

*Trifft ein Atom oder Ion auf eine Festkörperoberfläche, so löst es unter den Oberflächenatomen eine Kaskade schneller, zumeist elastischer Stöße aus, die denjenigen der Billardkugeln beim Billardspiel sehr ähnlich sind. Diesen als „Festkörperzerstäubung“ oder auch „Sputtering“ bezeichneten Prozess kann man technologisch ausnutzen. Heute werden viele der wahrgenommenen Eigenschaften von Werkstücken im Wesentlichen durch Oberflächen mit sehr dünnen Beschichtungen bestimmt, die durch Sputtering hergestellt und auch charakterisiert werden können. Zum Beispiel werden Werkzeuge wie Bohrer, Fräser etc. mit superharten, diamantartigen Schichten gegen Verschleiß geschützt.*

# Billard mit Atomen

## Kinetisch induzierte Energietransferprozesse an Oberflächen

Von Andreas Wucher

**M**aterie besteht aus Atomen, welche im Festkörper regelmäßig angeordnet sind. Viele der heute wichtigen Eigenschaften von Festkörpern werden durch die Beschaffenheit ihrer Oberfläche bestimmt. Dies betrifft sowohl mechanische, elektrische als auch optische Eigenschaften, die ganz wesentlich durch die Oberfläche festgelegt sind. Aus diesem Grund werden heute praktisch alle Bauteile mit zum Teil hochkomplizierten funktionalen dünnen Schichten überzogen.

Eine wichtige Methode zur kontrollierten Modifikation von Festkörperoberflächen ist die Abscheidung dünner Schichten auf der eigentlichen Substratoberfläche. In vielen Fällen werden hierbei mehrere Lagen unterschiedlicher Materialien aufeinander gestapelt. In der Mikroelektronik werden solche Schichtsysteme dann lateral

strukturiert, um eine möglichst große Zahl einzelner Bauelemente (wie zum Beispiel Transistoren) auf einer möglichst kleinen Fläche zu konzentrieren. Werden Oberflächeneigenschaften durch solche technologischen Meisterwerke dann nicht wie gewünscht verändert, wird es notwendig, die resultierenden Schichtsysteme zu analysieren, um eventuelle Fehler beim Herstellungsprozess identifizieren und beseitigen zu können. Eine solche Analyse ist nicht trivial, da sie – im Gegensatz zu nasschemischen Analyseverfahren – mit hoher Ortsauflösung im Nanometerbereich betrieben werden muss.

Zentrale Fragestellungen der modernen Oberflächen- und Dünnschichttechnologie sind daher

- Wie erzeugt man dünne Schichten an der Oberfläche?
- Wie werden kleine Strukturen hergestellt?

- Wie bekommt man heraus, welche Atome beziehungsweise Moleküle wo sitzen?

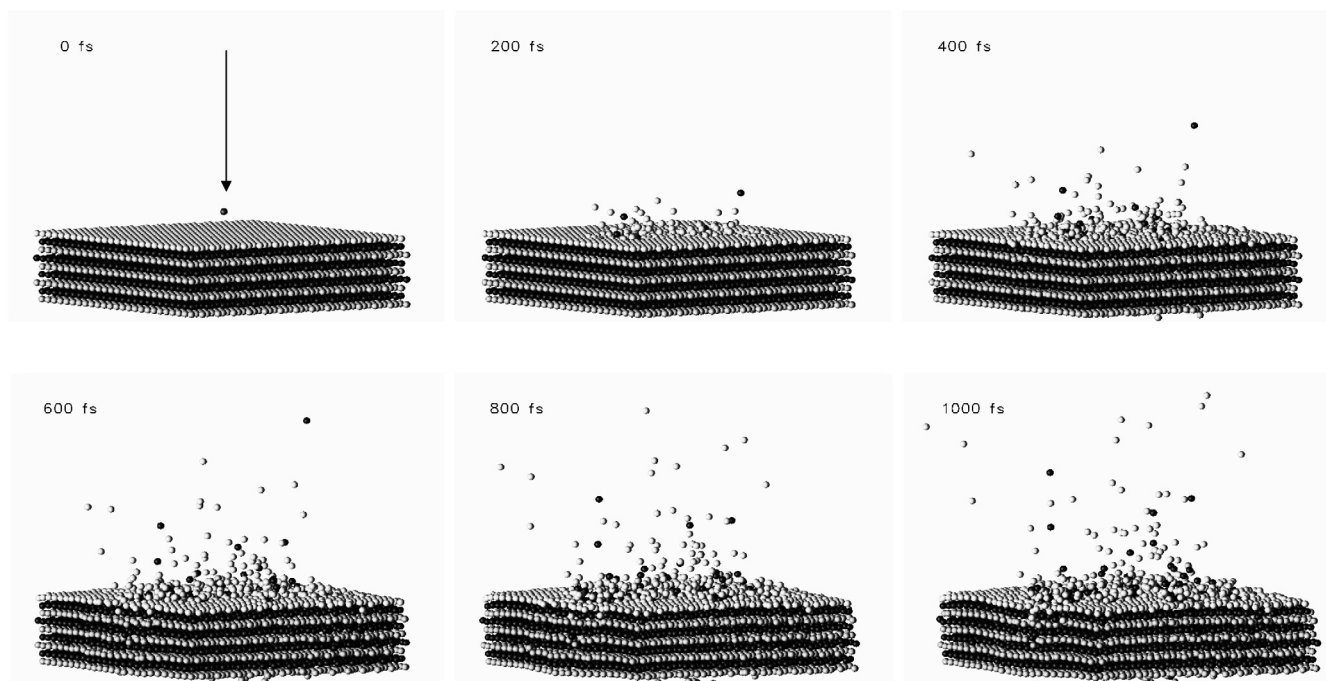
Antworten auf diese Fragen bekommt man, wenn man die Oberfläche mit Ionenstrahlen beschießt und dadurch an der Oberfläche so etwas wie ein atomares Billardspiel auslöst. Dies soll in den folgenden Abschnitten kurz dargestellt werden.

