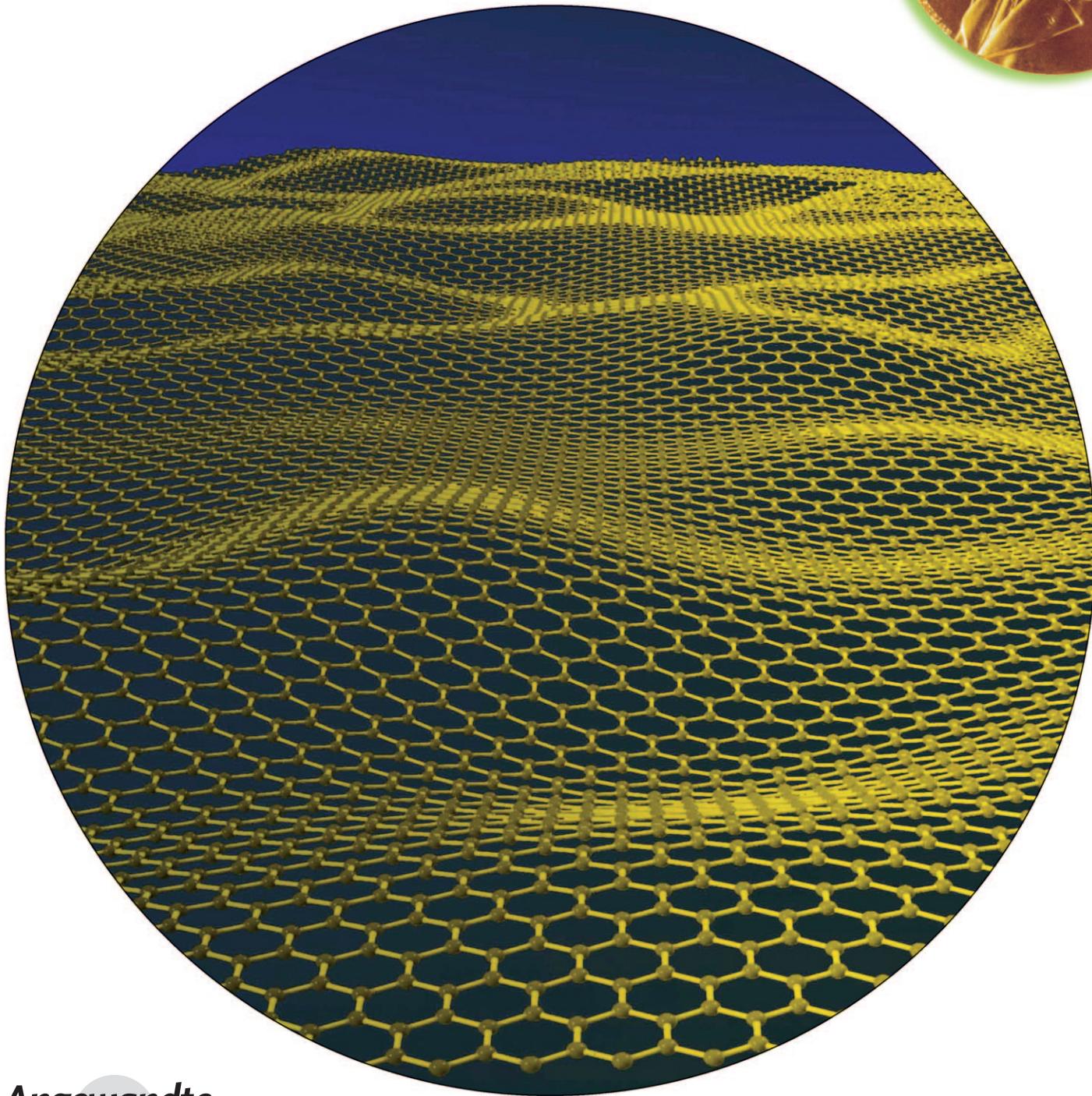
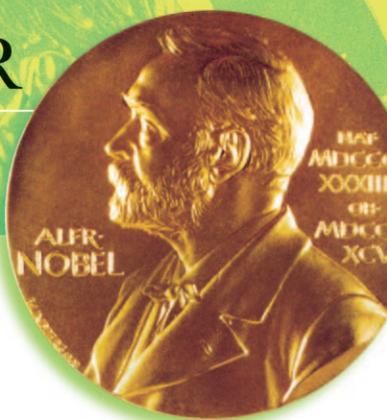


DER NOBELPREIS FÜR PHYSIK 2010



Angewandte
Chemie

Zufallswege zum Graphen (Nobel-Aufsatz)**

Andre K. Geim*

Graphen · Kohlenstoff · Materialwissenschaften ·
Monoschichten · Nobel-Vortrag

Biographie

„I don't think anyone should write their autobiography until after they're dead.“

Samuel Goldwyn

Vor einigen Jahren machte ich mit einer größeren Gruppe von Briten eine Trekking-Tour durch die jordanische Wüste. Wir zelteten, und die freie Zeit abends am Lagerfeuer füllten wir durch Spiele aus. Bei dem populären britischen Spiel „Call my bluff“ stellt ein Mitspieler mehrere Behauptungen auf, von denen nur eine wahr ist, und der Rest der Gruppe muss raten, um welche es sich handelt. Die anderen werden als „Bluff“ bezeichnet. Meine Mitwanderer reizt ich mit Sätzen wie „Ich bin im mediterranen Klima geboren“, „Ich war Leutnant in der Roten Armee“, „Ich habe einen Ig-Nobelpreis gewonnen“, „Ich habe mehrere Fünftausender bestiegen“, „Ich bin ohne Seil in eine 100 m tiefe Spalte gestürzt“, „Mit 32 Jahren bin ich zum ersten Mal 'Russe' genannt worden“, „An der Universität habe ich Interkontinentalraketen studiert“, „Ich war Maurer nördlich des Polarkreises“, „Ich kannte Michail Gorbatschow persönlich“ und so weiter. Zu meiner Überraschung wurden alle Aussagen außer der letzten von den meisten meiner Gruppe als „Bluff“ gewertet. Offensichtlich schien es glaubwürdiger, dass jeder Russe seine politischen Führer persönlich kennt. Wirklich stimmte aber das genaue Gegenteil, weshalb ich auch jedes Spiel gewonnen habe: Alle anderen Aussagen waren wahr, nur Gorbatschow (den ich nur im Fernsehen gesehen habe) kannte ich nicht. Aufgrund dieses Erlebnisses kam ich zum ersten Mal auf den Gedanken, dass mein Leben möglicherweise doch weniger trivial gewesen sei, als ich angenommen hatte.



