

# Geburt und Kindheit der Rastertunnelmikroskopie (Nobel-Vortrag)\*\*

Von Gerd Binnig\* und Heinrich Rohrer\*

Wir berichten hier über die historische Entwicklung der Rastertunnelmikroskopie (RTM, Scanning Tunneling Microscopy STM), deren physikalische und technische Aspekte bereits in einigen kürzlich erschienenen Übersichtsartikeln und zwei Konferenzberichten<sup>[1]</sup> behandelt wurden. Viele weitere sind in nächster Zukunft noch zu erwarten. Die Abbildungen, auf die im Text nicht explizit verwiesen wird, geben einen Abriß der RTM-Technik.

Unser Bericht soll keineswegs eine Empfehlung sein, wie Forschung zu machen sei. Er gibt einfach das wieder, was wir dachten, wie wir handelten und wie wir fühlten. Es wäre jedoch erfreulich, wenn er zu einer gelösteren Einstellung im Wissenschaftsbetrieb ermutigen würde.

Vielleicht war es ein glücklicher Umstand, daß wir beide Erfahrung mit Supraleitung hatten, einem Gebiet, das Schönheit und Eleganz ausstrahlt. Für die RTM brachten wir einige Erfahrung im „Tunneln“<sup>[2]</sup> und mit „Ångströms“<sup>[3]</sup> mit, aber keine in Mikroskopie oder Oberflächenphysik. Das gab uns wahrscheinlich den Mut und die Unbeschwertheit, etwas anzufangen, das, wie man uns oft sagte, „prinzipiell nicht funktionieren sollte“.

„Nachdem ich (H. R.) einige Jahre auf dem Gebiet der Phasenübergänge und kritischen Phänomene gearbeitet hatte, und viele, viele Jahre mit magnetischen Feldern, mußte ich einfach einmal etwas anderes tun. Tunneln hatte mich in der einen oder anderen Form schon seit einiger Zeit beschäftigt. Vor Jahren hatte ich mich für eine Idee von John Slonczewski interessiert, magnetische Blasenspeicher unter Ausnutzung des Tunneleffekts auszulesen; bei anderer Gelegenheit hatte ich mich für kurze Zeit mit dem Tunneln zwischen sehr kleinen metallischen Körnern in instabilen Widerständen beschäftigt, und später konnte ich zusehen, wie meine Kollegen mit Toleranzproblemen bei der Herstellung von Josephson-Kontakten kämpften. So schien mir die lokale Untersuchung des Wachstums und der Eigenschaften dünner isolierender Schichten eine interessante Aufgabe zu sein. Dazu hatte ich die Gelegenheit, einen Wissenschaftler neu einzustellen, und Gerd Binnig, der sich für die gleichen Probleme interessierte, akzeptierte mein Angebot. Nebenbei bemerkt: Gerd und ich wären nie zusammengetroffen, hätte nicht K. Alex Müller, zu jener Zeit Leiter der Physik-Abteilung, die ersten Kontakte geknüpft!“.

Die ursprüngliche Idee war damals nicht, ein Mikroskop zu bauen, sondern lokale Spektroskopie auf einer Fläche von weniger als 100 Å Durchmesser zu treiben.

„Anläßlich meiner Wohnungssuche, drei Monate bevor ich (G. B.) tatsächlich bei IBM anfing, erörterte Heinrich

Rohrer mit mir ausführlich seine Gedanken zu Oberflächeninhomogenitäten, speziell solchen in dünnen Oxidschichten auf Metallocberflächen. Unsere Diskussion drehte sich darum, wie solche Filme lokal zu untersuchen seien, aber wir stellten fest, daß es dafür kein geeignetes Verfahren gab. Wir zerbrachen uns auch den Kopf darüber, ob eine spezielle Anordnung von Tunnelkontakteen mehr Einsicht in die Sache bringen könnte. Als Ergebnis dieser Diskussion kam mir während der LT15-Konferenz in Grenoble – noch immer einige Wochen vor meinem Start bei IBM – eigentlich aus heiterem Himmel mein alter Traum vom Vakuumtunneln wieder in den Sinn. Erst einige Jahre später erfuhr ich, daß ich diesen Traum mit vielen anderen Wissenschaftlern geteilt hatte, die, wie ich, Tunnelspektroskopie betrieben. Merkwürdigerweise hatte keiner von uns je davon gesprochen, obwohl die Idee im Prinzip alt war.“

Tatsächlich war sie zwanzig Jahre alt und stammte aus der Anfangszeit der Tunnelspektroskopie<sup>[4]</sup>. Offensichtlich war es in den meisten Fällen bei der Idee geblieben, und erst kurz nachdem wir begonnen hatten, machte uns Seymour Keller, der damals Mitglied des Technical Review Board der IBM Research Division war und zu den ersten gehörte, die Tunneln als neues Arbeitsgebiet in unserem Labor einführen wollten, auf W. A. Thompsons Versuche zum Tunneln mit einer positionierbaren Spalte aufmerksam<sup>[5]</sup>.

Diese experimentelle Herausforderung mit den Möglichkeiten, die sich daraus eröffnen konnten, reizte uns sehr. Erstaunlicherweise dauerte es einige Wochen bis wir erkannten, daß wir nicht nur lokale spektroskopische Untersuchungen machen konnten, sondern daß Rastern zur spektroskopischen auch noch topographische Information liefern würde, wir also einen neuen Mikroskop-Typ hätten. Die Betriebsweise ähnelte sehr der Stylus Profilometry<sup>[6]</sup>, aber statt einer Spalte in mechanischem Kontakt über die Oberfläche zu bewegen, sollte ein kleiner Abstand von wenigen Ångström zwischen Spalte und Probe aufrechterhalten und durch den Tunnelstrom, der zwischen beiden fließt, geregelt werden. Etwa zwei Jahre später, kurz bevor uns die ersten Bilder gelangen, erfuhren wir von einer Veröffentlichung, in der R. Young et al.<sup>[7]</sup> eine Art Feldemissionsmikroskop namens „Topographiner“ beschrieben hatten. Es hatte vieles gemein mit unserem Grundprinzip des RTM-Betriebs, außer daß die Spalte ziemlich weit von der Oberfläche entfernt bleiben mußte, so daß bei hohen Spannungen kein Tunnel-, sondern ein Feldemissionsstrom floß und die laterale Auflösung etwa der eines optischen Mikroskops entsprach. Sie schlugen vor, die Auflösung durch schärfere Feldemissionsspitzen zu verbessern, versuchten sogar Vakuumtunnels und diskutierten einige der aufregenden Aussichten für die Spektroskopie. Hätten sie, wenn auch nur in Gedanken, Vakuumtunnels und Rastertechnik kombiniert und die dazugehörige Auflösung

[\*] Dr. G. Binnig, Dr. H. Rohrer  
IBM-Forschungslaboratorium Zürich  
Säumerstrasse 4, CH-8803 Rüschlikon (Schweiz)

[\*\*] Copyright © The Nobel Foundation 1987. – Wir danken der Nobel-Stiftung, Stockholm, für die Genehmigung zum Druck einer deutschen Fassung des Vortrags.

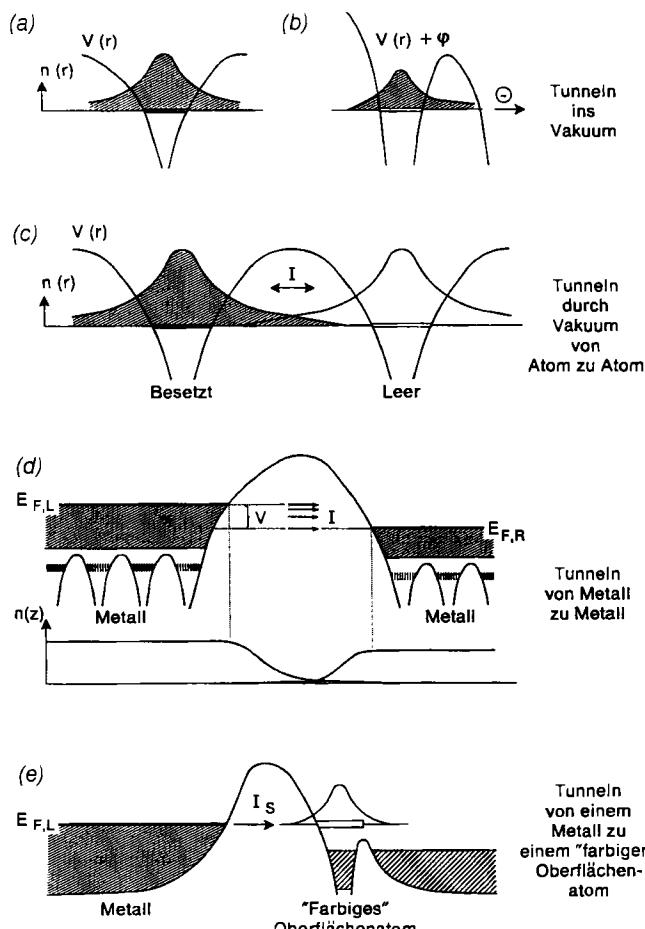
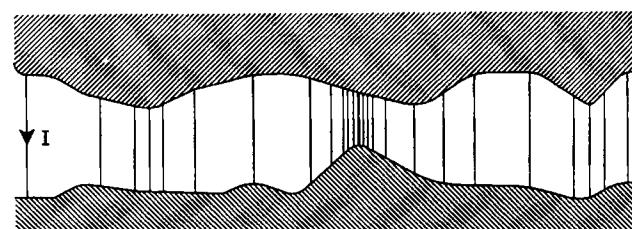


