



Ionen eignen sich aufgrund ihrer Eigenschaften hervorragend für die Festkörperphysik: Die Art der Energieabgabe von Ionen in Materie hängt von ihrer Bewegungsenergie ab. Schnelle, energiereiche Ionen werden hauptsächlich durch die Wechselwirkung mit den Elektronen des Materials abgebremst (electronic stopping). Langsame, energiearme Ionen verlieren ihre Energie hauptsächlich durch Stöße mit den Atomkernen des Materials (nuclear stopping).

Schnell, schwer, hoch geladen

Ionen als Werkzeuge für die Festkörperphysik

Von Marika Schleberger

Historisches

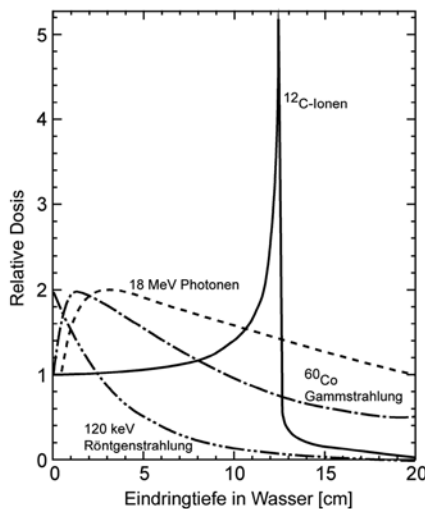
Setzt man einen farblosen Salzkristall einem Strahl schneller Blei-Ionen¹ aus, so verfärbt sich der Kristall gelb. Es sind nicht die Blei-Ionen selbst, die die Färbung hervor-

rufen. Es sind Natrium-Atome, die aus ihren ursprünglichen Kristallgitterplätzen herausgeschossen wurden und danach eine Zwischenposition einnehmen. Eine solche Verfärbung wurde bereits 1873 von Rosenbusch in einem Mineral entdeckt, konnte

aber zu der Zeit nicht richtig gedeutet werden. Erst nach der Entdeckung der Radioaktivität wurde klar, dass es sich bei den Verfärbungen um Strahlenschäden handelt, die durch radioaktive Einschlüsse in dem Mineral hervorgerufen wurden.

Diese so genannten Farbzentren hatten damals keinen weiteren praktischen Nutzen und wurden vorerst nicht weiter untersucht. Erst 40 Jahre später wurden Ionen als Projektile zur Erforschung der Atomkerne interessant. Allerdings ging es dabei hauptsächlich um den Energieverlust, den die Ionen beim Durchgang durch Materie erleiden. Welche Auswirkungen der Energiegewinn auf den Festkörper hat, war zu dieser Zeit nicht von Interesse.

Die mit diesem Energiegewinn erzeugten Defekte wurden erstmals im Rahmen des *Manhattan Project* beim Bau des ersten Atomreaktors wichtig. Eugene Wigner machte als erster darauf aufmerksam, dass das Graphit, das im Reaktor zum Abbremsen der Neutronen benötigt wird, durchaus geschädigt wird. Die Neutronen schlagen Atome aus den Gitterpositionen, die wiederum ihrerseits Atome aus den Gitterplätzen herauschlagen und



(1) Erzielte Dosis (entspricht der Energieabgabe) für verschiedene Strahlungsarten in Abhängigkeit von der Eindringtiefe. Kohlenstoffionen zeigen eine stark ausgeprägte Energieabgabe in einer ganz bestimmten Tiefe.

Quelle: GSI, Darmstadt

so genannte Frenkelpaare erzeugen. Pro Frenkelpaar werden bis zu 25 eV (Elektronenvolt) Energie im Kristallgitter gespeichert². Solche Kristalldefekte erzeugen auch die

bei der Spaltung des Urankerns entstehenden schweren Bruchstücke. Diese Ionen fliegen typischerweise mit einer kinetischen Energie von 80 MeV davon und erzeugen dabei im Graphit etwa drei Millionen solcher Defekte auf einer Länge von etwa acht Tausendstel Millimeter. Die Forschung konzentrierte sich damals darauf, diese parasitäre Speicherung von Energie zu verstehen und möglichst zu vermeiden, da sie leicht zu Materialermüdung führen kann, im schlimmsten Fall sogar zum Reaktorbrand³. Diese Aspekte sind auch heute noch bei der Suche nach strahlenresistenten Endlagern für atomaren Abfall von Interesse.

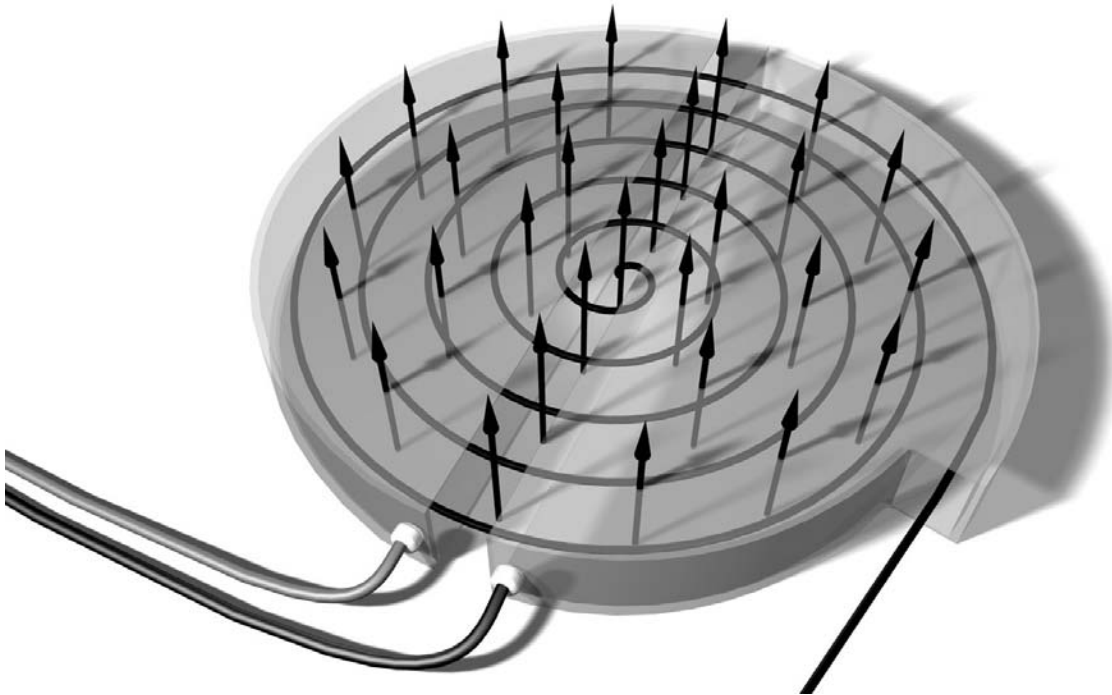
Darüber hinaus konzentriert sich die Forschung heute darauf, die Eigenschaft der lokalen Energieabgabe in fester Materie nutzbar zu machen. Dies geschieht zum Beispiel bei der Krebsbehandlung mit Kohlenstoffionen. Der Vorteil von schweren Ionen gegenüber anderen Teilchen ist, dass sie ihre kinetische Energie in einem räumlich sehr engen Bereich abgeben. Die Ionen durchdringen das Gewebe zunächst fast ohne Abbremsung und deponieren dann innerhalb kurzer Zeit (und damit Strecke) ihre gesamte Energie. Durch geeignete Wahl der Parameter erfolgt die Energieabgabe idealerweise genau im Zielgebiet des Tumors, der dadurch stark erhitzt und zerstört wird. Der ungewöhnliche Verlauf der Energieabgabe (Abb. 1) macht diese Methode sehr erfolgreich – beispielsweise bei Gehirntumoren, wo es besonders darauf ankommt, das umliegende Gewebe möglichst wenig zu schädigen. Aber auch weitaus exotischere Effekte wie zum Beispiel die Belastung elektronischer Bauteile an Bord von Satelliten, die im Weltall schnellen Ionen ausgesetzt sind, sind für die aktuelle Forschung von Interesse.