Andre Geim

Nun bin ich aber, um auf das Epigraph zurückzukommen, noch nicht tot. Eine Autobiographie zu schreiben, halte ich für verfrüht, weil sie den Beigeschmack hat, dass die Lebensgeschichte des Schreibenden bereits beendet sein könnte. Ich bin erst zweiundfünfzig und habe durchaus vor, meine Forschung noch aktiv weiterzuführen. Allerdings bin ich auch (selbstverständlich) ein braver Bürger und habe nun mal nach den Regeln der Nobel-Stiftung eine Autobiographie beizusteuern. Ich werde den hiermit zugewilligten Beitrag eher als literarische Übung betrachten. Wahrscheinlich findet der Leser nach der Lektüre meinen Lebensweg wirklich untypisch, auch wenn die oben angesprochenen Nicht-Bluff-Aussagen nicht weiter vertieft werden. Ich weiß nicht, ob dieses untypische Leben meine Art, an Dinge heranzugehen, beeinflusst hat, oder einfach eine andere Geschichte ist, die nur wenig mit meiner Forschungskarriere zu tun hat.

Die Zeitspanne meiner Autobiographie reicht bis 1987, als ich meinen Doktortitel erhalten habe. Meine nachfolgende wissenschaftliche Biographie wird im Nobel-Vortrag „Zufallswege zum Graphen“ beschrieben.

Sowjetische Taxonomie

Am 21. Oktober 1958 wurde ich als zweiter Sohn von Nina Bayer und Konstantin Geim in Sotschi geboren, einem kleinen Ferienort am Schwarzen Meer. Die ersten sieben Jahre verbrachte ich dort bei meiner Großmutter Maria Ziegler und dem Großvater Nikolai Bayer. An meinen Großvater kann ich mich kaum erinnern, weil er starb, als ich erst sechs war. Meine Großmutter aber war meine beste Freundin und wichtiger Bestandteil meines Lebens, bis ich für das Studium mein Zuhause verließ. Als ich sieben war, stand die Schule an, und obwohl ich eigentlich nicht wollte, musste ich Sotschi verlassen und zu meinen Eltern und meinem älteren Bruder Wladislaw nach Naltschik ziehen, wo beide Eltern arbeiteten. Naltschik ist die Hauptstadt der Teilrepublik Kabardino-Balkarien in den Ausläufern des Kaukasus. Auf der Weltkarte kann man sehen, dass es nahe am höchsten Berg Europas, dem Elbrus, und in enger Nachbarschaft zum berüchtigten Tschetschenien liegt. Während der zehnjährigen Schulzeit

[*] Prof. A. K. Geim

School of Physics & Astronomy, University of Manchester
Oxford Road, Manchester M13 9PL (Großbritannien)
E-Mail: geim@manchester.ac.uk

[**] Copyright© Nobel-Stiftung 2010. Wir danken der Nobel-Stiftung, Stockholm, für die Genehmigung zum Druck einer deutschen Fassung dieses Aufsatzes.

lebte ich in Naltschik, kehrte aber jedes Jahr für die Sommermonate zu meiner Großmutter zurück.

Dies ist wahrscheinlich der richtige Zeitpunkt, um auf meine ethnische Herkunft einzugehen. Für bestimmte Bevölkerungsgruppen in der Sowjetunion war die Ethnie ein sehr bedeutendes Kriterium, das ihre Lebensumstände und letztlich auch ihren Lebensweg bestimmte. Ich gehörte zu einer solchen Bevölkerungsgruppe. Trotz der großen ethnischen Vielfalt unter der sowjetischen Bevölkerung (der offizielle Zensus von 1989 listete über 100 Ethnien) gelang es den Behörden, jeden Einzelnen genau im Auge zu behalten. Zu diesem Zweck gab es einen Spezialeintrag im Pass, nämlich „Zeile 5: Nationalität“. In meinem Pass stand dort „deutsch“. Grund war die Abstammung meines Vaters von den so genannten Wolgadeutschen, Abkömmlingen von deutschen Siedlern, die sich im 18. Jahrhundert an der Unteren Wolga niedergelassen hatten. Auch meine Mutter war größtenteils deutscher Abstammung. Lange habe ich geglaubt, dass meine Großmutter mütterlicherseits Jüdin war, aber jüngste Nachforschungen meines Bruders über die Familiengeschichte haben einen ebenfalls deutschen Vater meiner Großmutter ergeben. Also war nach bestem Wissen und Gewissen das einzige jüdische Familienmitglied meine Urgroßmutter, ansonsten waren von beiden Seiten alle deutsch.

An dieser Stelle sollte ich vielleicht erklären, warum ich so viel Raum für meine Volksgruppenzugehörigkeit aufwende. Zunächst hatte natürlich das Wort „deutsch“ in meinem sowjetischen Pass einen sehr realen Einfluss auf mein Leben, was die weitere Lektüre noch deutlich machen wird. Und zweitens kam die Frage der Ethnie gleich nach der Bekanntgabe des Nobelpreises wieder auf – mit einem Mal wurde heftig diskutiert, ob dieser Preis nun britisch, holländisch, russisch, deutsch oder jüdisch sei. Diese Diskussion finde ich albern. Nachdem ich lange in verschiedenen europäischen Ländern gelebt und gearbeitet habe, halte ich mich selbst für einen Europäer und bin sicher, dass keine weitere Taxonomie notwendig ist, und schon gar nicht in einer derart im Fluss befindlichen Welt wie der Wissenschaft.

Leichen in der alten Truhe

Über meine Familiengeschichte weiß ich nur relativ wenig. Warum das so ist, ist für die westliche Welt vielleicht nicht ganz leicht zu verstehen. Die Gründe reichen bis weit vor meine Geburt zurück. Zu Zeiten von Stalin war es sehr gefährlich, über die Familiengeschichte zu reden, und Geschichten wurden nicht von Generation zu Generation weitergegeben, weil die Eltern ihre Kinder schützen wollten. Beredtes Beispiel sind die vielen Formulare, die ich bei Bewerbungen für die Universität, für einen Job usw. auszufüllen hatte. Immer war bei diesen Formularen auch ein Fragebogen, auf dem nach Verwandten im Ausland gefragt wurde oder ob Angehörige in Arbeitslagern (den berüchtigten Gulags) oder Kriegsgefangene gewesen waren. Auf diese Fragen antwortete ich jedesmal und reinen Gewissens „nein“, weil ich von der Richtigkeit dieser Angabe überzeugt war. Erst Ende der 1980er habe ich erfahren, dass fast jeder in meiner Familie, Vater und Großvater eingeschlossen, viele Jahre im Gulag verbracht hatte, dass einige Familienmitglieder in deutschen Konzentrationslagern waren und dass ich

einen Onkel in Bayern hatte. Dies war absichtlich und erfolgreich die ersten 30 Lebensjahre vor mir verborgen geblieben worden.