Abb. 1. Tunneln. (a) Die Wellenfunktion eines Valenzelektrons im Coulomb-Potentialtopf des Atomkerns und der anderen Valenzelektronen reicht ins Vakuum hinaus; sie „tunnelt“ ins Vakuum. (b) Setzt man ein Elektron einem elektrischen Feld aus, so kann es durch die Potentialbarriere tunneln und das Atom verlassen. (c) Kommen zwei Atome nahe genug zusammen, so kann ein Elektron durch das Vakuum oder die Potentialbarriere zwischen ihnen hin und her tunneln. (d) In einem Metall sind die Potentialbarrieren zwischen den Atomen im Inneren unterdrückt, und die Elektronen bewegen sich frei in Energiebändern, den Leitungsbändern. An der Oberfläche jedoch steigt das Potential zum Vakuum hin an und bildet die Tunnelbarriere, durch die ein Elektron zum Oberflächenatom eines anderen, dicht benachbarten Metalls tunneln kann. Die zwischen den beiden Metallen angelegte Spannung  $V$  erzeugt eine Differenz der Fermi-Energien  $E_{F,L}$  und  $E_{F,R}$ , wodurch auf der rechten Seite leere Zustände für die von der linken Seite herübertunnelnden Elektronen geschaffen werden. Der Tunnelstrom hat grob die Form  $I = f(V) \exp(-\sqrt{\phi} \cdot s)$ .  $f(V)$  enthält eine gewichtete mittlere lokale Zustandsdichte von Spalte und Probe, die Exponentialfunktion liefert die Tunnelwahrscheinlichkeit mit der mittleren Tunnelbarriärenhöhe  $\phi$  in eV und dem Abstand  $s$  der beiden Metalle in Å.  $f(V)$  und  $\sqrt{\phi}$  sind Materialeigenschaften, die man durch Messung von  $d \ln I / dV$  und  $d \ln I / ds$  erhält. (e) Ein einfacher Fall lokaler Spektroskopie. Ein charakteristischer Zustand, die „Farbe“ einer Oberflächenart, wird durch den Einsatz des Tunnelstrom-Beitrags  $I_s$  beobachtet [siehe N. D. Lang, *Phys. Rev. Lett.* 58 (1987) 45, zit. Lit.].

abgeschätzt, so wären sie wohl zu dem neuen Konzept der Rastertunnelmikroskopie gelangt. Sie waren näher daran als irgendwer sonst.

Mitte Januar 1979 reichten wir unseren ersten Patentantrag für das RTM ein. Eric Courtens setzte sich als stellvertretender Leiter der Physik-Abteilung im IBM-Forschungslaboratorium Rüschlikon dafür ein, aus der Idee einen Patentantrag für „Tausende von zukünftigen RTMs“ zu machen. Er war der erste, der an unsere Sache glaubte. Wenig später wurde Hans-Jörg Scheel nach einem internen Seminar über unsere RTM-Ideen der dritte. Für die technische

Oxid - Tunnelkontakt



Tunnelspitze

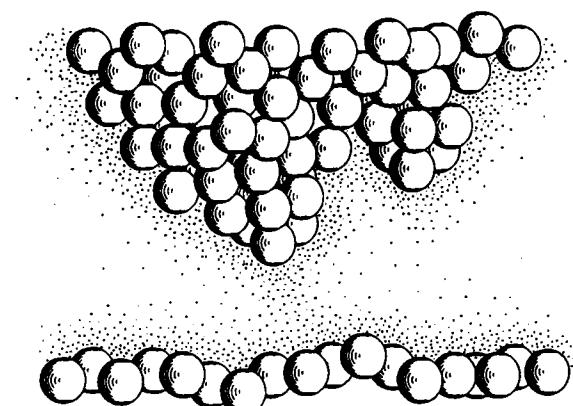


Abb. 2. Das Prinzip. Die Tunnelwahrscheinlichkeit nimmt mit der Tunnelstrecke exponentiell ab, im Vakuum etwa um einen Faktor 10 pro Ångström. In einem Oxid-Tunnelkontakt fließt der größte Teil des Stroms durch enge Kanäle mit geringem Elektrodenabstand. Ist eine Elektrode zu einer Spitze geformt, so fließt der Strom praktisch nur von den vordersten Atomen der Spitze, im günstigsten Fall nur aus einem bestimmten Orbital des vordersten Atoms. Dies definiert den Durchmesser des Tunnelstrom-Fadens und somit die laterale Auflösung zu atomaren Dimensionen. Die im Bild gezeigte zweite Spitze sitzt etwa zwei Atome weiter zurück und trägt nur etwa den millionsten Teil zum Strom bei.

Realisierung unseres Projekts konnten wir uns *Christoph Gerbers* handwerkliche Fähigkeiten sichern.

„Seit er 1966 zu IBM kam, hatte *Christoph* mit mir (H. R.) an hohen gepulsten Magnetfeldern, an Phasendiagrammen und an kritischen Phänomenen gearbeitet. Ende 1978 waren wir ziemlich begeistert von unseren ersten experimentellen Ergebnissen zum Random-Field-Problem, aber als wir ihn fragten, ob er bei dem neuen Projekt mitmachen wolle, zögerte *Christoph* keinen Augenblick. Er hat schon immer Dinge geliebt, die aus dem gewohnten Rahmen fielen. Er war im übrigen der zweite, der an unsere Sache glaubte. Dadurch blieb ich beim Random-Field-Problem ohne seine tatkräftige technische Unterstützung. Etwa ein Jahr später kam auch *Edi Weibel* dazu, wodurch ein weiteres Projekt seine technische Unterstützung verlor. Schließlich vervollständigte ich selbst die Gruppe und überließ das Random-Field-Problem anderen.“

Während der ersten paar Monate unserer Arbeit am RTM konzentrierten wir uns auf die Lösung der wichtigsten instrumentellen Probleme<sup>[8]</sup>. Wie lassen sich mechanische Schwingungen vermeiden, die Spalte und Probe gegeneinander bewegen? – Durch Schutz vor Vibrationen und akustischem Rauschen mit einer weichen Aufhängung des Mikroskops in einer Vakuumkammer. Wie stark sind die Kräfte zwischen Spalte und Probe? – Das schien in den

meisten Fällen kein Problem zu sein. Wie bewegt man die Spitze auf einer so feinen Skala? – Mit piezoelektrischem Material als reibungsfreiem elektromechanischem Wandler. (Die stetige Verformung des Piezomaterials im Ångström- und Subångström-Bereich wurde erst später durch die Tunnelexperimente selbst entdeckt.) Wie bewegt man die Probe so fein über die große Strecke vom Ort der Oberflächenbehandlung bis in die Reichweite der Spitze? – Mit der „Laus“. Wie vermeidet man starke Längenänderungen der Probe und besonders der Spitze aufgrund von Temperaturschwankungen? – Indem man Whisker mit kleiner Federkonstante vermeidet. Das führte zu einer viel allgemeineren, ja der wichtigsten Frage überhaupt: Welche Form sollte die Spitze haben, und wie sollte man diese herstellen? Ganz zu Anfang betrachteten wir die Spitze als kontinuierliches Medium mit einem bestimmten Krümmungsradius. Bald jedoch wurde uns klar, daß die Spitze niemals glatt ist, schon wegen der endlichen Größe der Atome, aber auch weil sie ohne spezielle Behandlung im-

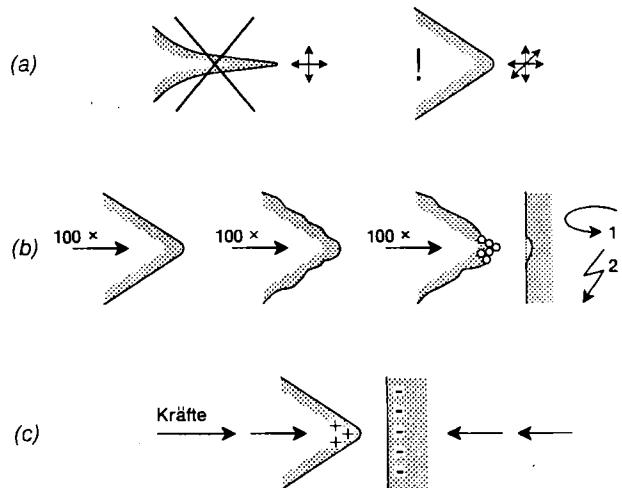


Abb. 4. Spalten. (a) Lange und schmale Spitzen oder Whisker sind vibrat ionsempfindlich und thermisch angeregt. (b) Eine mechanisch geschliffene oder geätzte Spitze zeigt scharfe Minitips, von denen gewöhnlich nur eine den Tunnelstrom trägt. Zu Beginn wurden die Spitzen durch leichten Kontakt (1), später durch Feldverdampfung (2) weiter angespitzt. (c) Elektrostatische und interatomare Kräfte verformen eine stumpfe Spitze oder starre Probe nicht, aber sie machen die Tunnelstrecke instabil, wenn die Spitze einen Whisker trägt. Auch die Reaktion weicher Proben wie Graphit oder organische Materialien auf solche Kräfte kann merklich sein und muß berücksichtigt werden.

#### Konstantstrom - Betrieb

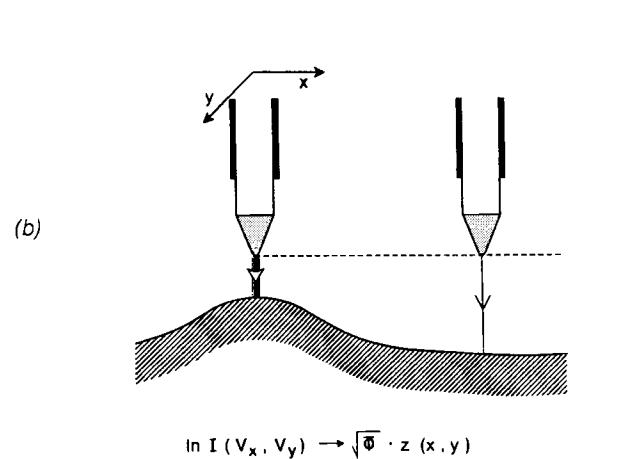
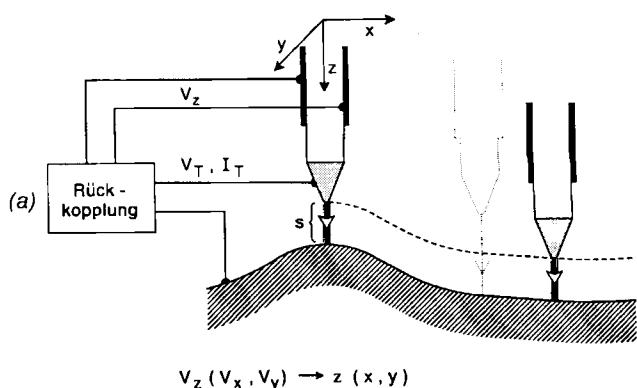


Abb. 5. Abbilden. (a) Im Konstantstrom-Betrieb folgt die Spitze der Oberfläche, wobei der Tunnelstrom durch ständiges Nachregeln der vertikalen Position der Spitze mit der Rückkopplungsspannung  $V_z$  auf einem vorgegebenen Wert konstantgehalten wird. Im Fall einer elektronisch homogenen Oberfläche bedeutet konstanter Strom im wesentlichen konstanten Abstand  $s$ . (b) Auf Oberflächenteilen mit Höhenunterschieden unter ein paar Ångström - je nach der Größe des dynamischen Bereichs der Strommessung - kann die Spitze schnell in einer konstanten mittleren  $z$ -Position bewegt werden. Solche „Strombilder“ erlauben sehr viel schnelleres Abtasten als in (a), erfordern aber eine gesonderte Bestimmung von  $\sqrt{\phi}$  zur Eichung von  $z$ . In beiden Fällen läßt sich die Tunnelspannung und/oder die  $z$ -Position modulieren, so daß man zusätzlich  $d \ln I / d V$  bzw.  $d \ln I / d s$  erhält.