Ionen finden zudem als Werkzeug für die Modifikation von festen Körpern vielfältige Anwendung. Diese Art der Energieabgabe ist zum Beispiel für die Halbleiterforschung

günstig, da auf diese Weise Fremdatome in einer genau definierten Tiefe deponiert und so die Eigenschaften des Bauteils modifiziert werden können. Eine andere Möglichkeit besteht darin, Ionen als „Bohrer“ zu nutzen. Beschießt man etwa dünne Kunststoff-Folien mit schnellen, schweren Ionen, so schmelzen sich die Projektile quasi durch den Kunststoff. Das Polymernetzwerk ist danach entlang der Flugbahn chemisch derart verändert, dass es mit einer Säure leicht weggeätzt werden kann. Nach dem Beschuss wird also durch das Ätzen der Folie der Kunststoff entlang der Ionenbahnen abgetragen, während sie ansonsten unbeschädigt bleibt. Auf diese Weise lassen sich extrem kleine⁴ Löcher in die Folie ätzen. Solche Folien können dann als Nano-Filter, zum Beispiel für die Dialyse eingesetzt werden. Wir interessieren uns für Modifikationen, die direkt an der Oberfläche möglich sind. Hier ist es sinnvoll zu unterscheiden zwischen makroskopischen Effekten (beispielsweise das Härten von Stahlkufen beim Bob) und mikroskopischen Effekten, wo wiederum unser Forschungsschwerpunkt liegt.

Quellen für schnelle Ionen

Heute ist keine Atomspaltung mehr notwendig, um schnelle Ionen zu erzeugen. An so genannten Beschleunigern werden den Experimentatoren Teilchenstrahlen fast beliebiger Energie und Art zur Verfügung gestellt. Dazu wird zunächst in einem Ofen das jeweilige Material – beispielsweise Blei – verdampft. Dann werden den Atomen über ein hochfrequentes elektrisches Wechselfeld nach und nach Elektronen entzogen – sie werden ionisiert. Ionen lassen sich aufgrund ihrer elektrischen Ladung leicht mittels elektrischer und magnetischer Felder ablenken, beschleunigen und abbremsen. Der Ionenstrahl wird in ein Zyklotron (Abb. 2) eingeschleust, wo er durch elektrische Wechselfelder beschleunigt



(2) Prinzip eines Zyklotrons (Teilchenbeschleuniger). Die Ionen werden durch ein elektrisches Wechselfeld beschleunigt und durch ein Magnetfeld (Pfeile) auf eine Kreisbahn gezwungen. Sie werden bei jedem Umlauf schneller und können so auf die gewünschte Geschwindigkeit gebracht werden.

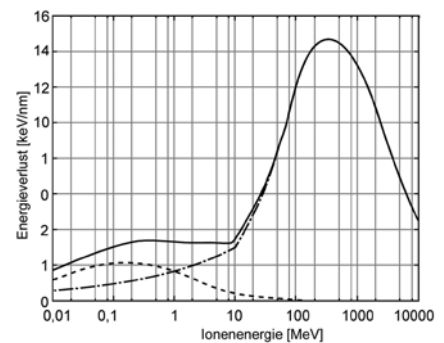
nigt wird. Die Ionen durchlaufen dabei eine Kreisbahn und werden bei jedem Umlauf schneller. Ist die gewünschte Geschwindigkeit und damit Energie erreicht, verlassen die Ionen das Zyklotron und werden durch ein Rohrsystem, das mit entsprechenden Magneten zur Ablenkung des Ionenstrahls ausgestattet ist, zum eigentlichen Experiment geleitet. Je nach Energie der Ionen kommt es sowohl beim Umlauf im Zyklotron als auch bei der Leitung durch das Rohrsystem zu starker elektromagnetischer Strahlung, die gesundheitsgefährdend sein kann. In diesem Fall müssen die Experimentatoren ihre Experimente fernsteuern. Solche Teilchenbeschleuniger sind zu groß, zu teuer und zu komplex um von einer einzelnen Arbeitsgruppe betrieben werden zu können. Es sind Großgeräte, die von staatlichen Einrichtungen unterhalten und betrieben werden. In Deutschland ist dies zum Beispiel die Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt, in Frankreich zum Beispiel das *Centre national de la recherche scientifique* (CNRS)

und das *Commissariat Energie à l'Atomique* (CEA), die den GANIL (*Grand accélérateur d'ions lourds*) in Caen betreibt. Die hier vorgestellten Experimente wurden dort in Kooperation mit einer französischen Arbeitsgruppe gemacht.