Nun folgt, was ich seitdem von meinen wenigen lebenden Verwandten erfahren habe. Mein Großvater Nikolai Bayer war als Professor an der Universität Charkiw spezialisiert auf Luftkartografie. 1946 fand die Sowjetarmee im Nachkriegspolen Dokumente, denen zufolge mein Großvater nach dem Ersten Weltkrieg beigeordneter Minister in der kurzlebigen nationalistischen ukrainischen Regierung von Petliura gewesen war. Zusammen mit seiner deutschen Herkunft und der Tatsache, dass er Karten von Ostsibirien erstellte, reichte diese antibolschewikische Vergangenheit offenbar aus, ihn der Weitergabe von Staatsgeheimnissen an die Japaner anzuklagen. Er wurde in ein Gulag im Norden nahe der Stadt Workuta gesteckt und erst 1953, nach Stalins Tod, wieder freigelassen.

Zum Zeitpunkt meiner Geburt war mein Vater achtundvierzig Jahre alt und hatte ebenfalls schon eine langes und schwieriges Leben hinter sich. Es brauchte viele Jahre, ihm seine Lebensgeschichte Stück für Stück zu entlocken. Bis in seine letzten Jahre vermied er es, darüber zu sprechen, selbst wenn ich ihn fragte, und die Bruchstücke, von denen er berichtete, kamen meistens nur zufällig ans Licht. Vor dem Zweiten Weltkrieg war er ein junger Professor an der staatlichen Universität von Saratow und gab Vorlesungen in Physik und Mathematik. Mit Ausbruch des Kriegs in Europa wurde jedoch die Tatsache, ethnischer Deutscher zu sein, zur politischen Straftat, und man schickte ihn in ein Gulag in Sibirien. Dort baute er viele Jahre lang ein Wasserkraftwerk und eine Eisenbahnlinie. 1949 gestattete man ihm, zu seiner Familie zurückzukehren, die in der Zwischenzeit nach Nowosibirsk deportiert worden war.

Eine Geschichte, die mir seit früher Kindheit lebhaft in Erinnerung geblieben ist, ist die Entdeckung einer Kiste mit alten Orden. Ich fand das Kästchen am Boden einer Truhe, die meine Großeltern in ihrem Gartenhäuschen in Sotschi versteckt hatten. Einer dieser Orden war der Orden des Heiligen Georg, eine hohe militärische Auszeichnung im Russischen Reich (vor der Revolution). Ich zeigte die Entdeckung meiner Großmutter, die, direkt damit konfrontiert, mir erläuterte, dass das Kreuz ihrem Vater gehört hatte, der im Ersten Weltkrieg Militärarzt gewesen war. Andere Auszeichnungen bezogen sich auf den Adelsstand ihres Großvaters, der aus einer deutschen Aristokratenfamilie stammte. Die Familie meiner Großmutter lebte im 19. Jahrhundert in Polen (später Teil des Russischen Reiches) und war am Aufstand von 1963 beteiligt, weshalb sie dann nach Sibirien deportiert wurde, ein Ort, der meinen nächsten Verwandten im folgenden Jahrhundert noch sehr vertraut werden sollte. Als ich das nächste Mal versuchte, die Orden zu finden, waren sie längst weg. Erst viele Jahre später habe ich erfahren, dass meine Großmutter Maria sie alle direkt nach dem Erlebnis weggeworfen hatte. Für uns klingt das heute unfassbar, aber eine solche Verhaltensweise hat sich in die DNA derjenigen eingearbeitet, die unter dem Stalinschen Terror gelebt haben. Meine Großmutter fürchtete, dass ich meinen Freunden von den Orden erzählen würde und dadurch die ganze Familie in ernsthafte Schwierigkeiten bringen könnte. Diese Geschehnisse fielen bereits in die Zeit von Chruschtschow, als der

Terror schon abflaute, aber noch bis in die 1990er galten Erinnerungen an die „Bourgeoisie“ als inakzeptabel für „das Proletariat“.

Als ich mit der Schule begann, war die Mentalität der Stalinschen Zeiten schon weitgehend aus dem sowjetischen System gewichen. Abgesehen von manchen Überbleibseln, wie etwa dem Eintrag der „Nationalität“ und den Fragebogen über die Familie, war der jüngst vergangene Terror jungen Leuten wie mir kaum präsent. Das einzige Mal, dass ich wirklich wegen meiner ethnischen Herkunft zu leiden hatte, war der Moment, als ich versuchte, an eine Top-Universität zu kommen (wie ich später genauer erläutern werde). Ansonsten wurde ich nur manchmal auf dem Spielplatz „Faschist“ oder „verdammter Jude“ („ЖИД“) genannt, denn ein ausländischer Name wurde oftmals mit einer jüdischen Herkunft in Verbindung gebracht (das Wort ЖИД klingt auf russisch sehr beleidigend). Vielleicht wegen letzterer Bezeichnung liegt mir besonders viel daran, zu betonen, dass ein kleiner Teil meines Blutes wahrscheinlich jüdisch ist.

Schule wie gehabt

Ungeachtet der düsteren Familiengeschichte hatte ich das Glück, spät geboren zu sein, und verlebte eine glückliche Kindheit. Meine schönsten Kindheitserinnerungen sind mit meinem Geburtsort Sotschi verbunden. Weil meine Großmutter Maria Meteorologin war, verbrachte ich meine ersten Lebensjahre am Strand, in der Nähe ihrer Wetterstation. Meine Mutter war Leiterin der Qualitätskontrolle und mein Vater Chefingenieur in einer sehr großen Fabrik für Vakuumelektronik. Noch zwanzig Jahre später erinnerten sich viele Naltschiker an ihn als einen hart arbeitenden und einflussreichen Mann. Beharrlichkeit und die Befähigung zu harter Arbeit habe ich möglicherweise von ihm geerbt. Aufgrund ihrer Beschäftigung waren meine Eltern in der oberen Technokratenschicht der Sowjetunion angesiedelt. Der kommunistischen Parteielite, die sämtliche Vergünstigungen des Sowjetsystems genoss, gehörten sie allerdings nicht an; wahrscheinlich war ihnen als ethnischen Deutschen eine solche Zugehörigkeit auch grundsätzlich verwehrt. Dennoch ermöglichte ihr Status der Familie eine relativ angenehme Existenz.