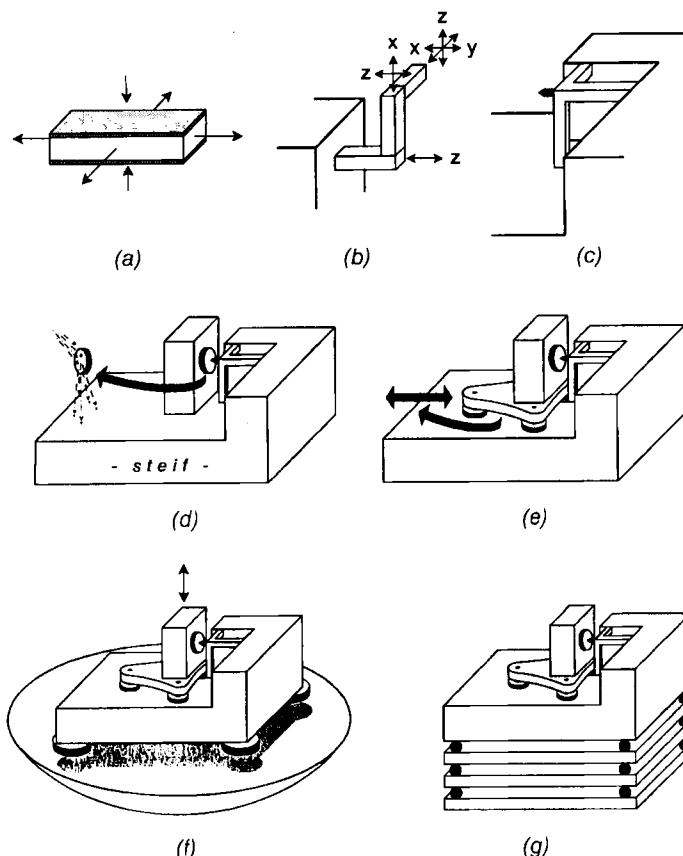


Abb. 3. Das Instrument. (a) Eine zwischen zwei Elektroden angelegte Spannung führt zur Kontraktion oder Expansion des dazwischen befindlichen piezoelektrischen Materials. Die in der Praxis erreichbare Gesamtauslenkung eines Piezos liegt gewöhnlich im Bereich von Mikrometern. (b) Ein reibungsfreier x-y-z-Piezoantrieb, der ziemlich vibrationsempfindlich ist. (c) Ein starres Dreibein ist derzeit neben dem Einröhren-Scanner (Single Tube Scanner) der meistbenutzte Piezoantrieb. (d) Dreibein und Probenhalter werden auf einem starren Rahmen montiert. Zur Präparation und zum Einbau muß die Probe von der Spitze weggenommen werden. (e) Ursprünglich wurde die Probe mittels einer piezoelektrischen „Laus“ mit elektrostatisch klemmbaren Füßen in die Reichweite des Piezoantriebs gebracht. Inzwischen sind auch magnetisch betriebene Positionierer und Differentialschrauben in Gebrauch. (f) Im ersten Schwingungsisolationssystem schwiebte die Tunneleinheit mit Permanentmagneten über einer supraleitenden Bleischale. (g) Die einfache und gegenwärtig vielbenutzte Vibrationsdämpfung mit einem Stapel von Metallplatten, die durch Viton (UHV-verträgliche Gummipuffer) getrennt werden.

mer ziemlich rauh wird. Diese Rauigkeit führt zum Vorhandensein von Minitips, wie wir sie nannten, und die extreme Abhängigkeit des Tunnelstroms vom Abstand zwischen Spitze und Probe selektiert dann die Minitip, die der Probe am nächsten ist.

Sofort nachdem wir die ersten stabilen RTM-Bilder bekommen hatten, die bemerkenswert scharfe einatomige Stufen zeigten, versuchten wir, atomare Auflösung zu erreichen. Unsere Hoffnung gründete darauf, daß das Vakuumtunnellen selbst ein neues Verfahren zur Herstellung extrem scharfer Spitzen bietet: Die lokal scharf begrenzten hohen Felder, die man beim Vakuumtunnellen mit nur wenigen Volt erreicht, lassen sich zum Schärfen der Spitze durch Diffusion im Feld oder durch Feldverdampfung benutzen. Leichtes Berühren der Oberfläche ist eine andere Möglichkeit. All das ist kein so kontrollierbares Verfahren wie die Spitzenschärfung in der Feldionenmikroskopie, aber es erschien uns zu kompliziert, in diesem Stadium RTM mit Feldionenmikroskopie zu kombinieren. Wir wußten kaum, was Feldionenmikroskopie überhaupt ist, ganz zu schweigen davon, wie man damit arbeitet. Wir probierten einfach so lange herum, bis die beobachteten Strukturen schärfer und schärfer aussahen. Manchmal klappte das und manchmal nicht.

Zuerst aber hatten wir das Vakuumtunnellen selbst nachzuweisen. Bei diesem Vorhaben waren die Gebäudevibrationen, abgesehen vom Auftreten von Whiskern, das größte Problem. Um die RTM-Einheit auch gegen akustisches Rauschen zu schützen, installierten wir das Schwingungsdämpfungssystem innerhalb der Vakuumkammer. Unser erster Aufbau war für den Betrieb bei tiefen Temperaturen und im Ultrahochvakuum (UHV) vorgesehen. Tiefe Temperaturen gewährleisteten geringe thermische Drift und kleine thermische Längenfluktuation; wir hatten uns hauptsächlich deswegen für sie entschieden, weil wir auf Spektroskopie fixiert waren. Und Tunnelspektroskopie war für uns, die wir beide über Supraleitung promoviert hatten, ein Tieftemperaturgebiet. Das UHV sollte uns die Präparation und Erhaltung einer wohldefinierten Oberfläche erlauben. Das Instrument war sorgfältig durchkonstruiert, Probe und Spitzenspitze waren für eine Oberflächenbehandlung zugänglich, und es hatte zur Vibrationsisolation eine Supraleiter-Schwebeaufhängung für die Tunneleinheit. Die Konstruktion und die ersten Tieftemperatur- und UHV-Tests kosteten uns ein ganzes Jahr, aber das Instrument erwies sich als so kompliziert, daß wir es nie benutzten. Wir waren zu ehrgeizig gewesen. Die Lösung der wesentlichen Probleme eines Tieftemperatur- und UHV-Instruments sollte noch sieben Jahre auf sich warten lassen<sup>[19]</sup>. Stattdessen benutzten wir nun einen Exsikkator als Vakuumkammer, Unmengen von Klebeband und eine primitive Version einer Supraleiter-Schwebeaufhängung, die in jeder Stunde etwa 20 L flüssiges Helium verschwendete. *Emil Haupt*, unser erfahrener Glasbläser, half mit zahlreichen Glaskonstruktionen und stellte in seiner Begeisterung sogar die Bleischale für die Schwebeaufhängung her. Wir maßen bei Nacht und wagten vor Aufregung, vor allem aber um Vibrationen zu vermeiden, kaum zu atmen. So erhielten wir die erste klar exponentielle Abhängigkeit des Tunnelstroms  $I$  vom Abstand  $s$  zwischen Spitze und Probe, die für den Tunneleffekt charakteristisch ist. Es war die Schicksalsnacht des 16. März 1981.

So wurde, 27 Monate nach seiner Konzeption, das Rastertunnelmikroskop geboren. Während der Entwicklungszeit genossen wir die nötige Freiheit zum Träumen und Forschen und die, Fehler zu machen und zu korrigieren. Wir forderten weder zusätzliche personelle noch finanzielle Mittel, und unsere Nebenbeschäftigung führte zu brauchbaren und veröffentlichten Resultaten. Das erste Dokument über RTM war der interne Tätigkeitsbericht von März/April 1981.

Eine logarithmische Abhängigkeit des Tunnelstroms  $I$  vom Abstand  $s$  zwischen Spitze und Probe allein war noch kein Beweis für Vakuumtunnellen. Die Ableitung von  $\ln I$  nach  $s$  sollte einer Tunnelbarrierenhöhe von  $\phi \approx 5$  eV entsprechen, dem charakteristischen Wert der mittleren Austrittsarbeit von Spitzenspitze und Probe. Wir kamen auf knapp 1 eV, was auf Tunnellen durch irgendein isolierendes Material statt durch Vakuum hindeutete. Glücklicherweise lieferte die Eichung der Piezo-Empfindlichkeit für kleine und schnelle Spannungsänderungen Werte, die nur halb so groß waren wie die von den Herstellern angegebenen. Das ergab eine Tunnelbarrierenhöhe von mehr als 4 eV und bewies so das Vakuumtunnellen. Die geringere Piezo-Empfindlichkeit wurde später durch sorgfältige Eichungen bei *H. R. Ott* an der ETH Zürich und durch *S. Vieira* von der Universidad Autónoma de Madrid bestätigt<sup>[10]</sup>.