Experiment

Wenn Ionen in einen Festkörper eindringen, hängen die Details ihrer Wechselwirkung mit der Materie von ihrer Energie, ihrem Ladungszustand und von den Materialeigenschaften des Festkörpers ab. Wie effektiv die Ionen ihre Energie an den Festkörper abgeben, hängt dagegen fast nur von ihrer kinetischen Energie ab. Den Zusammenhang zeigt die Abbildung (3). Sind die Teilchen langsam, finden in erster Linie Zusammenstöße mit den Kernen des Festkörpers statt, man spricht von *nuclear stopping*, und der Energieverlust pro Wegstrecke ist gering. In diesem Energiebereich werden auch Atome aus der Oberfläche herausgeschlagen (siehe auch den Beitrag von Andreas Wucher in diesem Heft). Sind die

Ionen dagegen schnell, treten sie in erster Linie mit den Elektronen des Festkörpers in Wechselwirkung. Die starke elektrostatische Anziehung zwischen den vergleichsweise leichten, negativen Elektronen und den stark positiven Atomkernen des Projektils führt dazu, dass Elektronen von ihren Kristallatomen in Richtung der Bahn des Projektils



(3) Die Art der Energieabgabe von Ionen in Materie hängt von ihrer Bewegungsenergie ab. Schnelle, energiereiche Ionen werden hauptsächlich durch die Wechselwirkung mit den Elektronen des Materials abgebremst (*electronic stopping*, strichpunktierte Kurve). Langsame, energiearme Ionen verlieren ihre Energie hauptsächlich durch Stöße mit den Atomkernen des Materials (*nuclear stopping*, gestrichelte Kurve).



(4) Prinzip eines Rasterkraftmikroskops. Die Oberfläche wird mit einer Nadel zeilenweise abgetastet. Die Bewegung der Nadel wird mit Hilfe eines reflektierten Lichtstrahls aufgezeichnet und liefert ein direktes Abbild der Oberfläche.

mitgerissen werden. Das Projektil gibt jetzt pro Wegstrecke wesentlich mehr (logarithmische Energieskala in Abb. 3) Energie ab. Diesen Bereich bezeichnet man mit *electronic stopping*. Die Wechselwirkung ist maximal, wenn das Projektil gerade die Geschwindigkeit der Elektronen des Festkörpers erreicht. Dies führt dann auch dazu, dass die Energieabgabe sehr schneller Teilchen beim Durchgang durch Materie wie bereits oben erwähnt am größten ist, kurz bevor sie quasi stecken bleiben. Diese Zusammenhänge wurden von Bethe und Bloch aufbauend auf Arbeiten von Bohr bereits zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts erkannt und beschrieben.^{5,6,7}

Die Details der Wechselwirkung sind trotz intensiver Forschung immer noch nicht verstanden. Das obige Szenario beschreibt lediglich, dass das Ion auf seinem Weg durch den Festkörper seine Energie abgibt, dabei langsamer wird und dann

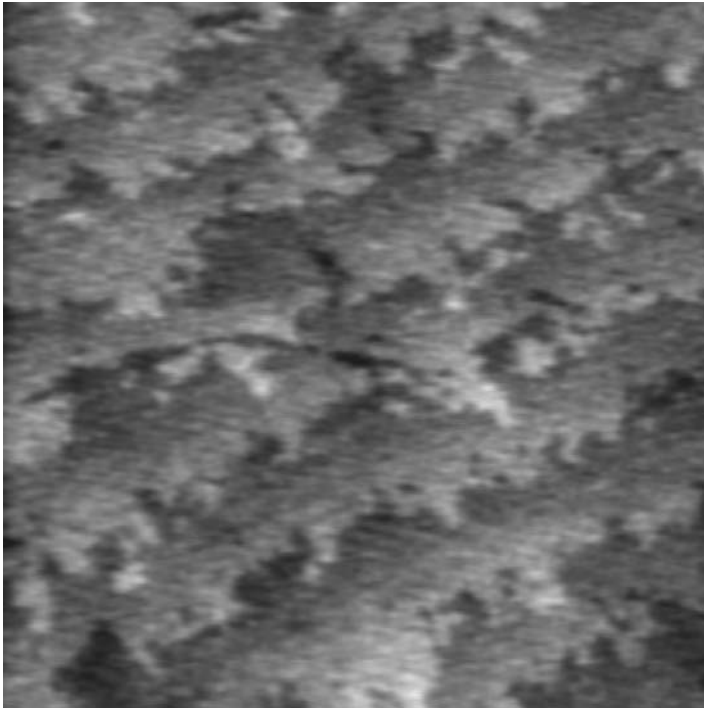
irgendwann zum Stillstand kommt. Was aber passiert mit dem Festkörper, wenn das Ion hindurchschießt? Wie reagieren die Elektronen? Wie das Kristallgitter? Wie beeinflussen sich Gitter und Elektronen gegenseitig? In welchen Zeiträumen laufen diese Prozesse ab? Sind sie umkehrbar? Eine Möglichkeit, diese Fragen zu studieren, bietet die Betrachtung der Oberfläche. Eventuelle Modifikationen sind dort leichter nachzuweisen, trotzdem sind sowohl die elektronische als auch die geometrische Struktur dem Festkörper ähnlich, so dass entsprechende Rückschlüsse möglich sind.