### Ionenstrahlen

Zum Verständnis des Wortes „Ion“ muss man sich den strukturellen Aufbau eines Atoms als dem elementaren Baustein der Materie vor Augen führen. Atome bestehen aus einem schweren, elektrisch positiv geladenen Kern, der von einer Hülle aus leichten, negativ geladenen Elektronen umgeben ist. Normalerweise befinden sich in der Hülle gleich viele Elektronen wie positive Ladungen im Kern, so dass



Andreas Wucher. Foto: Timo Bobert

5 keV Ag  $\longrightarrow$  Ag(111)

(1) Computersimulation einer durch Ionenbeschuss einer Festkörperoberfläche ausgelösten atomaren Stoßkaskade.

das ganze Gebilde elektrisch neutral ist. Man kann jedoch einzelne Elektronen gezielt aus der Hülle entfernen. Dann gleicht die verbleibende negative Ladung der Hülle die positive Ladung des Kerns nicht mehr vollständig aus, und das Atom wird elektrisch geladen. Ein solches Teilchen bezeichnet man als ein Ion. Aufgrund ihrer elektrischen Ladung können Ionen in elektrischen Feldern beschleunigt werden. So kann man die Teilchen zum einen schnell machen, zum anderen kann man den entstehenden Ionenstrahl mit Hilfe elektrostatischer Linsen fokussieren. Als Ergebnis lassen sich heute Ionenstrahlen mit Energien von einigen 100 Elektronenvolt (eV) bis zu einigen Giga-eV erzeugen, welche bis auf Strahldurchmesser von wenigen Nanometern fokussierbar sind. In diesem Beitrag soll im Wesentlichen auf den Bereich relativ niedriger Energie (bis zu einigen 10 Kilo-eV) eingegangen werden (zum Thema „hohe Energien“ in diesem Kontext siehe den Beitrag von Marika Schlegelberger in diesem Heft).

### Ionen-Oberflächen-Wechselwirkung

Trifft ein schnelles Teilchen (Atom oder Ion) auf eine Festkörperoberfläche, so löst es unter den Oberflächenatomen eine Kaskade schneller, zumeist elastischer Stöße aus, die denjenigen der Billardkugeln beim Billardspiel sehr ähnlich sind. Ein großer Teil der in den Festkörper eingetragenen kinetischen Energie wird in dieser atomaren Stoßkaskade dissipiert, bei der – genau wie beim „Break“ im Billard – am Ende auch Atome von der Oberfläche weggeschlagen werden können<sup>1</sup>. Dieser als „Festkörperzerstäubung“ oder auch „Sputtering“ bezeichnete Prozess ist in Abbildung (1) anhand einer so genannten molekulardynamischen Computersimulation verdeutlicht, bei der die gekoppelten Bewegungsgleichungen aller beteiligten Atome gleichzeitig numerisch gelöst werden. Dargestellt sind hier „Schnappschüsse“, die zu verschiedenen Zeiten nach dem Einschlag des Projektilteilchens aufgenommen

wurden. Man erkennt deutlich die sich entwickelnde Stoßkaskade und die von der Oberfläche emittierten Teilchen.

Den Zerstäubungseffekt kann man technologisch ausnutzen. Zum einen können die solcherart von der Oberfläche losgelösten Teilchen auf einer anderen Substratoberfläche wieder aufgefangen werden. Auf diese Weise können zum Beispiel auf einer Glasscheibe dünne Schichten eines anderen Materials abgeschieden werden, um damit die optischen Eigenschaften der Scheibe (Reflektion beziehungsweise Transmission von Licht oder Wärmestrahlung) gezielt zu beeinflussen. Tatsächlich werden heute viele der wahrgenommenen Eigenschaften von Werkstücken im Wesentlichen durch solche Beschichtungen bestimmt. So werden zum Beispiel Werkzeuge wie Bohrer, Fräser etc. mit superharten, diamantartigen Schichten gegen Verschleiß geschützt sowie elektronische Eigenschaften von Halbleitern praktisch ausschließlich durch dünne, hochstrukturierte Schichtsys-

steme an ihrer Oberfläche bestimmt. Abbildung (2) zeigt als Beispiel eine elektronenmikroskopische Aufnahme des Querschnitts der Oberflächenstruktur eines RAM Chips, wie er in allen Computern eingebaut ist. Die Oberfläche befindet sich in diesem Bild ganz oben. Man erkennt deutlich zwei tiefe Löcher, welche die beiden Kondensatoren zweier benachbarter Speicherzellen (Bits) darstellen. Die Strukturen rechts und links daneben sind die zugehörigen Transistoren, die das Schalten der beiden Bits erlauben. Jede einzelne erkennbare Linie beziehungsweise Fläche in diesem Bild stellt eine dünne Schicht dar, deren Zusammensetzung, Dicke, Homogenität etc. von entscheidender Bedeutung für das Funktionieren des gesamten Schaltkreises ist.

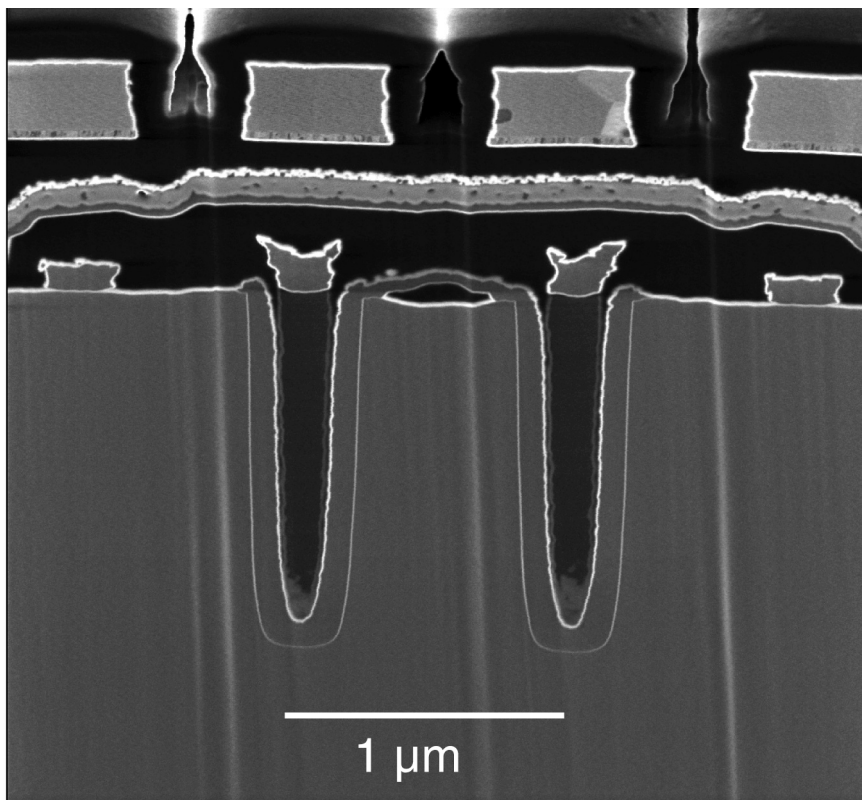
Es ist klar, dass die Herstellung solch komplizierter dreidimensionaler Strukturen extrem aufwändig und nur durch eine komplexe Folge von Einzelschritten zu realisieren ist. Neben der eigentlichen Abschei-