*U. Poppe* hatte einige Monate früher über Vakuumtunnellen berichtet<sup>[11]</sup>, aber sein Interesse lag bei der Tunnelpektroskopie an exotischen Supraleitern. Er war hierbei sehr erfolgreich, doch er bestimmte nicht  $I(s)$ . Achtzehn Monate später erfuhren wir, daß *E. C. Teague* ähnliche  $I(s)$ -Kurven bereits in seiner Dissertation gezeigt hatte, die aber damals nicht allgemein zugänglich war<sup>[12]</sup>.

Unsere Erregung nach dieser März-Nacht war groß. *Hirsh Cohen* als stellvertretender Direktor unseres Laboratoriums fragte uns sofort: „Was braucht ihr alles?“, eine Frage, die, so einfach und offensichtlich sie ist, nur selten einmal jemand zu stellen wagt. „*Gerd* wollte sofort einen Beitrag<sup>[13]</sup> für die LT16-Konferenz nachreichen, die im September in Los Angeles stattfand. Er wollte ohnehin dorthin gehen, mit seinem supraleitenden Strontiumtitannat, und ich war sicher, daß wir bis dahin ein paar topographische Bilder haben würden. Und wir hatten sie tatsächlich. Ich arrangierte für *Gerd* eine ausgedehnte Vortragsreise durch die USA, aber ungefähr drei Wochen vor seiner Abreise warnte ihn ein Freund, daß, sobald die Neuigkeit bekannt wäre, sofort hunderte von Wissenschaftlern auf den RTM-Zug aufspringen würden. Das taten sie auch – ein paar Jahre später. Nach zwei ausführlichen Diskussionen bei einer Wochenendwanderung war er dennoch davon überzeugt, daß die Zeit für den öffentlichen Auftritt des RTMs reif war.“ Unser erster Versuch, eine Zuschrift („Letter“) zu publizieren, wurde abgelehnt. „Das ist ein gutes Zeichen“, tröstete uns *Nico Garcia*, ein Gastprofessor von der Universidad Autónoma de Madrid.

Nach diesem wichtigen ersten Schritt mit einem vollständigen RTM-Aufbau brauchten wir nur drei Monate, die wir teilweise mit Warten auf die Hochspannungsversorgung für die Piezos verbrachten, um die ersten Bilder von Einzelstufen<sup>[14]</sup> auf einem  $\text{CaIrSn}_4$ -Einkristall zu erhalten, den *R. Gambino* gezogen hatte. Hier war das Hauptproblem, die Whisker loszuwerden, die wir ständig

erzeugten, weil wir mit der Spitze in die Oberfläche rammten. Wir waren nun soweit, uns der Oberflächenphysik zuwenden und zunächst Oberflächenrekonstruktionen zu untersuchen. Wir bauten ein UHV-geeignetes RTM (nicht mehr mit Klebeband) und hängten es ins Vakuum, vorläufig an einem Gummiband. Die Resultate deuteten darauf hin, daß die Supraleiter-Schwebeaufhängung womöglich gar nicht nötig war.

Das war der Stand der Dinge bei der Publicity-Tour durch die USA im September 1981. Die meisten Reaktionen waren wohlwollend, manche enthusiastisch und zwei Leute prophezeiten uns sogar den Nobel-Preis, aber das RTM war anscheinend noch zu exotisch, als daß sich irgend jemand außerhalb unseres Labors aktiv engagiert hätte.

Als nächstes schützten wir das RTM durch ein zweistufiges Federsystem mit Wirbelstromdämpfung vor Vibratoren<sup>[8]</sup> und bauten es in eine UHV-Kammer ein, die gerade nicht benutzt wurde. Wir bauten Möglichkeiten ein, die Probe zu *sputtern* und zu *annealen*, konnten aber mit diesem RTM noch keine andere Oberflächen-Untersuchungsmethode zur Charakterisierung und laufenden Beobachtung des Zustands der Probe oder Spitze kombinieren. Obwohl wir die Supraleiter-Schwebeaufhängung nur drei Monate einsetzen, wurde sie jahrelang zitiert. Offenbar prägen sich komplizierte Dinge besser ein!

Damals gab es ein äußerst faszinierendes und schwieriges Problem in der Oberflächenphysik, nämlich die  $7 \times 7$ -Rekonstruktion der Si(111)-Oberfläche. Eine Gruppe verbreiteter Modelle sagte ziemlich grobe Strukturen voraus, die mit dem RTM auflösbar sein sollten. So begannen wir, nach der  $7 \times 7$ -Struktur zu jagen, und gerieten in ihren Bann. Zunächst ohne Erfolg. Das RTM funktionierte zwar gut, manchmal mit einer Auflösung deutlich um 5 Å, nicht aber unsere Oberflächenpräparation. Gelegentlich fanden wir recht schöne Muster mit den Kantenlinien einzelner Atomlagen<sup>[8]</sup>, doch normalerweise sah die Oberfläche auf atomarer Skala rauh und ungeordnet aus. Ein Bild ließ die  $7 \times 7$ -Struktur sogar als ein regelmäßiges Muster von Vertiefungen, den Vorläufern der charakteristischen Löcher an den Ecken der Oberflächen-Einheitszelle, vorausahnen. Mit einem einzelnen Ereignis aber läßt sich keine neue Struktur belegen, die mit einer neuen Methode gefunden wurde. Doch es stärkte unser Vertrauen.

Im Frühjahr 1982 war RTM bereits ein Gesprächsthema. Vermutlich hätte ein Bild der nächstbesten Oberfläche, geschickt präpariert, mit einer regelmäßigen Folge von Stufen, die Zurückhaltung der Oberflächenphysiker beseitigt. Wir aber dachten, die Einzel-, Doppel- und Dreifachstufen des CaIrSn<sub>4</sub> mit atomar flachen Terrassen<sup>[14]</sup> und die Stufenlinien des Si(111)<sup>[8]</sup> seien überzeugend und vielversprechend genug. Und statt noch mehr Zeit mit uninteressanten Stufenlinien zu vergeuden, entschlossen wir uns, Oberflächenrekonstruktionen mit bekannter Periodizität anzugehen, um mit einiger Aussicht auf Erfolg etwas Neues lernen und vorweisen zu können.

Wegen der einfacheren Probenpräparation und der erforderlichen Auflösung von nur 8 Å wechselten wir zu einem Gold-Einkristall, speziell der (110)-Oberfläche, von der man wußte, daß sie eine  $1 \times 2$ -Rekonstruktion zeigte. Das schien nach unserer Erfahrung an den Silicium-Stufenlinien mit der Auflösung des RTM gut erreichbar zu

sein. Daß wir einige Zeit zuvor *Karl-Heinz Rieder*, dem Oberflächen-Spezialisten des Labors, seinen Si-Einkristall als Klümpchen zurückgegeben hatten, schreckte ihn nicht davon ab, dieses Gold-Experiment vorzuschlagen und uns dafür seinen Au-Kristall zu leihen – und einige Wochen später fügten wir seiner Sammlung ein weiteres Klümpchen hinzu! Doch dazwischen gelang es uns, mit Hilfe seiner Ratschläge zur Oberflächenpräparation, die  $1 \times 2$ -Struktur aufzulösen<sup>[15]</sup>. Allerdings hatten wir entgegen unserer Erwartung mit der Auflösung zu kämpfen, denn Gold wechselte schon bei der leichtesten Berührung von der Oberfläche zur Spitze. Die Beweglichkeit von Gold bei Zimmertemperatur ist so hoch, daß sich rauhe Oberflächen nach einer Weile glätten, d. h. zunächst scharfe, goldbedeckte Spitzen von selbst stumpf werden. Wir möchten hier gern erwähnen, daß wir später, für Messungen an Au(100), scharfe Goldspitzen durch Feldverdampfung von Au-Atomen von der Probe zur Spitze formierten und sie bei 0.8 V Tunnelspannung durch das relativ hohe Feld stabilisieren konnten.

Im Fall der Au(110)-Oberfläche war atomare Auflösung vor allem eine Sache des Glücks und unserer Beharrlichkeit. Sie sprang unvorhersehbar von hohen zu niedrigen Werten, was wahrscheinlich durch Adatome verursacht wurde, die an der Spitze herumwanderten und zeitweilig eine stabile Position am vordersten Ende fanden. Wir beobachteten auch eine beträchtliche Unordnung, die zur Durchmischung von langen, schmalen Streifen der  $1 \times 2$ -Rekonstruktion mit Streifen von  $1 \times 3$ - und  $1 \times 4$ -Rekonstruktionen und mit Stufenlinien führte. Trotzdem lieferten diese Experimente die ersten RTM-Bilder, die atomare Ketten mit atomarer Auflösung senkrecht zu den Ketten zeigten. Die Unordnung, eine charakteristische Eigenschaft dieser Oberfläche, wurde zwar aus der Sicht der Oberflächenphysik als zu groß angesehen, zeigte aber sehr hübsch die Leistungsfähigkeit der Rastertunnelmikroskopie als lokal anwendbare Methode und spielte ungefähr ein Jahr später eine wichtige Rolle beim Testen der ersten mikroskopischen Theorien der Rastertunnelmikroskopie.

Mit Gold führten wir auch das erste spektroskopische Experiment mit einem RTM aus. Wir wollten eine Vorhersage testen, die die gleichrichtende Strom-Spannungs-Charakteristik eines Probe-Spitze-Tunnelkontakte aufgrund der geometrischen Asymmetrie betraf<sup>[16]</sup>. Unglücklicherweise wurde die Probenoberfläche bei positiver Probe um 5 V herum instabil, und die kleine in diesem Spannungsbereich beobachtete Asymmetrie hätte auch andere Gründe haben können. Doch mit umgekehrter Polarität konnte die Spannung bis 20 V hinaufgefahren werden, wobei eine ganze Reihe von markanten resonanten Oberflächenzuständen sichtbar wurde<sup>[8]</sup>. Wir halten die Experimente mit Gold im Frühjahr und Frühsommer '82 für einen sehr wichtigen Schritt in der Entwicklung der Methode, das RTM hatte schon da unsere anfänglichen Erwartungen übertroffen. Wir hatten auch die ersten Anhänger außerhalb unseres Labors gewonnen, *Cal Quate* von der Stanford University<sup>[17]</sup> und *Paul Hansma* von der University of California in Santa Barbara<sup>[18]</sup>. Wir hielten zahlreiche Vorträge über die Gold-Arbeiten und sie erregten auch ein wenig Aufmerksamkeit, aber alles in allem tat sich nicht viel. Wir nahmen uns nicht einmal die Zeit, eine Veröffentlichung zu schreiben – die  $7 \times 7$  wartete!

