1.10). Sie stellen fest, dass die Netzebenen leicht versetzt übereinander angeordnet sind. Deshalb hat nur die Hälfte aller Atome einen direkten Nachbarn in der zweiten Netzebene. Wir bezeichnen diese Atome mit A. Die andere Hälfte der Atome (B-Atome) hat gerade die Mitte eines Kohlenstoffsechsecks unter sich. Den Punkt im Zentrum des Sechsecks in der obersten Schicht nennen wir H.

Sie sehen also: Es sind nicht alle Atome gleich. Dadurch, dass sie sich in ihren Nachbarn unterscheiden, haben sie auch unterschiedliche Ladungsdichten. Jetzt wird wichtig, was wir weiter oben erwähnt haben: Der Tunnelstrom hängt von der Elektronendichte ab. Die Ladungsdichte ist über den H-Punkten am geringsten und über B-Atomen am grössten. Bei A-Atomen liegt sie aufgrund der Bindung zu den Atomen der zweiten Schicht dazwischen. Daher kann man diese Atome in der RTM-Aufnahme nicht sehen.



Figur 1.10: Graphit in der Draufsicht. Leere Kreise sind Atome der obersten Netzebene, ausgefüllte Punkte Atome der zweiten Netzebene. Der kürzeste Abstand  $a$  zwischen zwei Atomen beträgt  $1.42 \cdot 10^{-10}$  m.

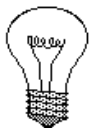
Wie erwähnt können sich Oberflächenatome manchmal anders anordnen als die Atome im Inneren des Festkörpers. Beim Graphit verschiebt sich manchmal die oberste Netzebene um einen halben Atomabstand, also in Figur 1.10 um  $a/2$  nach oben. Das führt dann dazu, dass das RTM-Bild leicht verzogen aussieht mit seitlich abgeplatteten Atomen.

## B) Gold

Die Variationen in der Ladungsdichte sind beim Graphit besonders gross. Daher ist es besonders einfach, Atome abzubilden. Gold hat eine viel gleichmässige Elektronenstruktur. Das hängt damit zusammen, dass die Leitungselektronen in einem Metall frei beweglich sind. Dazu kommt, dass Gold nicht so einfach zu reinigen ist wie Graphit und an Luft immer mindestens eine Atomlage Verunreinigungen auf der Oberfläche hat. Um Goldatome auflösen zu können, macht man deshalb Tunnelmikroskopaufnahmen im Vakuum. Dafür kann man aber am Gold verschiedene mögliche Anordnungen von Atomen an der Oberfläche studieren. Eine ideale glatte Oberfläche wie beim Graphit ist nämlich selten. Beim Gold kommen glatte Oberflächen nur in kleineren Bereichen vor. Diese Terrassen sind von breiten Stufen von manchmal nur einer Atomlage Höhe getrennt. Man findet auch Eckatome an solchen Stufen. Ausserdem treten kleinere “Fehler” an der Oberfläche auf: einzelne oder mehrere zusätzliche Atome auf einer Terrasse, fehlende Atome und kleine Verrückungen. Beachten Sie bitte, dass man die Goldoberfläche nicht mit einem Klebestreifen abziehen darf, da sonst die Goldprobe zerstört wird.

## C) Andere Materialien

Natürlich lassen sich auch andere Materialien mit dem Tunnelmikroskop untersuchen. Die Firma Nanosurf bietet z.B. auch noch eine MoS<sub>2</sub> Probe an, aber auch leere Halter um eigene Proben zu untersuchen. Die wichtigste Einschränkung ist natürlich die Leitfähigkeit der Probe. Um isolierende Materialien untersuchen zu können, muss man diese mit einem elektrischleitenden Material bedampfen. Allerdings wird dadurch die Oberfläche verändert und die genaue Untersuchung der Oberfläche ist ja der Vorteil des Tunnelmikroskops.



### Wir fassen zusammen:

Beim Graphit sieht man nur diejenigen Atome mit dem RTM, die kein Atom in der zweiten Netzebene unter sich haben. Sie können die Goldatome an Luft nicht auflösen. Dafür sind grössere Strukturen sichtbar, vor allem Stufen. Proben, die man mit dem Tunnelmikroskop untersuchen will, müssen elektrisch leitend sein.