dung von Schichten ist dabei deren laterale Strukturierung entscheidend wichtig. Auch hierbei spielt die Ionen-Oberflächen-Wechselwirkung eine große Rolle. Beschießt man den Festkörper nämlich kontinuierlich mit Ionen, so wird die Oberfläche durch den Zerstäubungsprozess allmählich abgetragen. Man gräbt also gewissermaßen ein Loch, dessen Form durch die Bewegung („Rastierung“) eines fein fokussierten Ionenstrahls sehr genau vorgegeben werden kann. Pro auftreffendem Ion werden im statistischen Mittel je nach Material und Beschussenergie etwa ein bis hundert Oberflächenatome abgetragen (diese Zahl bezeichnet man als „Zerstäubungsausbeute“). Anhand der auf eine Stelle der Oberfläche aufgetragenen Ionendosis kann man daher die Tiefe des an dieser Stelle gegrabenen Loches festlegen. Auf diese Weise können mit Hilfe der so genannten „Focused Ion Beam“ (FIB) Technik<sup>2</sup> sehr scharfe Strukturen in die Oberfläche geschrieben werden.

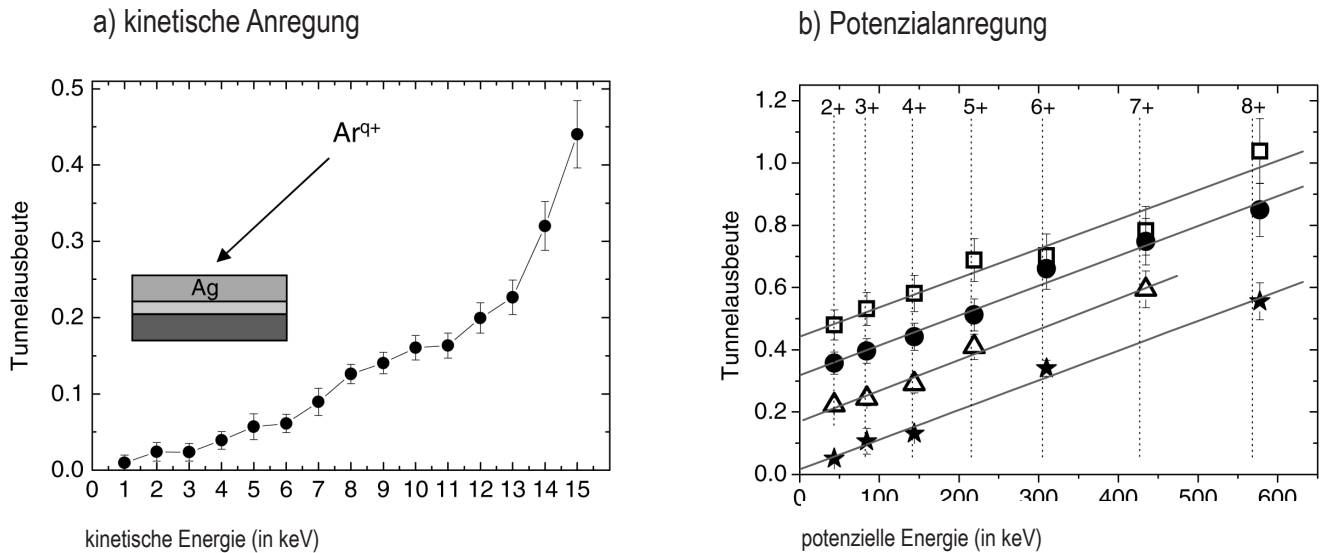
Soll also zum Beispiel zur Herstellung eines Feldeffekttransistors eine quadratische Gate-Elektrode aus Metall mit lateralen Abmessungen von zehn mal zehn Quadratnanometern und einer Dicke von einem Nanometer auf der Oberfläche erzeugt werden, so scheidet man zum Beispiel zunächst eine homogene Metallschicht der gewünschten Dicke ab und entfernt danach das Metall außerhalb dieser Fläche wieder. Alternativ kann bereits zur Abscheidung ein Verfahren eingesetzt werden, bei dem aus einer metallorganischen Gasphase nur dort Material aufwächst, wo gleichzeitig mit Ionen beschossen wird. Man benutzt die FIB-Technik unter anderem auch dazu, gezielt Material aus der Oberfläche herauszuschneiden, um mikroskopisch kleine Bauteile wie zum Beispiel Zahnräder herzustellen.

**Grundlagenforschung: Heiße Elektronen durch Ionenbeschuss**

Eine interessante Fragestellung bei der Wechselwirkung schneller Ionen mit Oberflächen ist, inwieweit die in den Festkörper durch das Projektil eingetragene Energie in elektronische Freiheitsgrade dissipiert wird. Dass dies geschieht, weiß man zum Beispiel aus der Tatsache, dass durch den Ionenbeschuss Elektronen aus der Oberfläche ausgelöst werden. Erhöht man die Beschussenergie über etwa ein Mega-eV hinaus, so werden solche Anregungsprozesse sogar zum dominierenden Energieverlustkanal des Projektils (vgl. auch den Beitrag von Marika Schleberger in diesem Heft). Des Weiteren wird ein Teil der von der Oberfläche zerstäubten Atome in elektronisch angeregten Zuständen oder sogar in ionisierter Form emittiert. Das theoretische Verständnis dieser durch den Projektilinschlag induzierten Anregungs- und Ionisationsprozesse ist zurzeit noch sehr unvollständig. Experimentell untersuchen wir dieses Phänomen zum Beispiel



(2) Elektronenmikroskopische Aufnahme des Querschnitts durch einen RAM-Speicherchip. Die Oberfläche befindet sich ganz oben.



(3) Abhängigkeit der ioneninduzierten elektronischen Anregung einer Festkörperoberfläche von a) der kinetischen Energie und b) der potenziellen Energie der Projektilionen. Dargestellt ist die an einem MIM-System gemessene Tunnelausbeute, das heißt die mittlere Zahl der pro auftreffendem Beschussion durch die Isolatorschicht hindurch nachgewiesenen heißen Elektronen.