Inzwischen hatten wir auch die ersten chemischen Abbildungen versucht: kleine Goldinseln auf Silicium. Diese Inseln waren in der Topographie als glatte, flache Hügel auf einer rauen Oberfläche sichtbar, aber sie waren auch klar als Regionen mit einer erhöhten Tunnelbarriere zu erkennen<sup>[18]</sup>. Daher wurden die Au-Inseln aufgrund ihrer unterschiedlichen elektronischen Oberflächeneigenschaften abgebildet. Es wäre sicher interessant gewesen, diese Sache weiterzuverfolgen, aber wir wußten nun, daß es im Prinzip ging – und die  $7 \times 7$  wartete noch immer!

Wir begannen den zweiten  $7 \times 7$ -Versuch im Herbst 1982 und befolgten den Rat von *Franz Himpel*, die Oberfläche nicht zu sputtern. Das klappte auf Anhieb und wir beobachteten die  $7 \times 7$ , wo immer die Oberfläche flach war. Wir waren hingerissen von der Schönheit des Musters.

„Ich (G. B.) konnte nicht aufhören, die Bilder anzuschauen. Es war wie das Betreten einer neuen Welt. Es erschien mir als der unübertreffbare Höhepunkt meiner wissenschaftlichen Karriere und gerade deswegen in gewisser Weise als ihr Ende. *Heini* verstand meine Gefühle und schleppte mich schnell für ein paar Tage nach St. Antönien, einem bezaubernden Dorf hoch oben in den Schweizer Bergen, wo wir die Veröffentlichung über die  $7 \times 7$  schrieben.“

Wir kamen zurück in der Überzeugung, daß das die Aufmerksamkeit unserer Kollegen erregen würde, sogar derer, die nichts mit Oberflächenphysik zu tun hatten. Wir halfen dem nach durch die Vorführung eines Reliefmodells der unbearbeiteten Daten, das wir aus den originalen Schreiberlinien mit Schere, Plexiglas und Nägeln gebastelt hatten, sowie einer bearbeiteten Aufsicht; das Relief wegen seiner Glaubwürdigkeit, die Aufsicht zur Analyse und Diskussion<sup>[19]</sup>. Das half – mit dem Ergebnis, daß wir für eine Weile praktisch nicht mehr zum Forschen kamen. Wir wurden mit Vortragseinladungen überschwemmt, und unzählige Besucher unseres Labors waren neugierig zu erfahren, wie man ein RTM baut. Die Zahl der Gruppen, die ernsthaft damit anfingen, blieb jedoch klein. Es schien immer noch einen Konflikt zu geben zwischen der außerordentlich ansprechenden konzeptionellen Einfachheit, einzelne Atome im dreidimensionalen Ortsraum direkt mit Schreiberlinien darzustellen, und dem intuitiven Vorbehalt, daß es schließlich so einfach doch nicht sein könne.

Unser Resultat schloß all die vielen Modelle aus, die es bereits gab, und merkwürdigerweise auch noch einige, die folgten. Nur eines war nahe dran: das Adatom-Modell von *W. Harrison*<sup>[20]</sup>, bei dem nur die Zahl der Adatome nicht ganz stimmte. Heute ist eine Variante des Adatom-Modells, bei der neben dem charakteristischen  $7 \times 7$ -Adatom-muster auch tiefere Lagen rekonstruiert sind<sup>[21]</sup>, allgemein akzeptiert und verträglich mit den meisten Ergebnissen verschiedener experimenteller Methoden wie Ion Channelling<sup>[22]</sup>, Transmissions-Elektronenbeugung<sup>[23]</sup> und detaillierteren RTM-Ergebnissen anderer Gruppen<sup>[24]</sup>.

Die  $7 \times 7$ -Experimente beschleunigten auch die Entwicklung der ersten mikroskopischen Theorien zur Rastertunnelmikroskopie. *Tersoff* und *Hamman* sowie *Baratoff*<sup>[25]</sup> wendeten *Bardeens* Transfer-Hamilton-Operator-Formalismus auf die kleine Geometrie der Spitze und der atomar gewellten Oberfläche an. *Garcia*, *Ocal* und *Flores* wie auch *Stoll*, *Baratoff*, *Selloni* und *Carnevali* behandelten die Sache als Streuproblem<sup>[26]</sup>. Die Ergebnisse beider An-

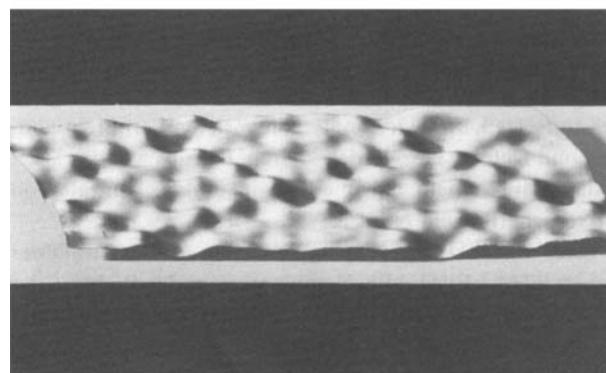
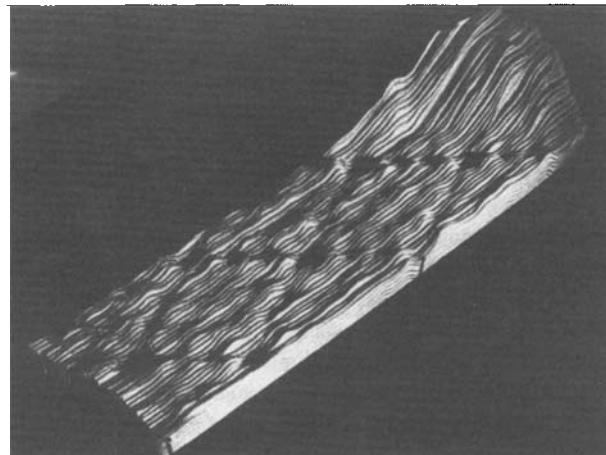


Abb. 6.  $7 \times 7$ -Rekonstruktion von Si(111). Oben: Relief aus den ursprünglichen Schreiberlinien (aus [19], © 1983 The American Physical Society). Unten: Bearbeitetes Bild der  $7 \times 7$ -Rekonstruktion von Si(111). Charakteristisch für die rhomboedrische Oberflächeneinheitszelle sind das Loch an der Ecke und die zwölf Maxima, die Adatome. In dem bearbeiteten Bild erscheinen die sechs Adatome in der rechten Hälfte der Rhomben höher. Dies beruht auf einer elektronischen Inäquivalenz an der Oberfläche aufgrund einer strukturellen Inäquivalenz zwischen rechts und links in den darunterliegenden Lagen. Die Rekonstruktion reicht ungestört bis in die unmittelbare Umgebung des großen „Atomberges“ auf der rechten Seite.

sätze waren miteinander in Einklang; das beruhigte uns, weil es in groben Zügen unser intuitives Bild vom Tunneln in kleinen Geometrien durch einfaches Herunterskalieren des planaren Tunnelns bestätigte, und die Anerkennung der Tunnelmikroskopie in Physikerkreisen stärkte. Die theoretischen Arbeiten konzentrierten sich auf den nicht-planaren Aspekt des Tunnelns von freien Elektronen, wobei die noch immer unveröffentlichten RTM-Ergebnisse an Au(110) als Prüfstein dienten. Sie blieben noch ziemlich lang unveröffentlicht, denn die Prachtbilder von der  $7 \times 7$ -Siliciumoberfläche überstrahlten unsere Au(110)-Experimente. Eine Reaktion auf den ersten Versuch einer Publikation war: „.... In dieser Arbeit fehlt im Grunde jegliche konzeptionelle Diskussion, ganz zu schweigen von einer konzeptionellen Neuigkeit. .... Mich interessiert das Verhalten der Oberflächenstruktur von Gold und anderen Metallen, die in der Arbeit vorkommen. Warum sollten mich die Ergebnisse in diesem „Paper“ aufregen? ...“ Es war sicher schlechte Veröffentlichungsstrategie unsererseits, aber wir waren nicht ausreichend vertraut mit einer Art der Referierung, die die schwachen Punkte sucht und dabei ganz unschuldig das Wesentliche übersieht.

Die Gold- und Silicium-Experimente zeigten, daß die Rastertunnelmikroskopie als Methode der Oberflächenphysik durch Oberflächencharakterisierung *in situ* mit zusätzlichen Verfahren, insbesondere mit Beugung langsamer Elektronen (Low Energy Electron Diffraction, LEED), wesentlich gewinnen würde. Wir hatten bereits gelernt, daß Oberflächen auch nach ausgefeilter Präparation oft nicht so einheitlich und flach waren wie man allgemein annahm. Die Kombination von LEED mit RTM *in situ* erwies sich als außerordentlich hilfreich, weil man so vermeidet, etwas zu suchen, wo es nichts zu suchen gibt, und weil sie uns die Gelegenheit gab, den Umgang mit LEED und Auger-Elektronen-Spektroskopie (AES) zu lernen. Die Kombination von RTM mit anderen, etablierten Verfahren der Oberflächenphysik räumte auch einen häufig vorgebrachten Einwand aus dem Weg: Wieviel haben unsere RTM-Bilder tatsächlich mit der auf andere Weise charakterisierten Oberfläche zu tun? Uns selbst quälte diese Sorge weniger, denn wir hatten auch gelernt, daß sich Rekonstruktionen bis in die unmittelbare Umgebung von Oberflächendefekten fortsetzen, und wir konnten die meisten Verunreinigungen und Defekte einzeln detektieren. Für uns war das kombinierte Instrument daher eher von praktischem als von wissenschaftlichem Nutzen.