## 1.4 Ergänzungen: Verwandte des Raster-Tunnelmikroskops, Vertiefungen

Die vorhergehenden Abschnitte haben Sie darauf vorbereitet, selbst Tunnelaufnahmen zu machen. Wir hoffen, dass wir dabei Ihr Interesse für die bildhafte Darstellung der Welt der Atome wecken konnten. Falls dies so ist und Sie immer noch mehr über diese Thematik wissen möchten, finden Sie hier einige Vorschläge zur Vertiefung.

Dabei möchten wir Sie ganz besonders dazu einladen, das Raster-Kraftmikroskop (Aufgabe 1.7) kennenzulernen. Während das Tunnelmikroskop auf den Tunnelstrom und damit auf

leitende Proben angewiesen ist, kann das Kraftmikroskop auch Isolatoren untersuchen. Bei diesem Mikroskop drückt die feine Spitze direkt auf die Oberfläche. Man hält also nicht den Strom, sondern die Andruckkraft konstant. Die Auslenkungen der Spitze werden von einem Laserstrahl registriert, der auf der Rückseite der Spitze reflektiert wird. Mit der Spitze des Raster-Kraftmikroskops kann man sogar einzelne Moleküle auf der Oberfläche verschieben und so molekulare Landschaften bauen. In den vorgeschlagenen Artikeln werden auch noch andere Folgeentwicklungen des RTM erklärt.



### Aufgabe 1.7: Raster-Kraftmikroskop

Das Raster-Kraftmikroskop ist eine Weiterentwicklung des Raster-Tunnelmikroskops.

a) Lesen Sie die drei Artikel über das Raster-Kraftmikroskop (Atomic Force Microscope, Abstossungskraft-Mikroskop), die für Sie bereitstehen (Wickramasinghe 89 (nur S. 62 bis S.65), Neubert 88, Fricke 90). Beschreiben Sie die Funktionsweise des Raster-Kraftmikroskops auf ein bis zwei Seiten.

b) Nennen Sie je einen Vor- und Nachteil des Raster-Kraftmikroskops gegenüber dem Raster-Tunnelmikroskop.



### Aufgabe 1.8: Nanosurf im Internet

Zusätzliche Informationen über das *easyScan*-RTM und einige Tunnelaufnahmen finden Sie auf der “Website” von Nanosurf ([www.nanosurf.ch](http://www.nanosurf.ch)). Notieren Sie sich stichwortartig, was für Sie neu ist.

Möchten Sie am liebsten ein Tunnelmikroskop selber bauen? Dann finden Sie eine Bauanleitung unter: <http://sxm4.uni-muenster.de/introduction-de.html>

## Lernkontrolle

Haben Sie alles verstanden? Hier können Sie es überprüfen.



### Aufgabe 1.11

Hat das Rasterprinzip mit Quantenmechanik zu tun?



### Aufgabe 1.12

Was hat der Tunneleffekt mit dem Raster-Tunnelmikroskop zu tun? Stellen Sie in etwa fünf Sätzen einen Zusammenhang her.



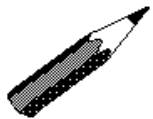
### Aufgabe 1.13

Was bestimmt die Grenzen des Auflösungsvermögens beim Raster-Tunnelmikroskop?



### Aufgabe 1.14

Nennen Sie drei Schwierigkeiten bei der technischen Verwirklichung des Tunnelmikroskops. Wie wurden sie gelöst? Stichworte genügen!



### Aufgabe 1.15

Was ist ein Piezoelement und wozu braucht man es beim Raster-Tunnelmikroskop?