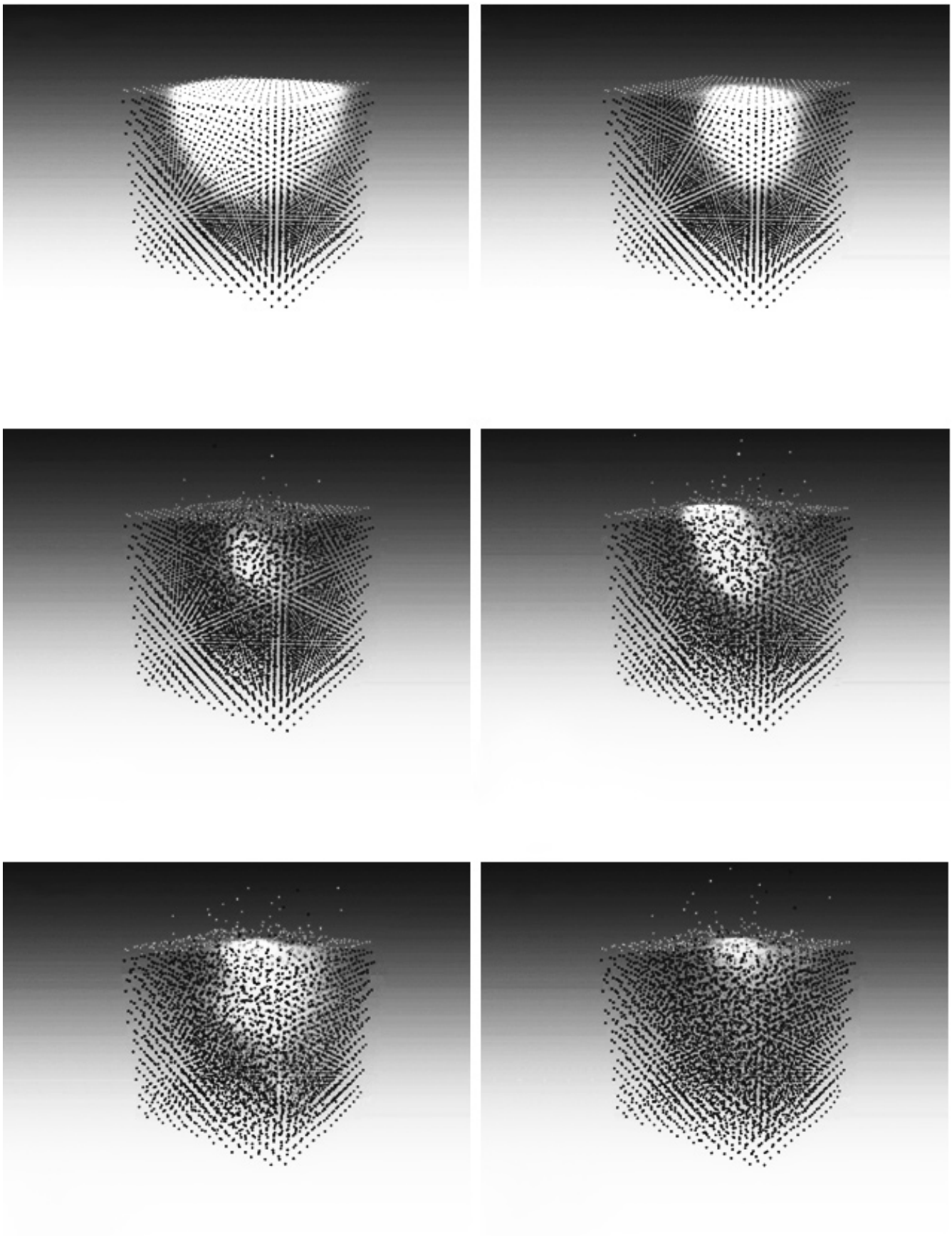
durch zustandsaufgelösten Nachweis gesputterter Teilchen mit Hilfe laserspektrometrischer Methoden. Darüber hinaus bestimmen wir die Ionisierungswahrscheinlichkeit der von der Oberfläche zerstäubten Teilchen durch gleichzeitigen Nachweis gesputterter neutraler und geladener Atome. Die elektronische Anregung des Festkörpers wird mit Hilfe so genannter Metall-Isolator-Metall Schichtsysteme (vgl. auch die Beiträge von Detlef Diesing/Hermann Nienhaus und Marika Schleberger in diesem Heft) untersucht. Hierbei wird die oberste Metallschicht eines solchen MIM-Systems mit Ionen beschossen. Die dadurch in der Schicht erzeugten heißen Elektronen werden dann als Tunnelstrom durch die (sehr dünne) Isolatorschicht in die darunterliegende zweite Metallelektrode detektiert. Abbildung (3a) zeigt die solcherart gemessene Ausbeute heißer Elektronen als Funktion der kinetischen Auftreffenergie der Projektilteilchen<sup>3</sup>. Man erkennt, dass das Signal für kleine Beschussenergien praktisch verschwindet, die nachgewiesene elektronische Anregung daher ausschließlich durch die kinetische Energie der Projektilen erzeugt werden kann. Dies kann man

ändern, indem man den Ladungszustand der Projektilionen durch Wegnahme weiterer Elektronen erhöht. Dann bringen nämlich die Projektilen neben ihrer kinetischen Energie auch einen erheblichen Anteil potenzieller (Ionisierungs-)Energie mit, der ebenfalls zur Elektronenemission beiträgt. Dies zeigt Abbildung (3b), die die gemessene Tunnelausbeute als Funktion dieser potenziellen Energie (beziehungsweise des Ladungszustands) für eine feste kinetische Energie der Projektilen darstellt<sup>4</sup>. Zur theoretischen Beschreibung solcher ioneninduzierten Anregungsvorgänge benutzen wir Computersimulationen, die auf der in Abbildung (1) dargestellten Teilchendynamik basieren. Aus der Kenntnis, was sich wann wie schnell und in welche Richtung im Festkörper bewegt, lassen sich dann mit Hilfe einfacher Anregungsmodelle Informationen über die durch diese Dynamik erzeugte elektronische Anregung gewinnen. Als Ergebnis präsentiert Abbildung (4) eine Reihe einzelner Schnappschüsse der räumlichen und zeitlichen Entwicklung der Elektronentemperatur als Maß für die elektronische Anregung nach einem Projektileneinschlag. Diese Informa-

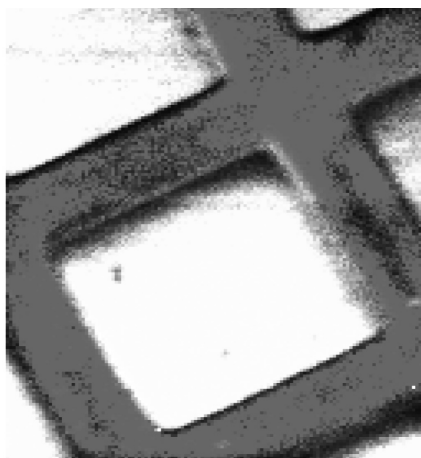
tion kann dann verwendet werden, um Anregungs- und Ionisierungswahrscheinlichkeiten der zerstäubten Teilchen zu berechnen.