Nach einem kurzen aber interessanten Abstecher mit der neuen RTM-LEED-AES-Kombination in das Problem der (100)-Oberfläche von Gold<sup>[27]</sup> wandten wir uns der Chemie zu. Gemeinsam mit *A. Baró*, einem Gastprofessor von der Universidad Autónoma de Madrid, der sich selbst mit der Technik vertraut machen wollte, beobachteten wir die sauerstoffinduzierte  $2 \times 1$ -Rekonstruktion von Ni(110)<sup>[28]</sup> und interpretierten die ausgeprägten und regelmäßig angeordneten Erhebungen, die wir sahen, als einzelne Sauerstoffatome. Wir hatten bereits früher Strukturen auf atomarer Skala gesehen, die als Adsorbate oder Adsorbatcluster interpretiert werden konnten, aber sie waren mehr ein Ärger als eine Sache von Interesse. Die Experimente mit Sauerstoff auf Nickel zeigten, daß die Sauerstoffbedeckung durch die abbildende Tunnelspitze nicht irreversibel verändert wurde. Dies war ein sehr bedeutsames Ergebnis im Hinblick auf die Beobachtung, Untersuchung und Durchführung von Oberflächenchemie mit einer RTM-Spitze. Ungefähr ein Jahr später, als wir die sauerstoffinduzierte  $2 \times 2$ -Rekonstruktion der Ni(100)-Oberfläche studierten, beobachteten wir charakteristische Strompeaks, die wir Sauerstoff zuschreiben konnten, der entlang der Oberfläche unter der Spitze hindurchdiffundierte<sup>[29]</sup>. Wir bemerkten, daß die gleiche Art von Peaks schon in unseren früheren Bildern von sauerstoffbedecktem Ni(110) vorhanden war, was wir aber bei deren Aufnahme nicht beachtet hatten. Diffundierende Atome konnten nicht nur einzeln beobachtet werden, sondern ihre Wanderung konnte auch mit bestimmten Oberflächenstrukturen wie Stufenlinien oder gebundenen Sauerstoffatomen korreliert werden. Gegen Ende 1983 begannen wir gemeinsam mit *H. Gross* von der ETH Zürich, auch die Möglichkeiten der Rastertunnelmikroskopie in der Biologie zu testen. Wir konnten DNA-Ketten verfolgen, die auf einem Kohlenstofffilm lagen, der auf einen silberbeschichteten Silicium-Wafer aufgebracht war<sup>[30]</sup>.

Jenes Jahr endete mit einer höchst angenehmen Überraschung: Am Freitag, dem 9. Dezember, erhielten wir ein

Telegramm vom Sekretär der König-Faisal-Stiftung, in dem uns der König-Faisal-Preis für Wissenschaft angekündigt wurde, und montags darauf einen Telefonanruf des Sekretärs der Europäischen Physikalischen Gesellschaft, der uns mitteilte, daß wir den Hewlett Packard Europhysics Prize bekommen würden. „An dem Tag, als das Telegramm eintraf, war *Gerd* in Berlin und hielt den Vortrag zur Verleihung des Otto-Klung-Preises. Außerdem war es mein 20jähriges Jubiläum bei IBM.“ Das waren ermutigende Zeichen dafür, daß die Rastertunnelmikroskopie ihren Weg machen würde. Es folgte eine neue Flut von Anfragen.

Im Sommer 1984 konnten wir endlich das in Angriff nehmen, was wir uns im Herbst 1978 vorgenommen hatten, bevor die Idee der Mikroskopie überhaupt aufgetaucht war, nämlich die lokale Spektroskopie. Gemeinsam mit *H. Fuchs* und *F. Salvan* untersuchten wir die saubere  $7 \times 7$ <sup>[1,31]</sup> und die  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Rekonstruktion von Gold auf Si(111)<sup>[31]</sup> und – zurück zum Kern der Sache – einen dünnen Oxidfilm auf Nickel<sup>[1,32]</sup>. Wir konnten sehen, daß die elektronische Struktur von Oberflächen so ist, wie man es z. B. von Photoemissionsexperimenten her weiß, und daß wir diese elektronische Struktur im Ortsraum auf atomarer Skala auflösen konnten. Wir nannten das (und nennen es noch immer) die „Farbe“ der Atome. Tatsächlich waren die Oxidschichten inhomogen und in Rastertunnelspektroskopie (RTS)-Bildern ganz klar zu sehen. Auf der  $7 \times 7$  konnten wir mit RTS zur zweiten Lage hinuntersehen und einzelne freie Bindungen zwischen den Adatomen beobachten<sup>[11]</sup>. Zu jener Zeit hatten *C. Quate* und seine Gruppe bereits ein RTM laufen und damit lokale Spektroskopie getrieben – noch nicht mit atomarer Auflösung, aber bei tiefen Temperaturen<sup>[33]</sup>. Sie hatten die Energielücke eines Supraleiters gemessen und später sogar ihre Ortsabhängigkeit aufgezeichnet. Spektroskopische Abbildung war nichts wirklich Aufregendes, aber es war eine wichtige Entwicklung. Wir hatten nun die Verfahren, um die topographische und elektronische Struktur einer Oberfläche vollständig zu charakterisieren. Obwohl es gewöhnlich ein verzwicktes Problem ist, die interessierende Eigenschaft aus einem Satz von RTM- und RTS-Messungen herauszulesen, war unsere Vision von der Rastertunnelmikroskopie Wirklichkeit geworden. Doch trotz allem mußten wir erfahren, daß diese Ansicht nicht allgemein geteilt wurde. Wir hörten von Gerüchten, wonach Wissenschaftler um ganze Kisten Champagner wetterten, daß unsere Ergebnisse reine Computersimulationen seien! Solche Wetten hatten wahrscheinlich den Hintergrund, daß das RTM inzwischen bereits drei Jahre alt war, aber außer uns immer noch niemand atomare Auflösung erreichte. Das war auch unsere Sorge, aber in anderer Hinsicht. Im Spätsommer '83 hatte uns *Herb Budd*, Organisator des IBM Europe Institute und ein begeisterter RTM-Anhänger, gebeten, im Sommer 1984 im Rahmen dieses Instituts ein RTM-Seminar zu veranstalten. Das bedeutete eine Woche mit 23 Vorträgen vor einem ausgewählten Kreis europäischer Wissenschaftler. Zu dieser Zeit sahen wir keinerlei Möglichkeit, 23 Stunden zu füllen, geschweige denn 23 Redner zu verpflichten. Ein Jahr später stimmten wir zu, voller Optimismus für den Sommer '85. Im Dezember '84 trafen sich auf *Cal Quates* Initiative neun Vertreter der führenden RTM-Gruppen zu einem Mini-Workshop in einem Hotelzimmer in Cancun.

Es war ein äußerst erfrischender Ideenaustausch, aber es gab noch immer nirgendwo sonst atomare Auflösung und daher auch keine Aussicht auf eine ausreichende Anzahl von Vorträgen für das Seminar.

In den folgenden paar Monaten änderte sich die Situation drastisch. *R. Feenstra* und Mitarbeiter kamen zuerst mit gespaltenem GaAs heraus<sup>[34]</sup>, *C. F. Quates* Gruppe mit der 1 × 1-Struktur auf Pt(100)<sup>[35]</sup> und *J. Behm, W. Hoesler* und *E. Ritter* mit der hexagonalen Phase auf Pt(100)<sup>[36]</sup>. Beim März-Treffen 1985 der American Physical Society präsentierte *P. Hansma* RTM-Bilder von Graphitstrukturen atomarer Dimension<sup>[37]</sup>, und als *J. Golovchenko* die wundervollen Ergebnisse an verschiedenen rekonstruierten Ge-Filmen auf Si(111)<sup>[38]</sup> vorstellte, hätte man eine Stecknadel fallen hören können. Die atomare Auflösung gab es nun „offiziell“, und die Rastertunnelmikroskopie war akzeptiert. Das Seminar des IBM Europe Institute im Juli wurde zu einem exklusiven Workshop für RTM’er und umfaßte ungefähr 35 eigenständige Beiträge, nicht alle mit atomarer Auflösung, aber bereits mehr als im März<sup>[39]</sup>. „Eine reiche Quelle neuer Ideen“, wie *Cal Quate* sich ausdrückte.

Unsere Geschichte handelte bisher hauptsächlich vom Streben nach struktureller und elektronischer Abbildung mit atomarer Auflösung vor dem Hintergrund der Oberflächenphysik. Einzelne Atome hatte man auch schon zuvor mit der Feldionenmikroskopie gesehen, mit der Atom-Probe-Technique<sup>[40]</sup> konnte man sie einzeln untersuchen. Die Eleganz dieser Techniken wird aber relativiert durch ihre Einschränkung auf Atome an bestimmten Plätzen auf feinen Spitzen, die sich nur aus einer ziemlich beschränkten Auswahl von Materialien herstellen lassen. Auch die Elektronenmikroskopie, die Hauptquelle des heutigen Wissens über Strukturen im Submikrometer-Bereich in praktisch allen Gebieten der Wissenschaft, der Technologie und der Industrie, ist in den atomaren Bereich vorgedrungen. Die Abbildung einzelner Atome oder atomarer Strukturen gelingt jedoch noch immer nur in speziellen Fällen, mit großer Erfahrung und mit außergewöhnlichem apparativem Aufwand. Die Anziehungskraft und die Bedeutung der Rastertunnelmikroskopie beruhen nicht nur auf der Möglichkeit, Oberflächen Atom für Atom beobachten zu können, sondern auch auf ihrer breiten Anwendbarkeit, ihrer konzeptionellen und instrumentellen Einfachheit und ihrer Erschwinglichkeit. All dieses zusammengenommen hat dazu geführt, daß wir einzelne Atome und atomare Strukturen heute ziemlich gelassen und fast beiläufig wahrnehmen.