Meine Naltschiker Schule nannte sich Englisch-spezialisiert und galt als die beste der Stadt. Trotz ihres Namens gehörte der Englischunterricht allerdings nicht zu ihren Stärken. Wenn ich im Rückblick die Art und Weise des Englischlernens damals mit meinem Holländischunterricht 30 Jahre später vergleiche, scheint mir die Englischspezialisierung meiner alten Schule lächerlich. Andererseits wurde Mathematik auf einem extrem hohen Niveau gelehrt, besonders in der Oberstufe, was vor allem unserer Mathematiklehrerin Walenida Sednewa zu verdanken ist. Wahrscheinlich war mir damals die Qualität gar nicht aufgefallen, aber als ich mir viele Jahre später als Student an einer Eliteuniversität meine alten Prüfungsarbeiten wieder ansah, war ich von deren hohem Anspruch sehr beeindruckt. Einige davon forderten nicht nur die Wiedergabe des Gelernten, sondern auch Vorstellungskraft und die Fähigkeit, um die Ecke zu denken. Auch Physik und Chemie wurden auf hohem Niveau gelehrt. Einmal gewann ich eine regionale Chemie-

Olympiade, aber dies lag weniger an meiner Liebe zu diesem Fach, sondern daran, dass ich in wenigen Tagen ein etwa tausend Seiten langes Chemiebuch auswendig lernte (und völlig glücklich nur Tage später wieder vergaß).

In sehr freundlicher Erinnerung habe ich auch Olga Peschkowa, unsere Russisch- und Literaturlehrerin. Trotz ausgezeichneter Noten war ich in keinem ihrer Fächer übermäßig gut. Dennoch bin ich mir ziemlich sicher, dass ich durch ihren Unterricht – letztlich – gelernt habe, wie man Forschungsbeiträge klar und präzise formuliert. Sonst ist über meine Schulzeit nichts Besonderes zu berichten, außer der gehirnwashenden Sowjetpropaganda, die zu der Zeit in jeden Aspekt des Lebens hineindrang. Um ihr ein Gegengewicht zu verleihen, hörten wir Schulkinder häufig Radioprogramme wie „Voice of America“ und Ähnliches. Schon diese kleine Rebellion reichte aus, um eine gesunde Skepsis gegenüber manchen (wenn auch nicht allen) Aussagen der Propaganda zu entwickeln. Wie jeder andere um mich herum, spielte ich aber natürlich auch die Pflichtrolle eines braven sowjetischen Schülers.

Scheitern an der ersten Hürde

Mit 16 Jahren beendete ich die Schule mit einer Goldmedaille. Eine solche Auszeichnung erhielten all jene, die sämtliche Fächer perfekt abgeschlossen hatten (üblicherweise die oberen 5%). Meine Eltern ermutigten mich, zur besten Universität zu gehen, sodass ich mein Augenmerk auf einige wenige Eliteuniversitäten in Moskau richtete. In allen exakten Wissenschaften war ich in der Schule gut gewesen, auch in Physik und Chemie, mein bestes Fach aber war Mathematik. Von der reinen Mathematik rieten mir meine Eltern jedoch wegen schlechter Karriereperspektiven ab. Daher entschied ich mich für Physik. An oberster Stelle für Physik in Russland stand (und steht noch) das Moskauer Institut für Physik und Technologie (Phystech). Allerdings war diese Universität für extrem schwere und höchst kompetitive Eingangsprüfungen berüchtigt, die ich, mit meiner Provinzherkunft, nicht meistern zu können glaubte. Daher entschloss ich mich für eine andere führende Universität, das Moskauer Institut für Ingenieurwesen und Physik (MIFI). Zur Vorbereitung löste ich Probeaufgaben von MIFI- und Phystech-Examina und fühlte mich schließlich bereit, wenngleich noch nicht absolut sicher. Wie wenig Ahnung hatte ich davon, dass mein Haupthindernis meine Ethnie darstellen sollte.

Die erste Prüfung für das MIFI war eine Mathematik-klausur. Ich war mir ziemlich sicher, dass ich alle Aufgaben korrekt gelöst hatte und deshalb ein „Ausgezeichnet“ erwarten durfte (das Notensystem an russischen Schulen und Universitäten hat vier Abstufungen: „Ausgezeichnet“, „Gut“, „Befriedigend“ und „Nicht bestanden“). Im Ergebnis erhielt ich aber dann nur ein „Befriedigend“ und, noch schlimmer, die mündliche Mathematikprüfung hatte ich nicht bestanden. Dies lag, wie ich glaubte, an schlechter Vorbereitung und meiner noch geringen Erfahrung in realen Prüfungssituationen: Die Aufgabenstellungen in der mündlichen Prüfung empfand ich als viel härter als diejenigen in den MIFI-Probeprüfungen, die ich daheim durchgenommen hatte. Ich entschied also, nach Hause zu gehen, weiter zu lernen und es nächstes Jahr wieder zu versuchen.

Dieses Lückenjahr erwies sich für mich letztlich als sehr wichtig. Meine Eltern, die mich unterstützten, besorgten mir einen Job als verantwortlicher Techniker für die Kalibrierung von Messinstrumenten in ihrer Fabrik. Auch finanzierten sie mir Tutorien in Mathematik, Physik und russischer Literatur (allesamt Standard-Eingangsprüfungen für meine Wunschuniversitäten). Schon nach ein paar Wochen merkte ich, dass ich in Mathematik besser war als mein Tutor (der als der beste der Stadt galt), sodass wir diese Tutorien einstellten. Demgegenüber waren die Physiktutorien so, wie ich sie mir nicht besser hätte wünschen können. Mein Tutor, Valery Petrosian, war Physikprofessor an der Universität von Naltschik, und ich genoss bei ihm jede Stunde von Anfang bis Ende. Viele frühere Prüfungsaufgaben vom Phystech oder, noch anspruchsvoller, von internationalen Olympiaden lösten wir, aber als wichtigstes Hilfsmittel brachte er mir bei, wie man grundsätzlich physikalische Probleme angehen soll: Eine Aufgabe löst man viel leichter, wenn man zuerst über mögliche Antworten nachdenkt. Die meisten Aufgaben auf Phystech-Niveau erfordern das Verständnis von mehr als einem Gebiet der Physik und eine Vorgehensweise in mehreren logischen Schritten. So können zum Beispiel bei einem fünfstufigen Lösungsweg die möglichen Ansätze dazu rasch ins Bodenlose ausufern, und bis zur endgültigen Antwort sind unter Umständen viele Versuche nötig. Geht man jedoch die gleiche Aufgabe von verschiedenen Seiten an und denkt sich gleich zwei oder drei plausible Antworten dafür aus, reduzieren sich sowohl die möglichen Ansatzwege als auch die logischen Schritte erheblich. Dies ist die Art, in der ich damals zu denken gelernt habe, und immer noch gehe ich nach diesem Ansatz in der täglichen Forschung vor: Ich versuche, mir alle logischen Schritte zwischen dem, was ich habe, und dem, was meiner Meinung nach das Endergebnis eines Projekts sein kann, zu konstruieren. Schon ein paar Monate nach Tutorienbeginn bat mich mein Tutor, nicht länger die Lösung aufzuschreiben. Stattdessen begann ich die Vorgehensweise für eine bestimmte Aufgabe verbal darzustellen – ich erläuterte sämtliche für die Lösung nötigen logischen Schritte, ohne aber auf Routinedetails näher einzugehen. Jetzt waren wir in der Lage, die Aufgaben in Blitzgeschwindigkeit durchzugehen.