#### Anwendung: Was, wieviel und wo an der Oberfläche?

Eine wichtige Anwendung der Teilchen-Oberflächen-Wechselwirkung ist die Oberflächenanalytik. Geht bei einem der Herstellungsschritte einer komplexen Schichtstruktur etwas schief, und hat daher das erzeugte System nicht die notwendigen Eigenschaften hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung, Dicke, Homogenität der einzelnen Schichten, Abmessungen der Strukturen etc., dann funktioniert das Bauteil am Ende nicht. Es ist daher extrem wichtig, solche Eigenschaften am fertiggestellten Schichtsystem nachprüfen zu können. Hierzu bedarf es physikalischer Analysemethoden, da Informationen über zum Beispiel die chemische Zusammensetzung einer Schicht mit extrem hoher räumlicher Auflösung gewonnen werden müssen. Hier zeigt sich eine weitere Stärke des Zerstäubungsprozesses. Beschießt man nämlich die



(4) Zeitliche und räumliche Verteilung der elektronischen Anregung in einem Festkörper (Metall) nach dem Einschlag eines Projektilions. Die Graukodierung ist so gewählt, dass es dort, wo die Elektronen besonders heiß sind, hell erscheint.

15  $\mu\text{m}$ 

(5) Chemische Abbildung eines Kupfergitters auf einer Indium-Unterlage.

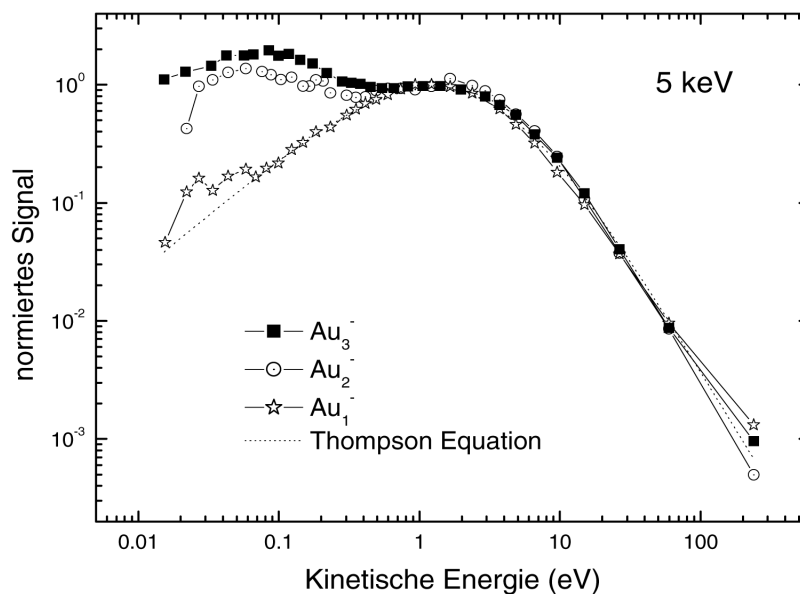
Oberfläche eines solchen Bauteils mit Ionen, dann werden zunächst einmal Teilchen freigesetzt, welche praktisch ausschließlich aus der obersten Atomlage des Festkörpers stammen. Abbildung (1) verdeutlicht dies anhand der Farbgebung der einzelnen Atome. Von den oberhalb der Oberfläche sichtbaren Atomen waren die hell erscheinenden Teilchen ursprünglich in der allerersten, die dunkel erscheinenden dagegen in der zweiten Atomlage der Festkörper angesiedelt. In den einzelnen Schnapsschüssen erkennt man deutlich, dass die emittierten Teilchen zum größten Teil direkt von der Oberfläche stammen. Führt man den von der Oberfläche emittierten Teilchenfluss jetzt einer massenspektrometrischen Analyse zu, so kann man aus dem gemessenen Spektrum erkennen, aus was für Atomen die Oberfläche besteht. Man erzielt hier also eine chemische Analyse mit sehr hoher Oberflächenempfindlichkeit, die man mit anderen, zum Beispiel nasschemischen Analyseverfahren nicht erreichen könnte<sup>5</sup>. Fokussiert man jetzt den primären Ionenstrahl und bewegt ihn über die Probenoberfläche, so analysiert man – genau wie beim Rasterelektronenmikroskop – stets den gerade getroffenen Bereich und erhält dadurch eine chemische Abbildung der Oberflä-

che. Mit Hilfe moderner Flüssigmetallionenquellen lässt sich so eine Ortsauflösung bis herab zu wenigen Nanometern erreichen. Als Beispiel zeigt Abbildung (5) die Abbildung eines Kupfergitters auf einer Indiumoberfläche. Man erkennt deutlich die unterschiedliche laterale Verteilung der dunkel beziehungsweise hell dargestellten Signale gesputterter Kupfer- beziehungsweise Indiumatome.

Kombiniert man die Oberflächenanalytik mit der Ioneninduzierten Erosion der Oberfläche, so kann man auch Informationen über die unter der eigentlichen Oberfläche vergrabene Schichtstruktur gewinnen. Man gräbt dabei durch Sputtering praktisch ein Loch, dessen Kraterboden dann mit Hilfe eines oberflächenanalytischen Verfahrens (zum Beispiel derselben massenspektrometrischen Analyse wie vorher) untersucht werden kann. Auf diese Weise lassen sich dreidimensional aufgelöste Informationen über die chemische Zusammensetzung in der Nähe der Oberfläche eines Festkörpers erhalten, wobei man die räumliche Auflösung entlang der Tiefenachse bis herab zu etwa einem Nanometer treiben kann.