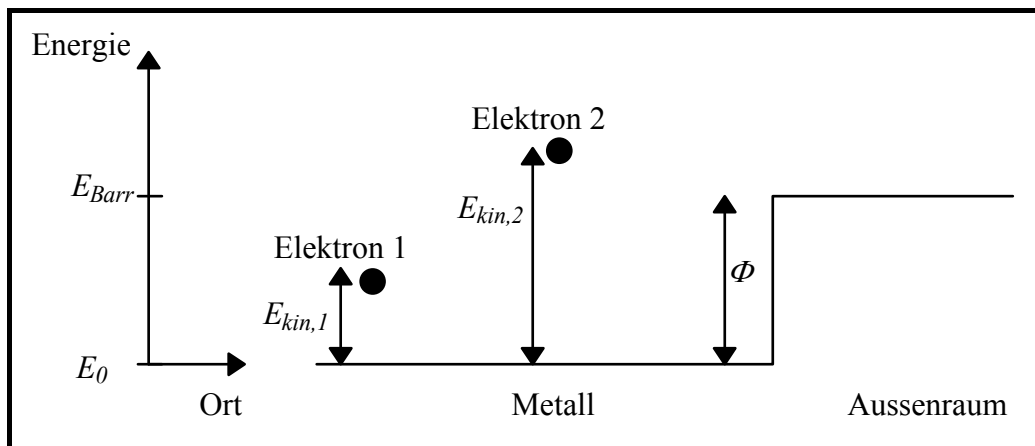
### Aufgabe 1.16

- a) Begründen Sie in drei Sätzen, warum man bei der Tunnelaufnahme einer Graphitoberfläche nur die Hälfte der Atome sieht.
- b) Sieht die Tunnelaufnahme von Gold genauso aus? Begründung!

# Lösungen zu den Aufgaben

## Lösung 1.1

a) Im Diagramm ist die Austrittsarbeit  $\Phi$  eingezeichnet. Sie entspricht der Differenz zwischen  $E_{\text{Barr}}$  und  $E_0$ , also  $\Phi = E_{\text{Barr}} - E_0$ .



b) Das Elektron 1 in einem Metall bei Raumtemperatur besitzt eine kinetische Energie  $E_{\text{kin},1} < \Phi$ , das Elektron 2 in einem glühenden Metall dagegen hat  $E_{\text{kin},2} > \Phi$ . Elektron 1 hat also zu wenig Energie, um die Potentialbarriere zu überwinden, und bleibt deshalb nach den Regeln der klassischen Physik im Metall gefangen. Elektron 2 dagegen kann einen Teil seiner kinetischen Energie in die Austrittsarbeit umwandeln und das Metall verlassen. Nach Verlassen des Metall beträgt seine kinetische Energie nur noch  $E_{\text{kin},2, \text{nachher}} = E_{\text{kin},2, \text{vorher}} - \Phi$ .

## Lösung 1.2

Der Radius eines Atoms ist etwa  $1 \cdot 10^{-10}$  m. Damit ergibt sich für das Verhältnis des Tunnelstroms auf dem Atom ( $I_{\text{T},1}$ ) zum Strom vor dem Atom ( $I_{\text{T},2}$ ):

$$\frac{I_{\text{T},1}}{I_{\text{T},2}} = \frac{c_1 U_T e^{-c_2 \sqrt{\Phi} d_1}}{c_1 U_T e^{-c_2 \sqrt{\Phi} d_2}} = e^{-c_2 \sqrt{\Phi} [(d_2 - d_1)]} \approx e^{\frac{10^{10}}{\sqrt{\text{eV} \cdot \text{m}}} \cdot \sqrt{5 \text{ eV}} \cdot 10^{-10} \text{ m}} \approx e^{2.2} \approx 9$$

Der Tunnelstrom ändert sich also um fast eine Grössenordnung.

## Lösung 1.3

a) Der Tunnelstrom hängt auch von der Häufigkeitsverteilung der Elektronenenergien im Spitzenmaterial ab. Unterschiedliche Spitzen können deshalb unterschiedliche Bilder erzeugen.

b) Das Material der Spitze sollte also eine möglichst konstante Verteilung besitzen, d.h. keine ausgeprägten Strukturen in der Atomhülle besitzen.

c) Bei einer Spannung von  $-2\text{ V}$  zwischen Spitze und Oberfläche tunneln die Elektronen von der Oberfläche zur Spitze. Im wesentlichen sieht man dann die Besetzten Zustände der Oberfläche. Bei einer Spannung von  $+2.2\text{ V}$  tunneln die Elektronen von der Spitze in die Oberfläche. Der Tunnelstrom wird somit hauptsächlich durch die freien Zustände in der Oberfläche bestimmt.

### Lösung 1.4

Rastern bei konstanter Höhe hat den Vorteil, dass man sehr schnell ein Bild bekommt (eine Sekunde oder schneller pro Bild). Um bei konstantem Strom zu rastern, muss die Spitze der Oberfläche nachgeführt werden, was viel länger dauert (typisch: einige Minuten pro Bild).

Man kann allerdings nur bei konstanter Höhe rastern, wenn die Probe sehr eben ist. Daher wird bei den meisten Anwendungen bei konstantem Strom gerastert, so auch beim *easyScan*.

### Lösung 1.5

Beim langsamen Anstieg der Spannung wird die Unterlage langsam beschleunigt. Damit der Zylinder mitbeschleunigt wird, muss die beschleunigende Kraft auf ihn von der Haftreibungskraft aufgebracht werden ( $F_{\text{beschl}} = m_{\text{Zylinder}} \cdot a = F_{\text{Haft}} \leq \mu_{\text{Haft}} \cdot F_{\text{N}}$ ).