Auch von meinen Tutorien in russischer Literatur nahm ich wichtige Erkenntnisse mit. Zwar schrieb ich gut, wie mir meine Tutorin versicherte, aber aus meinen Essays gehe klar hervor, dass ich mich bloß an die Gedanken und Ideen von berühmten Autoren zu erinnern versuche und diese wiederhole. Meinem eigenen Urteil traue ich nicht, weil ich Angst habe, dass meine eigenen Gedanken nicht ausreichend interessant, wichtig oder richtig seien. Sie gab mir den Rat zu versuchen, meine eigene Meinung und Gedanken auszudrücken und andere Quellen nur gelegentlich zu verwenden, um meinen Aussagen mehr Gewicht zu verleihen. Dieser ganz einfache Rat war für mich entscheidend – er führte zur Änderung meines Schreibstils. Jahre später fiel mir auf, dass ich meine Gedanken und Ideen schriftlich besser ausdrücken und erklären konnte als meine Mitstudenten.

Staatsfeind

Nach diesem Jahr intensiver Vorbereitung fühlte ich mich wesentlich sicherer als im Jahr davor; ich war überzeugt davon, genug zu wissen, und bereit für das MIFI. Alle Aufgaben der Mathematikklausur (die wiederum zuerst kam) löste ich dann auch mit Leichtigkeit, und nachdem ich der Präsentation noch den letzten Schliff gegeben hatte, erwartete ich, ein „Ausgezeichnet“ zu erhalten. Bei der nächsten Prüfung (Mathematik mündlich) teilte man mir jedoch mit, dass ich nur ein „Gut“ bekommen hatte. Der Prüfer weigerte sich, mir Fehler zu nennen oder mir das Skript zu zeigen, und das, obwohl es direkt vor ihm lag. Er stellte mir drei weitere Mathematikaufgaben, die schwersten, die ich je gesehen habe. Die erste gelang es mir zu lösen, die zweite löste ich teilweise mit einem kleinen Fehler und gab für die dritte die korrekte Antwort. Wie ich auf diese Antwort gekommen bin, konnte ich jedoch nicht erklären. Sie war plötzlich in meinem Kopf, und ich weiß sie heute noch: 998. Für meine Mühen erhielt ich ein „Befriedigend“, was ganz klar nicht für den Zugang zur Universität ausreichte. Zusätzlich zu der eher rüden Behandlung durch den Prüfer fiel mir noch eine weitere Seltsamkeit bei dieser Prüfung auf: Außer mir erreichte nicht ein Einziger in diesem Raum (etwa 20 Kandidaten) auch nur ein „Befriedigend“; alle waren durchgefallen. Noch seltsamer war, dass sie sämtlich entweder jüdisch – oder ausländisch – klingende Namen hatten. Ich habe dann einen Blick auf die Liste der Prüflinge in den anderen Räumen werfen können, die in der Mehrzahl – von einigen Ausnahmen abgesehen – nur russisch klingende Namen hatten.

Selbst jemandem so Unbedarften wie mir im Alter von 17 musste nun klar sein, dass hier eine bestimmte Politik verfolgt wurde, nämlich gewisse ethnische Minderheiten durchfallen zu lassen. Im Rückblick lässt sich dies sogar leicht erklären, denn an der Universität wurde als Spezialgebiet Kernphysik gelehrt. Als Jude oder Deutscher galt man zur damaligen Zeit als möglicher Emigrant, der ins Ausland gehen könnte, nachdem er „Staatsgeheimnisse“ erfahren hatte, was die Sowjetunion als ständige Bedrohung empfand. In gewissem Sinne gab es also eindeutig eine – sogar verständliche – Hauspolitik, von der aber nicht offen gesprochen wurde. Jahre später fand ich heraus, dass durchaus einige Juden am MIFI zugelassen worden waren und auch erfolgreich absolviert hatten. Um dies zu erreichen, hatten aber ihre Eltern bei KGB-Vertretern (die in jeder Sowjet-Organisation in den so genannten „Ersten Abteilungen“ zu finden waren) vorstellig werden und sie davon überzeugen müssen, dass ihre Kinder rechtschaffene sowjetische Bürger waren, ohne die Absicht, das Land zu verlassen. Diese Taktik war offensichtlich erfolgreich, allerdings waren weder ich noch meine Eltern auf den leisensten Gedanken gekommen, dass so etwas nötig sein könnte – oder aber meine Eltern wussten nur zu genau über die Unwahrheiten in meinen Familienfragebögen Bescheid.

Zufallsphysiker

Dies war das erste Mal, dass ich auf offizieller Ebene Diskriminierung erfuhr, und es war ein ziemlicher Schock. Zum großen Glück hatte ich noch eine Woche Zeit, um es an einer anderen Universität zu versuchen. „Was soll's“, sagte ich mir und bewarb mich beim Phystech. Die Behandlung

dort war schon allein ein Schock, so vollkommen anders war sie als beim MIFI. Die Prüfer waren freundlich und hilfsbereit, die Prüfungsaufgaben interessant, und die gesamte Umgebung war einladend. Ich fühlte mich, als ob mich jemand aus Versehen in den falschen Raum gesteckt hätte, weg vom Erschießungskommando der Prüfer. Und vielleicht war es ja auch wirklich so.

Meine Prüfungsnoten lagen bequem über dem für die Zulassung geforderten Mindestmaß, obwohl ich in vier Prüfungen nur ein einziges „Ausgezeichnet“ erhalten hatte, für den Rest „Gut“. Wahrscheinlich hätte ich, wie ich annehme, besser abschneiden können, aber das MIFI-Erlebnis lag erst kurz zurück, und die aufflackernden Erinnerungen an die nicht bestandenen Prüfungen beeinträchtigten meine Konzentration und trübten wohl auch manchmal meine Einschätzung des tatsächlichen Schwierigkeitsgrads der Aufgabe. Besonders deutlich war dies in meiner mündlichen Physikprüfung, an die ich mich noch gut erinnere. Die erste Aufgabe erschien mir einfach, und ich löste sie schnell, aber der Prüfer sagte: „Das ist eine falsche Antwort“. Ich versuchte zu protestieren, und erst Minuten später habe ich verstanden, dass ich ein weit schwierigeres Problem als das mir vorliegende gelöst habe: Auch wenn die Antwort auf die von mir vermutete Fragestellung richtig war, war die eigentliche Aufgabe falsch gelöst. Unglaublicherweise passierte dies mir wieder bei der zweiten Aufgabe. Mit Vorlegen der dritten Aufgabe fragte deshalb der Prüfer mehrmals nach, ob ich auch wirklich sicher sei, die Aufgabenstellung richtig verstanden zu haben.