### Neueste Entwicklungen: Clusterionenstrahlen

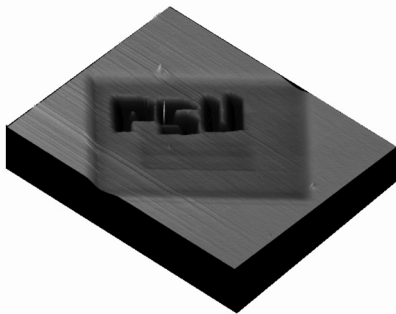
Ein großer Vorteil der massenspektrometrischen Oberflächenanalytik ist es, dass die chemische Information nicht auf die Bestimmung der relativen Anteile einzelner chemischer Elemente beschränkt bleibt. Hat nämlich die zu untersuchende Oberfläche eine molekulare Struktur, so bildet sich dies auch im Massenspektrum der zerstäubten Teilchen ab. Durch den stoßdominierten Prozess der Freisetzung der Teilchen kommt es dabei oft zur Fragmentierung, so dass anstelle der intakten, ursprünglich an der Oberfläche vorhandenen Moleküle ein Spektrum der beim Emissionsprozess entstehenden Fragmente gemessen wird. Häufig sind diese „Fingerprintspektren“ jedoch sehr charakteristisch für die an der Oberfläche vorhandene molekulare Struktur, so dass hier wertvolle, über die reine Elementanalyse weit hinaus gehende chemische Informationen gewonnen werden können. Dies ist seit langem bekannt und hat sich als eine bewährte Methode zur Untersuchung molekularer Oberflächen etabliert. Allerdings war es bis



(6) Verteilung der Emissionsenergie zerstäubter Indiumatome beim Beschuss einer Indiumoberfläche mit Au<sub>1</sub>-, Au<sub>2</sub>- und Au<sub>3</sub>- Ionen einer Energie von 5 keV.

vor kurzem eine anerkannte Weisheit, dass eine solche Analyse nur „statisch“, das heißt mit so geringer Beschussionendosis durchgeführt werden kann, dass die Oberfläche während der Analyse praktisch nicht abgetragen wird. Beschießt man die Probe länger, so werden die an der Oberfläche vorhandenen molekularen Strukturen dauerhaft zerschlagen. Dies äußert sich darin, dass die im Massenspektrum sichtbaren Molekülsignale mit wachsender Beschussdosis sehr schnell abklingen. Eine Konsequenz dieser Tatsache ist es, dass die beschriebene Tiefenprofilanalytik durch den beschussinduzierten Abtrag der Oberfläche für molekulare Proben nicht funktioniert.

Vor einigen Jahren hat sich jedoch herausgestellt, dass sich dies grundlegend ändert, wenn anstelle der – vorher ausschließlich verwendeten – atomaren Ionen (wie zum Beispiel  $\text{Ar}^+$  oder  $\text{Ga}^+$ ) solche Projektilteilchen verwendet werden, welche aus mehreren Atomen bestehen<sup>6</sup>. Mit Strahlen solcher „Clusterionen“ lassen sich erheblich größere Zerstäubungsausbeuten erreichen. So werden zum Beispiel beim Auftreffen eines  $\text{Au}_3^+$ -Clusterions etwa zehn mal mehr Atome zerstäubt als beim Auftreffen eines  $\text{Au}^+$ -Ions mit derselben kinetischen Energie. Die Dissipation der in die Oberfläche eingetragenen Energie funktioniert daher für ein Clusterprojektil offen-



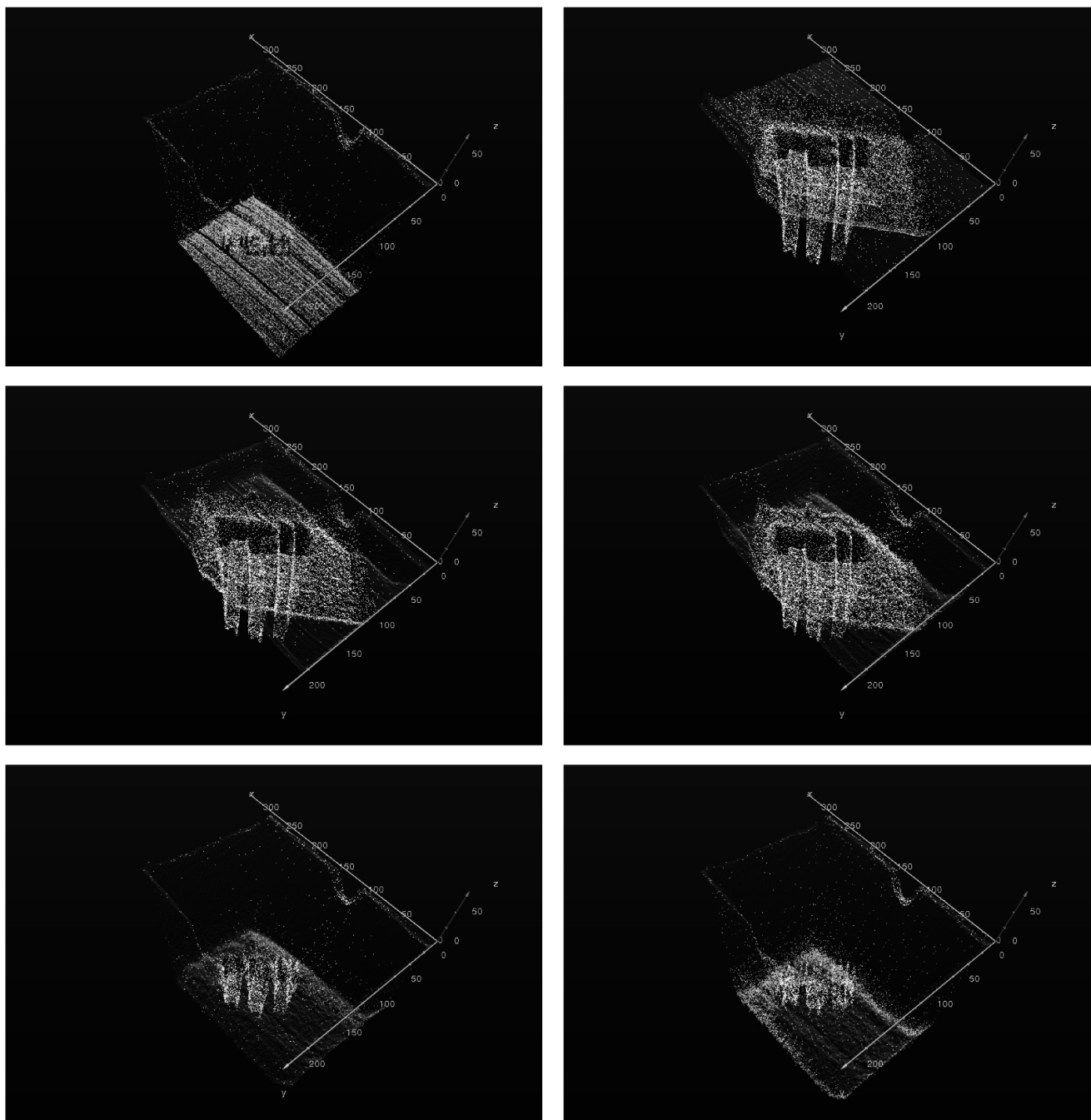
(7) Rasterkraftmikroskopische Abbildung der Oberflächentopographie einer mittels FIB-Technik strukturierten organischen Schicht auf Silizium.