Da wir uns für die Modifikation der Oberfläche interessieren, ist allerdings zusätzlicher Aufwand notwendig. Zum einen muss die Oberfläche vor der Bestrahlung möglichst ideal und bekannt sein, zum anderen sollte sie vor anderen äußeren Einwirkungen geschützt sein. Letzteres ist möglich, indem

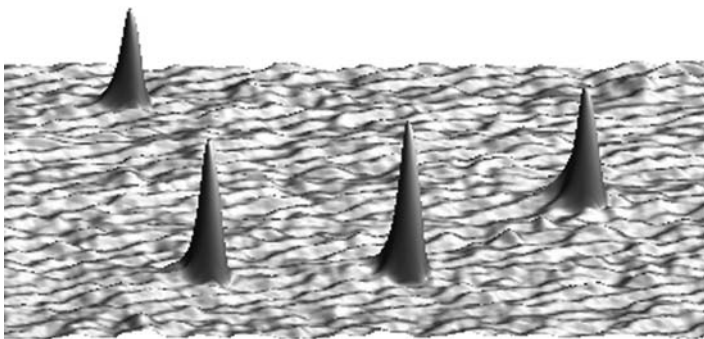
man das gesamte Experiment unter Ultra-Hoch-Vakuum-Bedingungen durchführt, das heißt bei einem Druck von einigen 10^{-10} mbar. Veränderungen der Probe zum Beispiel durch Oxidation sind dadurch weitgehend ausgeschlossen⁸. Als Proben verwenden wir meistens ideal geordnete Kristalloberflächen. Diese lassen sich gut charakterisieren und bieten den Vorteil, wohl definiert zu sein. In Frage kommen isolierende Materialien oder Halbleiter wie etwa Silizium, Graphit, Saphir, Strontiumtitanat, Titandioxid und Salze. Je nach Materialeigenschaften braucht man Ionen unterschiedlicher Energie, um sichtbare Schädigungen zu erzeugen. Für Silizium müssen die Teilchen so hochenergetisch sein, dass ein Arbeiten direkt an der Anlage wegen der Strahlenbelastung nicht mehr möglich ist. Strontiumtitanat (SrTiO_3) ist ein Material, das als Sauerstoffsensoren in der Abgaskatalyse und als Unterlage für das Wachstum von Supraleitern benutzt wird. Titandioxid (TiO_2) findet in vielen modernen Nanomaterialien Verwendung. Beide Materialien sind leicht zu präparieren, ihre Struktur ist gut bekannt und Teilchen mit mittlerer Energie reichen bereits aus, um Schädigungen hervorzurufen, so dass direkt am Strahlrohr gearbeitet werden kann.

Nachweis-Methoden

Um die Schädigungen nachzuweisen und zu charakterisieren, verwenden wir eine bildgebende Methode der Oberflächenphysik – die Rasterkraftmikroskopie. Das Prinzip ist simpel: Man verwendet eine feine Nadel, um – ähnlich wie bei einem Plattenspieler – die Erhebungen und Vertiefungen auf einer Oberfläche abzutasten. Die Problematik liegt darin, dass die Nadel sehr fein sein und sehr genau geführt werden muss, um die winzigen Unterschiede ertasten zu können. Die Größenverhältnisse sind etwa so, als ob man mit dem Matterhorn einen Tennisball ertasten wollte.



(5) Rasterkraftmikroskop-Aufnahme einer sauberen SrTiO₃-Oberfläche vor der Bestrahlung (1 x 1 µm²). Man sieht einige Terrassen, die durch unregelmäßig geformte Stufenkanten voneinander getrennt sind.



(6) Rasterkraftmikroskop-Aufnahme (400 x 290 nm²) einer bestrahlten TiO₂-Oberfläche. Die Ionen wurden senkrecht zur Oberfläche eingestrahlt. Man sieht deutlich die nadelartigen Erhebungen, die jedes einzelne Ion hinterlässt. Die Hügel sind etwa 3 nm hoch.

Die Nadel wird üblicherweise aus Silizium hergestellt und mit Hilfe von Piezokristallen über die Oberfläche geführt. Piezokristalle verformen sich unter dem Einfluss einer elektrischen Spannung minimal, und ermöglichen so eine exakte Positionierung. Die Detektion der Nadelbewegung erfolgt über einen reflektierten Lichtstrahl (Abb. 4). Diese Methode ist eine Weiterentwicklung der so genannten Rastertunnelmikroskopie und wurde 1986

von Binnig, Quate und Gerber⁹ vorgestellt. Inzwischen wurde sie so verfeinert, dass sogar einzelne Atome abgebildet werden können und eine echte Berührung der Oberfläche dazu nicht mehr nötig ist.

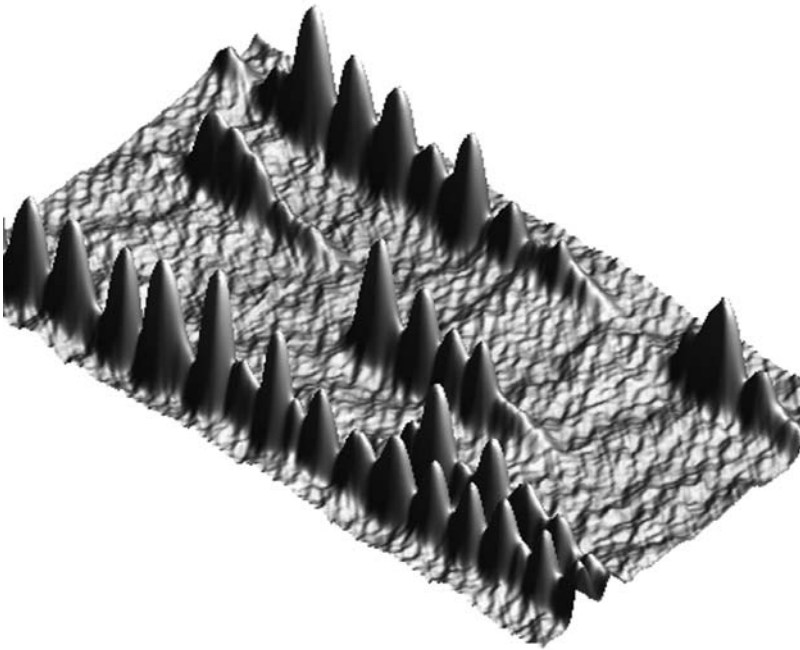
Diese Methode liefert Bilder von Oberflächen, wie in Abbildung (5) zu sehen ist. Gezeigt ist eine saubere unbestrahlte Oberfläche eines SrTiO₃-Kristalls, wobei die abgetastete Fläche nur 1000 mal 1000 nm² (Nanometer²) groß ist. Diese

Fläche hätte auf einem durchgeschnittenen Haar 30.000-mal Platz. Deutlich sind die ausgefranstes Terrassenstufen zu sehen. Eine Stufe hat jeweils eine Höhe von 0,4 nm; die Terrassen selbst sind sehr glatt. Nach der Bestrahlung findet man typischerweise auf der Oberfläche statistisch verteilte Erhebungen (Abb. 6). In unseren Bildern sehen sie wie Pfeilspitzen aus (die Höhe wurde entsprechend skaliert). Sie sind in der Regel nur ein bis fünf nm hoch und messen nicht mehr als 15 nm im Durchmesser. An jeder Stelle der Probe, an der sich eine Erhebung befindet, ist ein Ion eingeschlagen. Die Zahl der Ionen wurde so gewählt, dass die Treffer gut zu zählen sind, sich aber nicht überlappen. Vergleicht man die Ionenzahl mit der Anzahl der Erhebungen, so stellt man fest, dass jedes Ion einen solchen Hügel erzeugt hat.