Die letzte Zulassungshürde am Phystech war ein Aufnahmegespräch, von dem ich befürchtete, dass die Frage nach meiner Ethnie wieder hochkommen und man mich trotz der guten Noten nicht nehmen würde. Alle wussten, dass nach dem Gespräch manchmal Kandidaten mit etwas schlechteren als den verlangten Noten genommen, andere mit besseren hingegen abgelehnt wurden. Die Ethnienfrage kam dann in der Form: „Wie gut ist Ihr Deutsch?“. Ich antwortete „fast nicht vorhanden“ und begann zu überlegen, was ich noch sagen könnte. An dieser Stelle unterbrach ein Kommissionsmitglied (Seva Gantmacher, wie im Gantmacher-Effekt) mit den Worten: „Dann ist er kein echter Deutscher“. Durch diese Bemerkung und seine folgenden Interventionen während des Gesprächs sollte er, wie sich herausstellte, auf mein ganzes weiteres Leben einwirken, da er mich zur Festkörperphysik brachte.

Wie viele Möchtegernstudenten in dem Alter träumte ich von Astrophysik oder Teilchenphysik und wünschte mir nichts sehnlicher, als „die letzten Rätsel des Universums“ zu lösen. Allerdings ging unter den Phystech-Kandidaten das Gerücht um, dass man, wenn man so etwas sagte, bei den Fragestellern als sehr naiv abgetan wurde. Daran musste ich denken, aber ich wollte auch nicht absichtlich etwas Falsches sagen. Als man mich also über meine Vorstellungen befragte, sagte ich, dass ich Neutronensterne erforschen wollte (wahr), weil ich verstehen wollte, wie sich Materie bei extrem hoher Dichte verhält (eine Ausrede, um nicht so naiv zu klingen). Sofort kam von Seva die Erwiderung: „Gut, dann können Sie an unserem Institut (für Festkörperphysik) Hochdruckphysik studieren“.

Noch eine weitere Erinnerung habe ich an dieses Aufnahmegespräch: Ich sollte das Gewicht der Erdatmosphäre abschätzen (es war üblich, den Kandidaten ein paar verzwickte Denkaufgaben zu stellen). Den größten Teil meiner drei Minuten verbrachte ich damit, in meinem Kopf Zahlen zu multiplizieren (Atmosphärendruck mal Erdoberfläche geteilt durch die Schwerkraft, alles in SI-Einheiten). Über meine Antwort in Billionen von Billionen kg waren alle überrascht, denn ich sollte eigentlich nur allgemein bleiben, ohne genauere Zahlenangabe.

Auf diese Weise kam ich zum Phystech. Letztlich erwies sich also meine Ablehnung durch das MIFI als ein Segen, denn das Phystech war eine um noch zwei Nummern bessere Universität. Der einzige Grund, warum ich nicht dorthin zuerst gegangen war, war mein mangelndes Vertrauen in mich selbst, die Aufnahmeprüfung zu bestehen. Im Grunde zwangen mir also die Umstände die erste Wahl auf, nicht die zweite!

Mutter allen Drills

Das Phystech ragt nicht nur in Russland, wo es als Crème de la Crème gehandelt wird, heraus – es sticht jede Universität aus, die ich sonst kennengelernt habe. Der einzige Grund, warum es in keinen Weltranglisten zu finden ist, besteht in seiner Spezialisierung als reiner Lehruniversität. (In Russland sind Lehre und Forschung traditionell getrennt – die Forschung bestreiten hauptsächlich die Akademien der Wissenschaften, während an den Universitäten gelehrt wird.) Ein wohlbekannter Grund für die hohe Qualität des Phystech – neben der sehr rigorosen Auswahl der Studenten – war, dass dort, anders als sonst an sowjetischen Universitäten üblich, praktizierende Wissenschaftler aus der ganzen Moskauer Region die Vertiefungskurse und auch manche Grundkurse abhielten. Sicher ist es im Westen Standard, dass aktive Forscher Kurse für Vorexamensstudenten anbieten, aber in Russland ist es eine Ausnahme.

Noch wichtiger war, dass wir als Phystech-Studenten zum Denken gezwungen wurden; in allem, was wir studierten, sollten wir die innewohnende Logik finden und nicht einfach Fakten und Formeln lernen. Zum großen Teil war dies dem Prüfungsstil geschuldet: In den Vertiefungsfächern waren in vielen unserer jährlichen Abschlussprüfungen Bücher zum Nachschlagen erlaubt. Daher brauchten wir keine Formeln zu lernen, solange wir wussten, wo sie zu finden waren. Stattdessen waren die Aufgaben anspruchsvoll und erforderten meistens die Kombination mehrerer Fachgebiete, wodurch wir lernten, die Wissenschaft wirklich zu verstehen und nicht nur auswendigzulernen.

Seit seiner Gründung ist das Phystech von prominenten sowjetischen Wissenschaftlern wie Kapiza, Landau und vielen anderen geführt worden. Auch unter meinen Dozenten und Prüfern waren viele herausragende Wissenschaftler wie Emmanuel Rashba, Wladimir Pokrowski, Viktor Lidskij, Spartak Belyaev, Lew Pitajevski, Isaak Chalatnikow und Lew Gorkow, um nur einige zu nennen. Allerdings sagten mir diese Namen damals nicht sehr viel, wie ich zugeben muss, denn ich war kein großer Vorlesungsbesucher. Manche der Namen habe ich erst vor Kurzem wiederentdeckt – als Unterschrift auf meinen alten Prüfungszertifikaten, die das

Phystech nach der Bekanntgabe des Nobelpreises ins Internet gestellt hat.

Das Arbeitspensum am Phystech war enorm, und die Kurse waren extrem anspruchsvoll. Das lässt sich schon daran ablesen, dass unsere Standard-Lehrbücher in Quantenmechanik, statistischer Physik, Elektrodynamik und klassischer Mechanik aus dem Kurs für theoretische Physik von Landau-Lifschitz stammten. Vielleicht waren es nicht die allerbesten Lehrbücher für Vorexamens-Studenten, aber sie sind bezeichnend für das von uns erwartete Niveau. Dieser Lehrstil brachte einen hohen psychischen Druck mit sich, dem nicht alle Studenten gewachsen waren. Nicht nur wegen schlechter Noten, sondern vor allem aufgrund von Nervenzusammenbrüchen verließen manche von uns die Universität wieder. Ich selbst kannte mehrere Kommilitonen, die selbstmordgefährdet waren und mit psychischen Problemen zu kämpfen hatten. Mich dagegen mag der Alkohol gerettet haben, den einige Freunde und ich nach jeder Prüfung reichlich konsumierten, um den aufgestauten Stress abzubauen.