bar anders als für atomare Ionen. Dies äußert sich zum Beispiel in einer deutlich anderen Energieverteilung der von der Oberfläche wegfliegenden zerstäubten Teilchen. Ein Beispiel für gesputterte Indiumatome zeigt Abbildung (6). Man erkennt unter Clusterionenbeschuss deutlich einen dominierenden Anteil niederenergetischer, das heißt langsamer gesputterter Teilchen, welcher beim Beschuss mit atomaren Projektilen nicht vorhanden ist. Dieser Unterschied hat weitreichende Konsequenzen. Zum einen werden die Anteile intakter Moleküle im Fluss zerstäubter Teilchen deutlich größer, das gemessene Massenspektrum spiegelt daher die molekulare Struktur der Oberfläche viel genauer wider. Zum anderen stellt man fest, dass die molekularen Signale im Massenspektrum nicht mehr verschwinden, wenn die Oberfläche mit einer größeren Ionendosis bestrahlt wird. Dies bedeutet, dass zum ersten Mal eine molekulare Tiefenprofilanalyse wie oben beschrieben ermöglicht wird. Eine solche dreidimensionale Analyse einer molekularen Teststruktur wird im Folgenden vorgestellt<sup>7</sup>. Hierzu wurde zunächst eine etwa 300 Nanometer dicke Schicht aus Trehalosemolekülen (ein Zucker) auf einer Siliziumoberfläche abgeschieden, die mit etwa einem Prozent eines Peptidmoleküls (GGYR) dotiert war. Danach wurde diese Schicht mit Hilfe der beschriebenen FIB-Technik mikrostrukturiert, indem mit einem fokussierten  $\text{Ga}^+$ -Ionenstrahl ein flacher Krater sowie einige tiefe Linien in Form der Buchstaben „PSU“ in die Oberfläche geschrieben wurden. Abbildung (7) zeigt eine rasterkraftmikroskopische Aufnahme der resultierenden Oberflächentopografie. Die solcherart präparierte Probe wurde dann mit Hilfe eines  $\text{C}_{60}^+$ -Clusterionenstrahls dreidimensional analysiert. Hierzu wurde eine Serie massenspektrometrischer Abbildungen der Oberfläche mit dazwischenliegenden Abtragungsschritten aufgenommen. Zur Kalibrierung der Tiefenskala

wurde dieses Verfahren mit rasterkraftmikroskopischen Aufnahmen der Oberflächentopografie vor und nach der Tiefenprofilanalyse kombiniert. Das Ergebnis sehen wir in Abbildung (8). Das massenspektrometrische Signal gesputterter Galliumatome ist in weiß und das der Siliziumatome des Substrats in hellgrau überlagert. Die Abbildung zeigt der besseren Übersichtlichkeit halber nur die jeweilige Oberfläche zu verschiedenen Zeiten während der Tiefenprofilanalyse. Man erkennt dabei deutlich den dreidimensionalen Aufbau der Struktur. Innerhalb des durch die Vorstrukturierung abgetragenen flachen Kraters findet man Gallium, das durch den  $\text{Ga}^+$ -Ionenstrahl in die Oberfläche implantiert wurde. Innerhalb des mit diesem Ionenstrahl beschossenen Bereichs ist das molekulare Signal verschwunden, da die molekulare Struktur der Schicht durch den Beschuss mit atomaren Ionen zerstört wird. Trägt man jetzt mit Hilfe des  $\text{C}_{60}^+$ -Clusterionenstrahls die Oberfläche ab, so wird das zerstörte, mit implantierten Ga-Atomen verunreinigte Schichtvolumen abgetragen und die darunter liegende unzerstörte Schicht freigelegt. Man erkennt dies daran, dass das Signal intakter Peptidmoleküle (im Bild nicht dargestellt) wieder erscheint, während dasjenige der implantierten Galliumatome verschwindet. Nach einer gewissen Zeit ist dann die gesamte Schicht abgetragen, so dass das darunter liegende Siliziumsubstrat freigelegt wird.

Bei der Bewertung der in Abbildung (8) dargestellten Ergebnisse ist es wichtig, festzustellen, dass eine solche Analyse mit einem atomaren Projektilionenstrahl nicht möglich gewesen wäre. Erst die Entwicklung leistungsfähiger Quellen zur Erzeugung gut fokussierbarer Clusterionenstrahlen hat diesen Durchbruch in der dreidimensionalen molekularen Massenspektrometrie möglich gemacht. Das Anwendungspotenzial solcher Untersuchungen ist gigantisch und erstreckt sich von der Analyse von Schichtstrukturen aus so