Energieverlust

Entgegen der intuitiven Erwartung, erzeugen die Ionen also keine Einschlagskrater, sondern Hügel. Wie kommt es dazu? Wie bereits erwähnt, ist die Wechselwirkung bei diesen Geschwindigkeiten im Wesentlichen durch *electronic stopping* dominiert. Betrachten wir diesen Prozess etwas näher.

Das Projektil bringt eine sehr hohe Bewegungsenergie mit (der anfängliche Ladungszustand des Ions spielt in diesem Fall nur eine untergeordnete Rolle). Wenn das Projektil in den Festkörper eindringt, ist es so schnell, dass es seinen eigenen Elektronen vorausseilt und diese auch durchaus verliert. Aus der Sicht der Festkörperatome rast ein starkes elektrisches Feld mit ungefähr 1000 Kilometer pro Sekunde (!) durch das Gitter. Das Feld reißt die Elektronen der Gitteratome mit sich und damit kommt es zu einer massiven Störung des Festkörpers entlang der Bahn des Projektils. Nach dem Modell der *Coulomb explosion* stellt man sich vor, dass nur die positiv geladenen



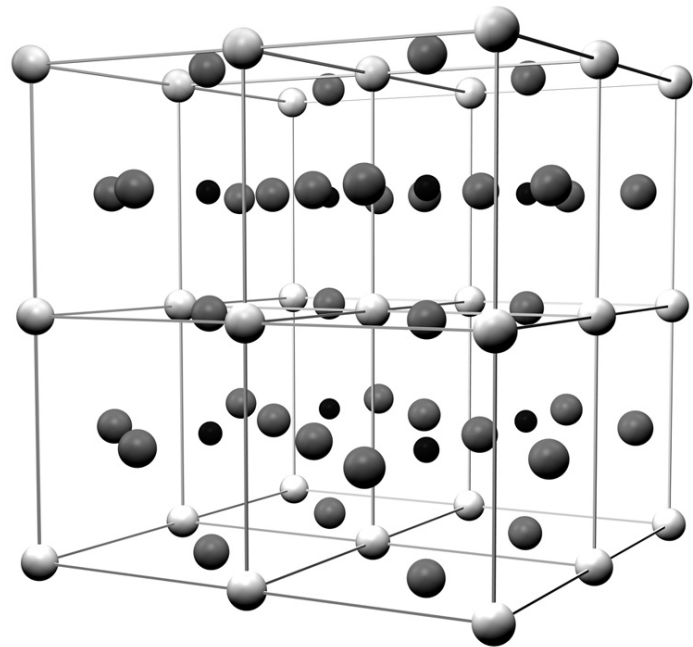
(7) Rasterkraftmikroskop-Aufnahme ($500 \times 270 \text{ nm}^2$) einer bestrahlten SrTiO_3 -Oberfläche. Die Ionen wurden flach (etwa 1°) zur Oberfläche eingestrahlt. Man sieht deutlich die Ketten von nadelartigen Erhebungen, die jedes einzelne Ion hinterlässt.

Atomrümpfe zurückbleiben, die dann durch die starke elektrische Abstoßung (Coulombwechselwirkung) zwischen gleichnamig geladenen Teilchen explosionsartig auseinander fliegen. Dieses Modell erscheint zwar sehr anschaulich, es liefert aber keine quantitative Beschreibung und damit auch keine Möglichkeit, Vorhersagen zu treffen. Im Modell des *thermal spike* führt die Anregung der Kristallelektronen durch das Projektil zu einem sehr heftigen, extrem schnellen und stark lokalisierten Temperaturanstieg, der wiederum zu einem Aufschmelzen des Kristallgitters führt. Nachdem der Energiepuls das Gitter erreicht hat, folgt die Energiediffusion den makroskopischen Gesetzen des Wärmetransports. Die Temperaturverteilung im *thermal spike* hängt von Materialparametern wie der Wärmeleitfähigkeit, der Wärmekapazität und der Dichte ab. Dies ist also kein atomistisches Modell, aber immerhin lassen sich begrenzte Aussagen zum Beispiel über die räumliche Ausdehnung der Schädigung treffen¹⁰.

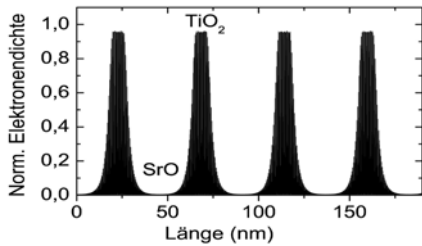
Thermal spike

Welche messbaren Auswirkungen der *thermal spike* auf den Festkörper hat, hängt ganz wesentlich davon ab, ob es sich bei dem

Material um ein Metall oder einen Isolator handelt. In einem Metall ist die Einkopplung der Energie aus dem Elektronensystem in das Gitter nicht sehr effizient. Die Anregung der Elektronen wird räumlich verteilt, bevor es überhaupt zu einem nennenswerten lokalen Transfer von Energie in das Gittersystem kommen kann. Die Gittertemperatur wird lokal im Wesentlichen nur durch die (seltenen) direkten Kernstöße erhöht. In Metallen finden sich daher keine bleibenden Schäden – das elektronische System relaxiert wieder in den ursprünglichen Zustand – und die Energie wird dabei großräumig in das Gitter übertragen. Im Gegensatz zu einem Metall ist in einem Isolator wie SrTiO_3 die Kopplung der Elektronen an mögliche Anregungen des Gittersystems groß. Die maximale Temperatur, die durch das angeregte Elektronensystem erreicht werden kann, ist nach einem einfachen Modell in einem Isolator etwa 50-mal höher als die Temperatur, die durch direkte Stöße erreicht werden könnte. Das heißt der ausgeprägte *spike* ist sehr stark lokalisiert und es



(8) Kristallmodell von SrTiO_3 . Die Atome sind in Schichten angeordnet. In den Schichten finden sich abwechselnd Sauerstoff- (dunkle große Kugeln) und Titanatome (kleine schwarze Kugeln), sowie Strontium- (helle große Kugeln) und Sauerstoffatome.