Insbesondere die ersten zweieinhalb Jahre Grundkurse waren hart. Mit Beginn der Vertiefungskurse ließ der Druck dann nach. Ab dem dritten Jahr besuchten wir Vorlesungen an den so genannten Basisinstituten der Akademie der Wissenschaften. Meines war das Institut für Festkörperphysik in Tschernogolowka, so wie es entsprechend meiner Liebe zu hochdichten Neutronensternen in meinem Aufnahmegespräch festgelegt worden war. Ab dem fünften Jahr arbeiteten wir auch in Forschungslaboren mit – nicht an speziell für Vorexamensstudenten zugeschnittenen Projekten, sondern als Teil eines akademischen Forschungsteams an echten, laufenden Projekten. Das sechste Jahr war das Jahr der Masterarbeit und 100% forschungsorientiert. Danach ging es normalerweise (sofern man eine akademische Laufbahn einschlagen wollte) mit einer zweijährigen Probezeit als Forscher weiter. Bei Erfolg hatte man sich für ein Doktorat qualifiziert, das erneut drei Jahre dauern sollte. Insgesamt brauchte es elf Jahre bis zur Promotion – sechs Jahre am Phystech plus fünf Jahre bis zur Doktorprüfung.

Ich persönlich empfand nur das erste halbe Jahr am Phystech als ernsthaft schwierig. Mit meiner Herkunft aus einer Provinzstadt fand ich mich neben Kommilitonen wieder, die zum Teil Moskauer Eliteschulen für Physik und Mathematik besucht hatten. Manche hatten internationale Physik- oder Mathematik-Olympiaden gewonnen. Die ersten Monate an der Universität waren darauf ausgelegt, jeden auf das Niveau dieser Leute zu bringen, die dem Rest von uns in den formalen Fächern, insbesondere Mathematik, um fast ein Jahr voraus waren. Erst als ich in der ersten Runde der Halbjahresprüfungen überall mit Bestnoten abgeschnitten hatte, begann ich mich in dieser Wunderkind-Umgebung so sicher zu fühlen, dass ich etwas entspannen konnte. Trotz allenfordernden Drills hat jeder von uns Phystech-Absolventen diese harten Jahre in großartiger Erinnerung und ist sehr stolz auf unsere Alma Mater.

Mit dem Strom schwimmen auf höchstem Niveau

Am Phystech habe ich mit einem so genannten „roten Diplom“ abgeschlossen, das heißt, ich war unter den besten 5 bis 10 % meiner Klasse. Nur für zwei der um die 50 Ab-

schlussprüfungen erhielt ich ein „Gut“. Eine davon war „Politische Ökonomie des Sozialismus“, was ich, ohne sonderlich rot zu werden, mit meiner Unfähigkeit erklärte, irgendeine Logik in dem Fach zu finden. Dagegen erhielt ich ein „Ausgezeichnet“ für „Politische Ökonomie des Kapitalismus“, und gerne erinnere ich mich auch heute noch an *Das Kapital* von Karl Marx. Um meine westlichen Kollegen zu ärgern (oder zu schockieren), zitiere ich manchmal daraus. Mein zweites „Gut“ gab es für den Kurs über Supraleitung, gehalten von Lew Gorkow höchstselbst, der auch mein Prüfer war. Ungewöhnlich für das Phystech, gestattete er uns in der Prüfung keine Lehrbücher (Schande über ihn), und in einer der Ableitungen machte ich einen Fehler. Das amüsiert mich heute noch, weil ich später als Professor in den Niederlanden in den 1990ern die Supraleitung für mich als Forschungsgebiet ausgewählt habe.

Trotz meines sehr guten Examens habe ich mich, wie ich glaube, unter meinen Klassenkameraden gar nicht besonders hervorgehoben. Ein oder zwei Kommilitonen meines Jahrgangs erhielten nur „Ausgezeichnet“, und manche sind tiefer in die Materie eingedrungen und haben die Kurse besser verstanden als ich. Wirklich alles gegeben habe ich damals noch nicht; ich strengte mich nur soweit an, dass ich mir selbst bestmögliche Noten garantieren und weiter unter den Besten der Klasse bleiben konnte. Damit hatte ich Erfolg, ohne dabei meine ganze Zeit oder vollen Einsatz zu investieren. Tatsächlich war ich in der ganzen Universitätszeit alles andere als ein Vorzeigestudent. Eigentlich stand mir wegen der sehr guten Noten jedes halbe Jahr ein Stipendium zu, aber mit ziemlicher Regelmäßigkeit (vier oder fünf Mal) wurde es mir wegen versäumter Pflichtvorlesungen, zu späten Erscheinens nach den Ferien, der Veranstaltung von Nachprüfungsfeiern, bei denen zum Teil Leute im Krankenhaus endeten, und ähnlichen Verfehlungen wieder entzogen. Vorlesungen zu versäumen (außer in einem politischen Fach) war erlaubt, und ich schaffte es, in fast keiner zu erscheinen. Stattdessen lernte ich aus Lehrbüchern und nahm an Tutorien teil – außer ich mochte den Tutor nicht. Ehrgeizigen Studenten würde ich dieses Lernverhalten nicht als Erfolgsrezept empfehlen – für einige mag es aber durchaus das Richtige sein, so wie für mich und ein paar meiner Klassenkameraden.

Diese Einstellung, zum Erreichen eines bestimmten Ziels nur das zu tun, was nötig war, begleitete mich durch die ganze Universität und Doktorarbeit. Erst viel später, als unabhängiger Forscher, habe ich wirklich begonnen, Spaß an der Physik zu haben und um der Sache willen mein Bestes zu geben.

Vom Erhabenen zum Lächerlichen

Thema meiner Masterarbeit waren die elektronischen Eigenschaften von Metallen, die ich in ultrareinen Indiumkugeln durch Anregung von elektromagnetischen Wellen (so genannten Helikononen) untersuchte. Deren Resonanzen gaben mir Informationen über den spezifischen Widerstand. Mein Vorteil bei dieser Forschung war, dass ich extrem reines Indium verwendete, um die Elektronen bei tiefen Temperaturen über Distanzen hindurchzuschießen, die etwa dem Probendurchmesser (ca. 1 cm) entsprachen. Nach dem Masterabschluss begann ich, wie bei Phystech-Graduierten

üblich, meine Doktorarbeit im gleichen Labor. Im Rückblick kommen mir die folgenden fünf Jahre bis zur Promotion in Bezug auf meine wissenschaftliche Tätigkeit bemerkenswert unspektakulär vor.