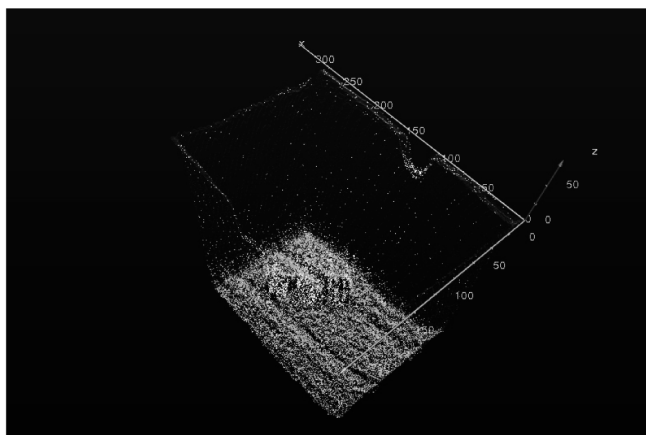
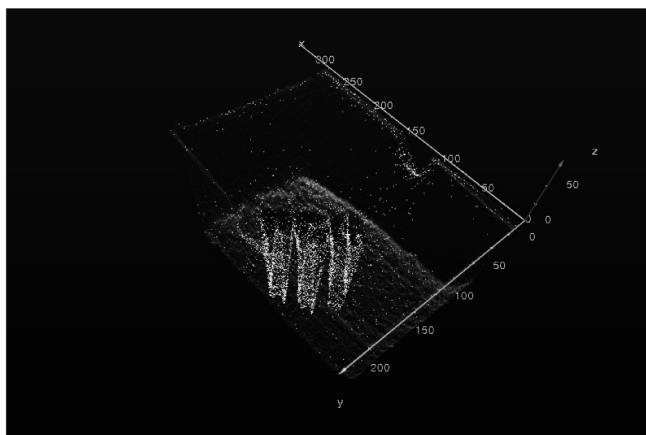
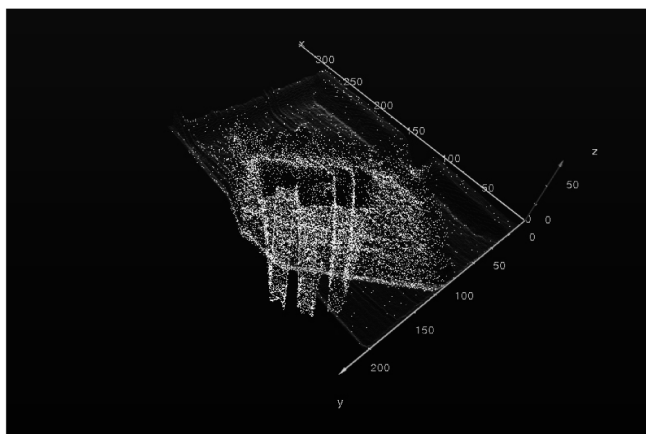
(8) Dreidimensionale Analyse der chemischen Zusammensetzung einer 300 nm dicken Trehalose-Schicht, die mit GGYR-Peptidmolekülen dotiert ist und auf einem Siliziumsubstrat deponiert wurde. Die Schicht wurde mit einem Gallium-Ionenstrahl strukturiert. Dargestellt ist das massenspektrometrische Signal gesputterter Ga (weiß) und Si (hellgrau) Atome. Das Signal intakt gesputterter Peptidmoleküle ist hier aufgrund der Graustufendarstellung nicht zu erkennen, kann aber unter [http://www.ilp.physik.uni-essen.de/wu-cher/Billiard\\_Unikate.pdf](http://www.ilp.physik.uni-essen.de/wu-cher/Billiard_Unikate.pdf) in der Farbdarstellung als blaue Einfärbung gesehen werden.

genannter „weicher Materie“ (zum Beispiel Polymerschichten) bis hin zu biologischen Fragestellungen. So ist es zum Beispiel denkbar, komplizierte organische Moleküle in biologischen Zellen zu lokalisieren. Hierzu werden die Zellen in ihrer natürlichen wässrigen Umgebung

eingefroren, ins Vakuum transferiert und auf einem gekühlten Probenhalter analysiert. Solche Ergebnisse sind von entscheidender Bedeutung zum Beispiel für die Entwicklung neuartiger pharmazeutischer Medikamente.

### Summary

The interaction of ion beams with solid surfaces is of great technological importance. One of the fundamental open questions in this area regards the dissipation channels of projectile energy (either kinetic or



potential), which is introduced into the surface. In the frame of the SFB 616, we investigate particularly the electronic excitation following from an ion impact onto a metallic surface. Sputtering, i. e., the release of surface particles by means of billiard-like atomic collision cascades initiated

by the projectile impact, forms the physical basis for deposition and lateral structuring methods of thin films. Moreover, mass spectrometry of sputtered particles constitutes a well-established technique for high resolution chemical surface analysis. The big advantage with respect to

other surface analysis tools is that the mass spectra yield information about the molecular structure of the investigated surface. Combined with ion-induced erosion, this enables a three-dimensional chemical analysis of complex surface structures. In this field, the recently established availability of cluster ion sources has opened up new possibilities with respect to applications of this technique to soft matter.

### Anmerkungen/Literatur

- 1) Behrisch, Rainer et al. (eds.): Sputtering by Particle Bombardment Vols. I-IV, (Springer 1981, 1982, 1986 and 2007)
- 2) Giannuzzi, L. A. Fred A. Stevie (eds.): Introduction to Focused Ion Beam: Instrumentation, Theory, Techniques and Practice, Springer 2005
- 3) Meyer, Stefan, Detlef Diesing, Andreas Wucher: Phys. Rev. Lett. 93 (2004) 137601-1.
- 4) Peters, Thorsten, Christian Haake, Detlef Diesing, Domocos Kovacs, Arthur Golczewski, Gregor Kowarik, Friedrich Aumayr, Andreas Wucher, Marika Schleberger: Phys. Rev. Lett. submitted (2008)
- 5) Benninghoven et al. (eds.): Secondary Ion Mass Spectrometry: Basic Concepts, Instrumental Aspects, Applications and Trends, Wiley 1987
- 6) Wucher, Andreas: Appl. Surf. Sci. (2006)
- 7) Wucher, Andreas: Juan Cheng and Nicholas Winograd: Anal. Chem. 79 (2007) 5529.

### Der Autor

Andreas Wucher, Jahrgang 1956, studierte von 1974 bis 1981 Physik an der Technischen Universität Clausthal und promovierte 1986 an der Universität Kaiserslautern. Dort habilitierte er sich auch 1994 für das Fach Experimentalphysik. Wucher war von 1981 bis 1986 und von 1987 bis 1998 Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Wissenschaftlicher Assistent und Akademischer Rat an der Universität Kaiserslautern. Seine Forschungsaufenthalte im Ausland führten ihn von 1986 bis 1987 nach Yorktown Heights, USA (IBM). Bis heute forscht er regelmäßig an der Pennsylvania State University, im Berkeley National Lab oder auch im Argonne National Lab, USA. Seit 1998 ist Andreas Wucher Professor für Experimentalphysik an der Universität Duisburg-Essen.

# DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT  
DUISBURG  
ESSEN

*Offen im Denken*

ub

universitäts  
bibliothek

Dieser Text wird über DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

**DOI:** 10.17185/duepublico/73812

**URN:** urn:nbn:de:hbz:464-20210203-170621-6

Alle Rechte vorbehalten.