(9) Berechnete Elektronendichteverteilung entlang einer Ionenbahn in einem SrTiO₃-Kristall. Die Elektronen sind nur in den TiO₂-Ebenen zu finden.

Quelle: E. Akçöltekin, Th. Peters, R. Meyer, A. Duvvenbeck, M. Klusmann, I. Monnet, H. Lebius and M. Schleberger, Nature Nanotechnology, 2/2007, 290

werden extrem viele Gitterdefekte (teilweise bis zur völligen Zerstörung) im Bereich der Anregung erzeugt. Da auch der Abkühlprozess sehr schnell abläuft, frieren diese Defekte ein. Zurück bleibt ein defekt-reicher Bereich, der im Innen¹¹ sogar völlig ungeordnet ist.

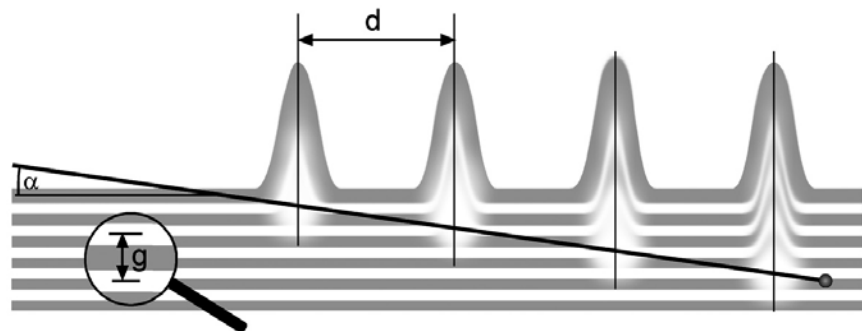
Was wir also in den Bildern sehen, ist das statische Abbild eines hochdynamischen Prozesses. Die Hügel sind die Überreste der Anregung, die das Ion auf seinem Weg in den Festkörper hinein hinterlassen hat – quasi eingefrorene thermal spikes. Dabei ist zu vermuten, dass das geschmolzene Material aus dem Kanal, den das Ion bei seinem Weg durch den Festkörper schmilzt, ähnlich wie bei einem Vulkanausbruch nach oben schießt und dort erstarrt. Die Spur setzt sich natürlich im Festkörper fort – an der Oberfläche sehen wir nur ihren Anfang. Da sich Ionen sehr gut steuern lassen ist hier bereits im Prinzip die Möglichkeit gegeben, Materialien gezielt zu verändern. Machen wir uns dazu klar, dass die Spur abgesehen von der defektreichen Zone, die den Kern umgibt, in ungestörtes kristallines Material eingebettet ist. Da sich mit der Gitterstruktur auch die physikalischen Eigenschaften ändern, hat man hier eine Möglichkeit, Materialmodifikation auf Nanometerskala zu betreiben. So wurden zum Beispiel auf ZnFe₂O₄ bereits magnetische Nanostrukturen mit schnellen Ionen geschrieben¹².

Soweit wir ihn bisher beschrieben haben, ist der Energieverlustprozess rein statistischer Natur und zudem ein kollektives Phänomen. Ob und wann ein Energieverlust-Ereignis stattfindet, lässt sich nicht vorher sagen. Genaugenommen macht es gar keinen Sinn, in diesem Zusammenhang von einem Ereignis zu sprechen. In Abbildung (7) ist eine Probe gezeigt, die nicht senkrecht, sondern unter einem flachen Winkel zur Probenoberfläche bestrahlt wurde. Wie kann es sein, dass wir jetzt eine Kette von etwa gleichartigen Ereignissen in regelmäßigen Abständen sehen? Betrachten wir dazu die Kristallstruktur von SrTiO₃ etwas genauer. Das Material besteht aus Strontium-, Titan- und Sauerstoffatomen, die auf einem periodischen Gitter in der so genannten Perowskitstruktur angeordnet sind. Aus einer bestimmten Richtung betrachtet, sieht man, dass der Kristall aus Lagen aufgebaut ist, die abwechselnd aus TiO₂- und SrO-Ebenen bestehen (Abb. 8). Wenn Atome sich im Festkörperverband anordnen, verlieren die Elektronen teilweise ihre Bindung an ihren Kern. Im Falle von SrTiO₃ findet man, dass die Elektronen sich hauptsächlich in den TiO₂-Ebenen aufhalten und nur wenige in den SrO-Ebenen (Abb. 9). Fliegt jetzt das Projektil durch eine solche Schichtstruktur, wird es immer dann zu einem nennenswerten Energie-

verlust kommen, wenn die Elektronendichte hoch ist. Jedes Mal, wenn also das Ion durch eine TiO₂-Ebene fliegt, kommt es zu einem *thermal spike*, der sich an der Oberfläche als Hügel manifestiert. Das heißt auch, je flacher der Winkel ist, unter dem das Projektil auf den Festkörper trifft, desto größer sollte der Abstand der Hügel sein (Abb. 10)¹³. Ob dies tatsächlich die Erklärung für die beobachteten Perlenketten ist, ist Gegenstand aktueller Untersuchungen.