Beim schnellen Abfall der Spannung (grosse Beschleunigung, d.h. grosse beschleunigende Kraft) reicht die Haftreibungskraft nicht zur Beschleunigung aus. Sie erreicht nämlich höchstens den Wert von Haftreibungskoeffizient mal Normalkraft. Die Unterlage gleitet unter dem Zylinder durch, wobei die Gleitreibungskraft wirkt. Diese ist allerdings viel kleiner als die Haftreibungskraft und kann den Zylinder nur wenig beschleunigen.

### Lösung 1.6

Die Konversion beträgt  $\frac{\Delta U}{\Delta h} = \frac{120\text{ V}}{1\text{ }\mu\text{m}} = 1.2 \cdot 10^8 \frac{\text{V}}{\text{m}}$ .

a) Eine Atomlage beträgt typischerweise  $1 \cdot 10^{-10}\text{ m}$ .

Nötige Spannung:  $\Delta U = \Delta h \cdot 1.2 \cdot 10^8 \frac{\text{V}}{\text{m}} = 10^{-10} \cdot 1.2 \cdot 10^8 \frac{\text{V}}{\text{m}} = 12\text{ mV}$

Diese Spannung ist noch gut regulierbar. Die verlangte Genauigkeit kann erreicht werden.

b)  $U = 350 \cdot 10^{-9}\text{ m} \cdot 1.2 \cdot 10^8 \frac{\text{V}}{\text{m}} = 42\text{ mV}$

Es wird also vom Zentrum ausgehend eine Spannung von  $\pm 21\text{ mV}$  benötigt.

**Lösung 1.11**

Das Rasterprinzip hat natürlich nichts mit Quantenmechanik zu tun. Es wird zum Beispiel auch beim Fernsehen benützt.

**Lösung 1.12**

Der Leerraum zwischen Mikroskopspitze und Probe wäre klassisch verboten. Nach der Quantenmechanik können Elektronen dieses Gebiet aber durchtunneln. Bei Anlegen einer Spannung fliesst ein Tunnelstrom, der exponentiell vom Abstand zwischen Spitze und Probe abhängt. Sehr kleine Abstandsänderungen (in der Grössenordnung von Teilen des Atomdurchmessers) geben zu grossen Stromänderungen Anlass. Misst man diese Änderungen während man die Oberfläche abrastert, dann kann man Atome bildhaft darstellen. Das ist das Grundprinzip der RTM.

**Lösung 1.13**

Die vertikale Auflösung, also die Genauigkeit mit der man Höhenänderungen feststellen kann, ist nur begrenzt durch elektrische und mechanische Störungen, wie zum Beispiel Rauschen in der Elektronik oder Erschütterungen. Die horizontale Auflösung, also die maximale Breite einer Struktur, die man noch sehen kann, hängt von der Ausdehnung des Spitzeatoms, also von der Breite dieses Atoms ab.

**Lösung 1.14**

kontrollierte Annäherung der Spitze über relativ weite Wege in sehr kleinen Wegstückchen -> Lösung: Reibungsmotor

Abstandsänderungen, die kleiner als der Atomdurchmesser sind -> Lösung: Piezoelemente

Beeinträchtigung der Auflösung durch Schwingungen -> Lösung: Schwingungsdämpfung, z.B. durch Gummimatte und Füsse aus Schaumstoff am Gerät

**Lösung 1.15**

Ein Piezoelement ist ein Kristall, der sich durch Anlegen einer Spannung verformt, weil sich die Ladungen im Kristall gegeneinander verschieben. Die Längenänderung ist ungefähr proportional zur angelegten Spannung. Es sind winzige Längenänderungen (kleiner als der Atomdurchmesser) möglich. Man verwendet die Piezoelemente zur genauen Positionierung der Spitze des Raster-Tunnelmikroskops.

**Lösung 1.16**

a) Die Netzebenen des Graphit sind so gegeneinander verschoben, dass nur die Hälfte der Atome direkte Nachbarn in der nächsten Ebene hat. Diese Atome haben eine geringere Ladungsdichte. Da der Tunnelstrom von der Elektronendichte abhängt, sieht man nur die Atome ohne nächste Nachbarn.

b) Nein, Gold hat eine andere Struktur. An Luft sieht man mit dem RTM grössere Strukturen, vor allem Stufen.