Aber es gibt noch viele andere, vielleicht weniger spektakuläre, aber ebenso bedeutsame Aspekte, die RTM zu einer anerkannten und brauchbaren Methode gemacht haben, die jetzt in vielen Bereichen der Wissenschaft und der Technologie weiterentwickelt wird.

Die Instrumente selbst sind einfacher und kleiner geworden. Ihre erheblich verringerte Größe erlaubt den bequemen Einbau in andere Systeme, z. B. in ein Rasterelektronenmikroskop<sup>[41]</sup>. Ein RTM-Typ behält die akkurate Probenpositionierung bei, ist aber so stabil, daß Probe und Spitze *in situ* gewechselt werden können. Andere Geräte sind so starr, daß sie sogar unempfindlich gegen Vibratoren beim Betrieb in flüssigem Stickstoff sind<sup>[42]</sup>, wieder andere sogar klein genug, um durch den Hals einer Heliumkanne zu passen<sup>[43]</sup>. Diese „Kolibris“ unter den RTMs, de-

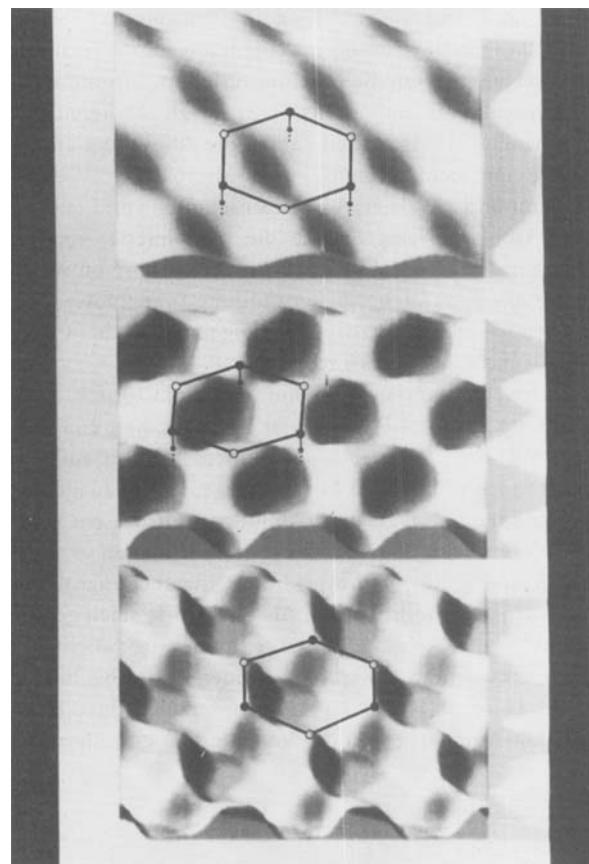


Abb. 7. RTM-Bilder von gespaltenem Graphit. Das obere Bild wurde bei einem konstanten Tunnelstrom von 1 nA und bei 50 mV aufgenommen. Die von der Spitze verfolgte Welligkeit reflektiert die lokale Zustandsdichte (Local Density of States LDOS) an der Fermi-Energie und nicht die Positionen der Atome, die das eingezeichnete flache Bienenwabengitter bilden. Die LDOS an den Atomen, welche zu Nachbarn in der zweiten Lage gebunden sind (offene Kreise), ist niedriger als die an den „freien“ Atomen. Es handelt sich daher eher um ein spektroskopisches als um ein topographisches Bild. Das mittlere Bild ist ein „Strombild“; es zeigt im wesentlichen das gleiche Muster. Im unteren Strombild, das dichter an der Oberfläche aufgenommen wurde, erscheinen die zwei inäquivalenten Kohlenstoffatome jeder Elementarzelle als praktisch gleich. Dieses besondere Verhalten ist in Einklang mit einer unterschiedlichen lokalen elastischen Reaktion der beiden Sorten von Kohlenstoffatomen auf die von der Spitze ausgeübte interatomare Kraft, die die unterschiedlichen lokalen Zustandsdichten kompensiert. Auch eine lokale Störung der elektronischen Struktur könnte eine Rolle spielen.

ren Konzepte zum Teil auf die zusammendrückbaren Tunnelkontakte (Squeezable Tunnel Junctions)<sup>[18]</sup> zurückgehen, können mit Einröhren-Scannern (Single Tube Scanner) auf relativ flachen Oberflächen auch mit Fernsehgeschwindigkeit arbeiten<sup>[43, 44]</sup>. Die Spitzenpräparation ist so weit fortgeschritten, daß im UHV wohldefinierte pyramidenförmige Spitzen hergestellt werden können, die mit einem<sup>[45]</sup> oder mehreren<sup>[46]</sup> Atomen enden. Solche Spitzen sind besonders wichtig für die Untersuchung nichtperiodischer Strukturen, ungeordneter Systeme und rauher Oberflächen. Sie sind auch an sich interessant, z. B. als Punktquellen für niederenergetische Elektronen und Ionen.

Außerhalb der Physik und der Oberflächenwissenschaften scheinen die verschiedenen Möglichkeiten zur Abbildung insbesondere auch in unterschiedlichen Milieus ebenso attraktiv zu sein wie die atomare Auflösung. 1984 wurden erstmals Bilder gezeigt, die bei gewöhnlichem Atmosphärendruck aufgenommen waren<sup>[47]</sup>. Es folgten Abbildungen in verflüssigten Gasen<sup>[48]</sup>, in destilliertem Was-

ser<sup>[48]</sup>, in Salzlösungen<sup>[48]</sup> und in Elektrolyten<sup>[49]</sup>. Rastertunnelpotentiometrie scheint eine interessante Technik geworden zu sein, um die Potentialverteilung stromtragender Mikrostrukturen auf atomarer Skala zu studieren<sup>[50]</sup>. Zu den neueren Fortschritten zählen die Abbildung atomarer Kräfte mit dem Atomic Force Microscope<sup>[51]</sup>, das die Struktur und die elastischen Eigenschaften von Leitern wie auch Isolatoren zeigt, sowie die kombinierte Abbildung elektronischer und elastischer Eigenschaften von weichen Materialien<sup>[52]</sup>. Auch die Verwendung tunnelnder spinpolarisierter Elektronen zur Auflösung magnetischer Oberflächenstrukturen wird erforscht.

Zum Schluß kommen wir auf den Punkt zurück, an dem die Geschichte des RTMs ihren Ursprung hat: eine lokale Untersuchung an einer ausgewählten Position auf einem sehr kleinen räumlichen Maßstab bis hinunter zu atomaren Dimensionen. Neben dem Abbilden eröffnet ein solches Experiment ganz allgemein neue Möglichkeiten sowohl im Hinblick auf die zerstörungsfreie Untersuchung als auch auf die lokale Modifikation. Als Stichworte seien genannt: lokale hohe elektrische Felder, extreme Stromdichten, lokale Deformationen, Messung kleiner Kräfte bis hinab zu denen zwischen einzelnen Atomen, letztlich das „Hantieren“ mit Atomen<sup>[53]</sup> und die Veränderung einzelner Mole-

küle – kurz gesagt, das RTM als Feynman-Maschine<sup>[54]</sup>. Dieses Gebiet steckt noch in den Kinderschuhen.

Die „Lehrjahre“ der Rastertunnelmikroskopie sind zu Ende, die Grundlagen sind vorhanden, und die „Wanderjahre“ beginnen. Wir wollen nicht spekulieren, wohin die Entwicklung führen wird, doch wir glauben fest daran, daß die Schönheit atomarer Strukturen ein Anreiz sein wird, die Technik gerade auf solche Probleme anzuwenden, bei denen sie den größten Nutzen ausschließlich zum Wohl der Menschheit verspricht. Dies war Alfred Nobels Hoffnung, es ist unsere Hoffnung und die Hoffnung aller Menschen.

*Wir möchten all denen danken, die uns auf die eine oder andere Art unterstützt haben, wie auch denen, die selbst zur Entwicklung der Rastertunnelmikroskopie beigetragen haben. Auch ist es uns ein Bedürfnis hervorzuheben, wie sehr wir die angenehme und kollegiale Atmosphäre innerhalb der RTM'-Gemeinde schätzen. Dank gebührt auch Dilys Brüllmann für ihre gewissenhafte Bearbeitung unserer Manuskripte von Anfang an und für das sorgfältige Lesen dieses Manuskripts sowie Erich Stoll für die Bearbeitung der Abbildungen 6 und 7 unter Benutzung der Ideen von R. Voss.*

Eingegangen am 4. Mai 1987 [A 627]  
Übersetzt von Michael Niksch, Krailling

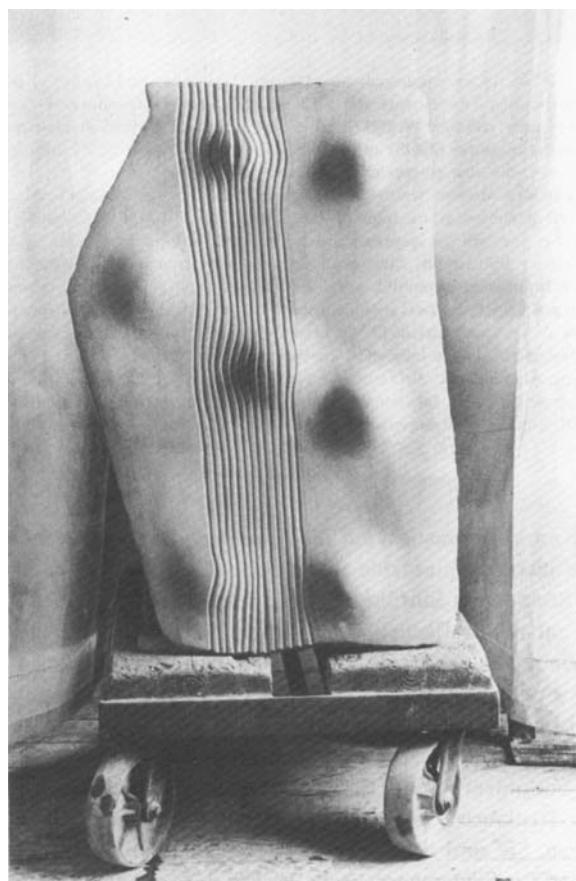


Abb. 8. Kugeln mit den Augen eines Künstlers gesehen. Kunst und Wissenschaft sind Produkte der Kreativität des Menschen, und die Schönheit der Natur spiegelt sich in beiden wider. Der Bildhauer Ruedi Rempfle fand seine Interpretation in der Verformung einer Oberfläche. Ihm faszinierte die Spannung der Kugeln in ihrer Umgebung mehr als die schlichte Darstellung ihrer Form. Es handelt sich um eine unabhängige Schöpfung, deren visuelle und konzeptionelle Ähnlichkeit mit Abbildung 6 verblüffend ist. Originalskulptur von Ruedi Rempfle, Fotografie mit freundlicher Genehmigung von Thomas P. Frey.