Hochgeladene Ionen

Oberflächenmodifikationen sind aber nicht nur mit schnellen hochenergetischen Ionen möglich, sondern auch mit hochgeladenen oder langsamen Ionen. Letzteres ist als „Zerstäuben“ bekannt (siehe auch den Beitrag von Andreas Wucher) und soll hier nicht weiter diskutiert werden. Die Wirkung langsamer (weniger als 50 keV) hochgeladener Ionen ist im Wesentlichen durch die Frühphase der Wechselwirkung dominiert. Das Projektil bringt eine hohe potenzielle Energie mit, weil ihm Elektronen fehlen. Der Festkörper stellt ein nahezu unendliches Reservoir an Elektronen, so dass es zu einer sehr starken Wechselwirkung des Projektils mit dem elektronischen System des Festkörpers kommt, sobald das Projektil in die Nähe der Oberfläche gelangt. Ist

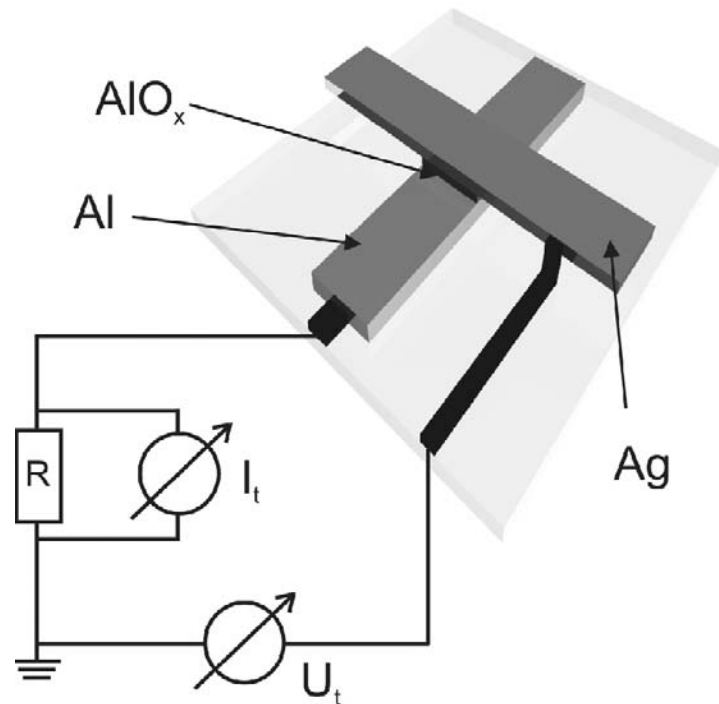


(10) Immer, wenn das Ion durch eine Lage mit hoher Elektronendichte fliegt, ist der Energieverlust hoch und ein *thermal spike* bringt das Material zum Aufschmelzen – an der Oberfläche bildet sich ein Hügel aus. Da die Lagen mit hoher Elektronendichte einen festen Abstand g zueinander haben, finden sich die Hügel in einem bestimmten Abstand d , der mit dem Einstrichwinkel α zusammenhängt.

der Festkörper ein Isolator, gibt es keine freien Elektronen und die Störung durch das Projektil kann erhebliche Auswirkungen auf das Gitter haben, ganz ähnlich wie oben beschrieben. Obwohl wir uns also energetisch im Bereich des *nuclear stopping* bewegen, kann es zu einer starken elektronischen Anregung kommen. Diese ist um so stärker, je höher der Ladungszustand des Projektils ist, je mehr Elektronen also dem Ion fehlen. Zur Hestellung solcher Ionen benötigt man in der Regel spezielle Ionenquellen, die sehr teuer und etwa hausgroß sind. Darüber hinaus ist zu ihrem Betrieb meist flüssiges Helium notwendig, weil das herkömmliche Bauprinzip supraleitende Spulen erfordert.

Eine neuartige Ionenquelle macht es jetzt erstmals möglich, Experimente mit hochgeladenen Ionen in einem normalen Labor durchzuführen. Die „Dresden EBIT“¹⁴ ist nur ungefähr einen halben Meter groß und kommt mit normalen Permanentmagneten aus¹⁵. Seit etwa einem Jahr ist diese Quelle in unserer Arbeitsgruppe in Betrieb. Erste Ergebnisse der Experimente mit dieser Quelle liegen bereits vor. Hier wurde eine Isolator-Oberfläche mit Argon-Ionen der Ladungszustände 16^+ bis 18^+ bestrahlt. Auch in diesem Fall zeigen sich keine Krater, sondern die typischen Erhebungen, wie wir sie nach der Bestrahlung mit schnellen schweren Ionen gefunden haben. Inwieweit die Bildung von Hügeln vom Ladungszustand der Projektile abhängt, ist noch ungeklärt. Hier werden zukünftige Experimente Licht ins Dunkel bringen.

Die neue Ionenquelle gibt uns aber auch die Möglichkeit, die Wechselwirkung der hochgeladenen Ionen mit Festkörpern genauer zu studieren. Mit dem Rasterkraftmikroskop sehen wir immer nur die morphologische Schädigung, erhalten aber keine direkten Informationen über die Details der elektronischen Anregung. Bei einer



(11) Prinzipschema eines Metall-Isolator-Metall-Detektors. Die hochgeladenen Ionen erzeugen in der ersten Metallschicht angeregte Elektronen, die die isolierende Barriere überwinden können. In der zweiten Metallschicht werden die Elektronen als Strom nachgewiesen.

Metalloberfläche sind wir wegen der fehlenden morphologischen Änderungen sogar völlig „blind“. Jede elektronische Anregung wird letztlich in Wärme umgewandelt (Dissipation). Im Rahmen des SFB-Projektes A6 wollen wir versuchen, die Elementarprozesse zu charakterisieren, die bei diesen Dissipationsprozesse eine Rolle spielen. Um diese Prozesse im Inneren eines Metallfilms studieren zu können, sollen Metall-Isolator-Metall-Kontakte eingesetzt werden (siehe auch die Beiträge von Andreas Wucher sowie von Hermann Nienhaus und Detlef Dising). Diese sind wie folgt aufgebaut: Auf eine Grundelektrode aus Silber wird eine isolierende Oxidschicht aufgebracht und darüber ein dünner Metallfilm aufgedampft (Abb. 11). Ein hochgeladenes Ion trifft auf die obere Metallschicht und erzeugt dort angeregte, so genannte heiße Elektronen. Diese haben genügend Energie, um durch

die dünne Oxidbarriere hindurch als Strom in der Grundelektrode nachgewiesen werden zu können. Die Idee ist, diese heißen Elektronen beispielsweise als Funktion des Ladungszustandes nachzuweisen und auf diese Weise Informationen über den Anregungsprozess zu gewinnen.

Zusätzlich können wir die Kombination von kinetischen Effekten und elektronischer Anregung studieren, da wir beide Anteile separat voneinander einstellen können. Dazu wird beispielsweise die kinetische Energie des Ions, also seine Geschwindigkeit, konstant gehalten, während der Ladungszustand variiert wird. Dadurch bleibt die Kollisionsdynamik (*nuclear stopping*) zwar grundsätzlich erhalten, aber gleichzeitig und am selben Ort erfolgt durch die hohe Ladung des Projektils eine zusätzliche starke elektronische Anregung. Hier sind spannende nicht-lineare Effekte zu

erwarten, die wir untersuchen und verstehen wollen.

Summary

Ions are a very versatile tool in solid-state physics. Depending on their energy and their charge state, different interactions with solid matter can be studied. In the case of swift heavy ions, the ion/solid interaction is governed by so-called *electronic stopping*. The energy loss of the projectile is mainly due to electronic excitations that arise in the wake of the ion travelling through the solid. The response of the solid depends on its electronic structure. In the case of a metal, the excitation dissipates before the lattice can be heated. Since the electronic system quickly relaxes into its original state, usually no evidence of the passing ion is found. In the case of an insulator, the coupling of electronic excitations to acoustic and optic modes of the lattice is very strong. As a consequence, the electronic excitation is transferred rather efficiently to the lattice and melting occurs. This very intense, rapid and localized excitation is called a thermal spike. The spike usually leaves the lattice heavily disturbed. The static legacy of this highly dynamic process can be imaged through scanning force microscopy. Each ion produces a nanometer-sized hillock on the surface. In this way, nanoscale modifications of technologically interesting materials become feasible. If the surface is tilted with respect to the beam, chains of hillocks appear. Because the crystal is anisotropic with respect to the electron density, the ion can lose energy only when it passes a layer with a high enough electron density. Another important aspect is the charge state of the ion. Even with slow, highly charged ions; i.e. in the regime of *nuclear stopping*, an electronic excitation due to the many

missing electrons can be injected into the solid. Future experiments will shed light on the corresponding energy dissipation processes.

Anmerkungen/Literatur:

- 1) Ion altgriechisch: sich fortbewegend. Man bezeichnet damit elektrisch geladene Atome oder Moleküle. Aufgrund der Ladung reagieren Ionen auf elektrische und magnetische Felder.
- 2) H.B. Huntington, Frederick Seitz: Mechanism for Self-Diffusion in Metallic Copper. In: Phys. Rev. 61 (1942), 315.
- 3) So geschehen 1957 in England im Reaktor Windscale No. 2.
- 4) Der Durchmesser beträgt hier etwa $1 \mu\text{m} = 0,0001 \text{ mm}$. Ein rotes Blutkörperchen misst etwa $7 \mu\text{m}$.
- 5) Nils Bohr: In: Phil. Mag. 25 (1913), 10.
- 6) Hans Bethe: Zur Theorie des Durchgangs schneller Korpuskularstrahlen durch Materie. Ann. d. Phys. 397 (1930), 325.
- 7) Felix Bloch: Zur Bremsung rasch bewegter Teilchen beim Durchgang durch Materie. Ann. d. Phys. 408 (1933), 285.
- 8.) Der normale Atmosphärendruck beträgt etwa 1 bar. Das bedeutet, dass bei 1 bar etwa 10.000.000.000.000 mal so viele Teilchen pro Zeiteinheit auf die Oberfläche treffen würden wie unter UHV-Bedingungen.
- 9) Gerd Binnig, Calvin F. Quate, Christoph Gerber: Atomic Force Microscope. In: Phys. Rev. Lett. 56 (1986), 930.
- 10) M. Toulemonde, Christian Dufour, E. Paumier: Transient thermal process after a high-energy heavy-ion irradiation of amorphous metals and semiconductors. In: Phys. Rev. B 46 (1992), 14362.
- 11.) Der Durchmesser des amorphen Bereichs hängt vom Material ab. Typisch sind etwa 10 Nanometer. Die defektreiche Zone kann bis zu 100 Nanometer groß sein.
- 12) Alois Weidinger: Ion tracks – a new route to nanotechnology. In: Europhysics News, 35 (2004) No. 5.
- 13) Ender Akçöltekin, Thorsten Peters, Ralf Meyer, Andreas Duvenbeck, Miriam Klusmann, Isabelle Monnet, Henning Lebius, Marika Schleberger: Creation of multiple nanodots by single ions. In Nature Nanotechnol. 2 (2007), 290
- 14) EBIT steht für Electron Beam Ion Trap. Die Ionen werden in einer elektromagnetischen Falle so lange festgehalten, bis sie durch einen Elektronenstrahl ausreichend ionisiert worden sind.
- 15) Vladimir P. Ovsyannikov, Günter Zschornak: First investigations of a warm electron beam ion trap for the production of highly charged ions. In Rev. Sci. Instr. 70 (1999), 2646.

Die Autorin

Marika Schleberger, 1965 in Viersen geboren, studierte Physik in Osnabrück. Dort absolvierte sie 1990 ihre Diplomprüfung und pro-

movierte 1993. 1991 war Schleberger Research Associate an der Rice University in Texas und erhielt den Preis des Stiferverbandes für die Deutsche Wissenschaft im Rahmen des Programms für Studienzeitverkürzung. Nach ihrer Promotion war sie Postdoktoranden-Stipendiatin der DFG und von 1994 bis 1996 hielt sie sich als Postdoc an der dänischen Universität Odense auf. Ein Forschungsaufenthalt am Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, USA und eine Zeit als Postdoc an der ETH Zürich schlossen sich an. Nach einem Habilitationsstipendium der DFG und einem Postdoktoranden-Stipendium der Max-Planck-Gesellschaft am MPI für Mikrostrukturforschung in Halle 1997 sowie dem Erhalt des Dorothea-Erleben-Stipendiums des Landes Niedersachsen im Jahre 1998 habilitierte sich Marika Schleberger 2000 im Fach Experimentalphysik an der Universität Osnabrück. Im Jahr 2001 folgten das Heisenberg-Stipendium der DFG und der Habilitationspreis der Universität Osnabrück. Seit 2002 ist Schleberger Universitätsprofessorin für Experimentalphysik an der Universität Duisburg-Essen und Mitglied im SFB 616. Ihre Forschungsschwerpunkte sind die Rasterkraftmikroskopie und die Wechselwirkung energetischer Ionen mit Festkörperoberflächen. 2007 war Marika Schleberger Collaborateur des CEA, GANIL in Caen.