- [1] Übersichten: G. Binnig, H. Rohrer, *IBM J. Res. Dev.* 30 (1986) 355; J. A. Golovchenko, *Science (Washington)* 232 (1986) 48; R. J. Behm, W. Hoesler: *Physics and Chemistry of Solid Surfaces*, Vol. VI, Springer, Berlin 1986, S. 361; P. K. Hansma, J. Tersoff, *Appl. Phys.* 61 (1987) R 1; *Proceedings of the STM Workshop in Oberlech, Österreich 1985* (IBM J. Res. Dev. 30 (1986) Nr. 4 und 5); *Proceedings of STM '86 in Santiago de Compostela, Spanien 1986* (*Surf. Sci.* 181 (1987) Nr. 1 und 2); eine Zusammenfassung technischer und biographischer Einzelheiten findet man bei R. L. Dordick, *IBM Res. Mag.* 24 (1986) 2.
- [2] G. K. Binnig, H. E. Hoenig, *Z. Phys. B* 32 (1978) 23.
- [3] H. Rohrer, *Helv. Phys. Acta* 33 (1960) 675.
- [4] I. Giaever, *Rev. Mod. Phys.* 46 (1974) 245.
- [5] W. A. Thompson, S. F. Hanrahan, *Rev. Sci. Instrum.* 47 (1976) 1303.
- [6] B. P. Williamson, *Proc. Inst. Mech. Eng.* 182 (1967) 21; K. H. Guenther, P. G. Wierer, J. M. Bennett, *Appl. Opt.* 23 (1984) 3820.
- [7] R. Young, J. Ward, F. Scire, *Rev. Sci. Instrum.* 43 (1972) 999.
- [8] Technische Einzelheiten: G. Binnig, H. Rohrer, *Helv. Phys. Acta* 55 (1982) 726; *Surf. Sci.* 126 (1983) 236; *Spektrum Wiss.* 1985, Nr. 10, S. 62; *Sci. Am.* 253 (1985) Nr. 8, S. 40.
- [9] O. Marti, *Dissertation*, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich 1986; O. Marti, G. Binnig, H. Rohrer, H. Salemkink, *Surf. Sci.* 181 (1987) 230.
- [10] H. R. Ott, H. Rohrer, unveröffentlicht; S. Vieira, *IBM J. Res. Dev.* 30 (1986) 553.
- [11] U. Poppe, *Verhandl. DPG (VI)* 16 (1981) 476.
- [12] E. C. Teague, *Dissertation*, North Texas State University, TX, USA 1978 (University Microfilms International, Ann Arbor, MI, USA, S. 141); *Bull. Am. Phys. Soc.* 23 (1978) 290; *J. Res. Natl. Bur. Stand. (US)* 91 (1986) 171.
- [13] G. Binnig, H. Rohrer, C. Gerber, E. Weibel, *Physica B (Amsterdam)* 109/110 (1982) 2075.
- [14] G. Binnig, H. Rohrer, C. Gerber, E. Weibel, *Phys. Rev. Lett.* 49 (1982) 57.
- [15] G. Binnig, H. Rohrer, C. Gerber, E. Weibel, *Surf. Sci.* 131 (1983) L379.
- [16] N. M. Miskowsky, P. H. Cutler, T. E. Feuchtwang, S. J. Shepherd, A. A. Lucas, T. E. Sullivan, *Appl. Phys. Lett.* 37 (1980) 189.
- [17] C. F. Quate, *Phys. Today* 39 (1986) Nr. 8, S. 26.
- [18] J. Moreland, S. Alexander, M. Cox, R. Sonnenfeld, P. K. Hansma, *Appl. Phys. Lett.* 43 (1983) 387; Paul Hansma selbst konnte wegen Krankheit nicht am ersten Seminar über RTM in den USA teilnehmen. Seine Studenten jedoch waren dabei, und gemeinsam mit ihnen baute Paul die Squeezable Tunnel Junction.
- [19] G. Binnig, H. Rohrer, C. Gerber, E. Weibel, *Phys. Rev. Lett.* 50 (1983) 120.
- [20] W. A. Harrison, *Surf. Sci.* 55 (1976) 1.
- [21] K. Takayanagi, Y. Tanishiro, M. Takahashi, S. Takahashi, *J. Vac. Sci. Technol. A3* (1985) 1502.
- [22] R. M. Tromp, E. J. van Loenen, *Surf. Sci.* 155 (1985) 441.
- [23] R. M. Tromp, *Surf. Sci.* 155 (1985) 432, zit. Lit.

[24] R. S. Becker, J. A. Golovchenko, E. G. McRae, B. S. Swartzentruber, *Phys. Rev. Lett.* 55 (1985) 2028; R. J. Hamers, R. M. Tromp, J. E. Demuth, *ibid.* 56 (1986) 1972.

[25] J. Tersoff, D. R. Hamann, *Phys. Rev. Lett.* 50 (1983) 1998; A. Baratoff, *Physica B (Amsterdam)* 127 (1984) 143.

[26] N. Garcia, C. Ocal, F. Flores, *Phys. Rev. Lett.* 50 (1983) 2002; E. Stoll, A. Baratoff, A. Selloni, P. Carnevali, *J. Phys. C* 17 (1984) 3073.

[27] G. Binnig, H. Rohrer, C. Gerber, E. Stoll, *Surf. Sci.* 144 (1984) 321.

[28] A. M. Baró, G. Binnig, H. Rohrer, C. Gerber, E. Stoll, A. Baratoff, F. Salvan, *Phys. Rev. Lett.* 52 (1984) 1304.

[29] G. Binnig, H. Fuchs, E. Stoll, *Surf. Sci.* 169 (1986) L295.

[30] G. Binnig, H. Rohrer in J. Janta, J. Pantoflicek (Hrsg.): *Trends in Physics. Vol. 1*, European Physical Society 1984, 38.

[31] A. Baratoff, G. Binnig, H. Fuchs, F. Salvan, E. Stoll, *Surf. Sci.* 168 (1986) 734.

[32] G. Binnig, K. H. Frank, H. Fuchs, N. Garcia, B. Reihl, H. Rohrer, F. Salvan, A. R. Williams, *Phys. Rev. Lett.* 55 (1985) 991; R. Garcia, J. J. Saenz, N. Garcia, *Phys. Rev. B* 33 (1986) 4439.

[33] A. L. de Lozanne, S. A. Elrod, C. F. Quate, *Phys. Rev. Lett.* 54 (1985) 2433.

[34] R. M. Feenstra, A. P. Fein, *Phys. Rev. B* 32 (1985) 1394.

[35] S. A. Elrod, A. Bryant, A. L. de Lozanne, S. Park, D. Smith, C. F. Quate, *IBM J. Res. Dev.* 30 (1986) 387.

[36] R. J. Behm, W. Hoesler, E. Ritter, G. Binnig, *Phys. Rev. Lett.* 56 (1986) 228.

[37] P. K. Hansma, *Bull. Am. Phys. Soc.* 30 (1985) 251.

[38] R. S. Becker, J. A. Golovchenko, B. S. Swartzentruber, *Phys. Rev. Lett.* 54 (1985) 2678.

[39] Konferenzbericht: *IBM J. Res. Dev.* 30 (1986) Nr. 4 und 5.

[40] Übersicht: N. Ernst, G. Ehrlich, *Top. Curr. Phys.* 40 (1986) 75.

[41] C. Gerber, G. Binnig, H. Fuchs, O. Marti, H. Rohrer, *Rev. Sci. Instrum.* 57 (1986) 221.

[42] R. V. Coleman, B. Drake, P. K. Hansma, G. Slough, *Phys. Rev. Lett.* 55 (1985) 394.

[43] D. P. E. Smith, G. Binnig, *Rev. Sci. Instrum.* 57 (1986) 2630.

[44] A. Bryant, D. P. E. Smith, C. F. Quate, *Appl. Phys. Lett.* 48 (1986) 832.

[45] H.-W. Fink, *IBM J. Res. Dev.* 30 (1986) 460.

[46] Y. Kuk, P. J. Silverman, *Appl. Phys. Lett.* 48 (1986) 1597.

[47] A. M. Baró, R. Miranda, J. Alaman, N. Garcia, G. Binnig, H. Rohrer, C. Gerber, J. L. Carrascosa, *Nature (London)* 315 (1985) 253.

[48] R. Sonnenfeld, P. K. Hansma, *Science (Washington)* 232 (1986) 211.

[49] R. Sonnenfeld, B. C. Schardt, *Appl. Phys. Lett.* 49 (1986) 1172.

[50] P. Murali, D. W. Pohl, *Appl. Phys. Lett.* 48 (1986) 514.

[51] G. Binnig, C. F. Quate, C. Gerber, *Phys. Rev. Lett.* 56 (1986) 930.

[52] J. M. Soler, A. M. Baró, N. Garcia, H. Rohrer, *Phys. Rev. Lett.* 57 (1986) 444; U. Dürig, J. K. Gimzewski, D. W. Pohl, *ibid.* 57 (1986) 2403.

[53] R. S. Becker, J. A. Golovchenko, B. S. Swartzentruber, *Nature (London)* 325 (1987) 419.

[54] R. P. Feynman, *Eng. Sci.* 22 (1960) Nr. 2; S. Hameroff, C. Schneiker, A. Scott, P. Jablonka, T. Hensen, D. Sarid, S. Bell, unveröffentlicht.