Mein erstes Jahr während der Doktorarbeit war von einem Ereignis geprägt, das später meinen Lebensrhythmus noch regelmäßig unterbrechen sollte: dem Umzug von einem Institut in ein anderes. Mein Betreuer, Viktor Petraschow, zog vom Institut für Festkörperphysik in das neu gegründete Institut für Mikroelektronik. Obwohl die Entfernung nur etwa 200 m betrug, wurde unsere Arbeit durch den teilweisen Verlust und die Neuinstallation sämtlicher Geräte ernsthaft aufgehalten. Am Anfang war ich in meiner metallphysikalischen Forschung noch ziemlich enthusiastisch. Als ich aber bemerkte, dass niemand – außer vielleicht mein Betreuer – sich irgendwie für meine Tätigkeit interessierte, schwand diese anfängliche Begeisterung immer mehr dahin. In Bezug auf die experimentelle Ausbildung waren diese Jahre dennoch wichtig, denn hier galt es Experimentiergeschick und den sprichwörtlichen „grünen Daumen“ zu entwickeln. Für meine weitere Forschungskarriere und auch für die Graphengeschichte war dies stets ein wichtiger Faktor, und dafür verdanke ich Viktor, den ich zu den fähigsten mir bekannten Experimentatoren zähle, wirklich viel. Mit einem Schnürsenkel und Siegelwachs konnte er erstaunliche Dinge tun, und Schnürsenkel und Siegelwachs waren das, was uns in jenen Tagen im Tschernogolowkaer Labor üblicherweise zur Verfügung stand.

Gelegentlich treffe ich Leute, die nostalgische Gefühle für die „goldene Ära“ der sowjetischen Wissenschaft hegen. Ich für meinen Teil habe eine solche Zeit niemals erlebt, auch nicht in Tschernogolowka, das ja ein recht elitärer akademischer Standort war. Vielmehr erinnere ich mich daran, dass die Ankunft fast jedweden für die Forschung wichtigen Materials, sei es Kupferdraht oder Tieftemperaturkleber, Begeisterungsstürme auslöste, die fast denen im Westen gleichkommen, wenn teure neue Geräte im Millionenwert eintreffen. Einmal konnte Viktor für ein paar Messungen einen US-gefertigten Lock-In-Verstärker ausleihen, wofür sonst unser Sowjetäquivalent herhalten musste (das Wort „Äquivalent“ gibt keinen Begriff vom Ausmaß der Unterschiede). Schon nach wenigen Wochen hatte ich Ergebnisse, von denen ich mit unserem alten „Äquivalent“ nur hatte träumen können. Das, was ich tun konnte, wurde im Wesentlichen von der Verfügbarkeit (oder eben Nichtverfügbarkeit) der dafür nötigen Ressourcen diktiert. Diejenigen, die angeblich „die große sowjetische Wissenschaft“ erlebt haben, gehören meiner Meinung nach entweder zu der Handvoll von Experimentalphysikern mit Fürsprechern unter den Top-Akademikern, oder (was ich für wahrscheinlicher halte) sie täuschen sich selbst und bevorzugen zu glauben, dass der Himmel in den alten Zeiten blauer war.

Dazu ist allerdings anzumerken, dass es in der Sowjetunion einen gewaltigen Unterschied zwischen Experimentalphysiker und Theoretiker gab. Die Theorieschulen waren extrem stark, besonders diejenige, die wir als „Landau-Theorieschule“ kennen. Hier fand Wissenschaft auf allerhöchstem Niveau statt. Die Wurzeln dafür lagen einerseits in der Ausbildung, andererseits aber in der Arbeitsweise der

sowjetischen Theoretiker. Ich sah das in vielen Forschungsseminaren. Einen wichtigen Platz nahmen immer Diskussionen und hitzige Debatten ein, in denen es keine Frage gab, die nicht gestellt werden konnte, und keine Autoritätsperson, die nicht infrage gestellt werden durfte. Diejenigen, die in den 1980ern und 1990ern „Erfahrung“ mit sowjetischen Wissenschaftlern gemacht haben, haben auch diesen Seminarstil kennen gelernt. Für die Teilnehmer konnte er zu einem furchtbaren Erlebnis werden, aber ich selbst vermisste die Seminare zuweilen schmerzlich. Die Nostalgie erfasst mich meistens dann, wenn ich in der heutigen Wissenschaftsliteratur über bestimmte Artikel stolpere: Wären diese zuerst auf solchen Seminaren präsentiert worden, hätten nicht einmal die Autoren selbst es gewagt, sie in Druck zu geben. Diese Debatten hatten einen großen Einfluss und erlaubten es den Teilnehmern, schneller zu lernen und sich ein breites Wissen über viele Gebiete der Physik anzueignen. Ich selbst habe von den Seminaren enorm profitiert und halte sie für den zweitwichtigsten Teil meiner Ausbildung in Tschernogolowka. Viele der Seminare wurden von Seva Gantmacher geleitet. Mit seiner Aufmerksamkeit für Details und der Breite seiner experimentellen Kenntnisse war er ein großes Vorbild für meine Kommilitonen und mich.

Trotz der großartigen Atmosphäre in den theoretischen Abteilungen litten selbst die Theoretiker unter dem Zustand der Wissenschaft in der Sowjetunion. Viele sehr gute Leute gingen in den späten 1980ern in den Westen. Ich denke nicht, dass allein die besseren Lebensbedingungen die Abwanderung der Wissenschaftler verursachten: Theoretische Vorstellungen entstehen nicht aus dem Nichts, sondern meistens im Austausch mit Experimentatoren, deren Arbeiten als Auslöser für neue Ideen wirken. In Tschernogolowka gab es diesen Austausch überhaupt nicht, denn mit den vorhandenen Ressourcen waren neue Forschungsergebnisse nur schwer – wenn überhaupt – zu erzielen. Zu Zeiten meiner Doktorarbeit hatte die experimentelle wissenschaftliche Forschung der Sowjetunion bereits einen solchen Niedergang erlebt, dass ein Experimentator nur noch dann auf Ruhm und Ehre hoffen konnte, wenn er letztlich mit seiner Arbeit eine Theorie eines berühmten sowjetischen Theoretikers bestätigte. Genau das taten viele in Tschernogolowka.

Dies war mein Leben als Wissenschaftler. Parallel dazu gab es noch ein anderes, sehr ereignisreiches Leben. Tschernogolowka ist eine freundliche Moskauer Vorstadt, ruhig, friedlich und von Wald umgeben. Im Allgemeinen konnte man angenehm leben, auch wenn meine eigenen Lebensumstände sehr karg waren – die meiste Zeit teilte ich mir einen Raum im Studentenwohnheim mit zwei anderen Jungforschern. Einer meiner Mitbewohner war Sergey Dubonos, der über die Jahre zu meinem regelmäßigen Koautor wurde und später auch viel zum Graphenartikel, der zum Nobelpreis führte, beitrug. Als Hobbys hatte ich außer meiner Forschung Bergwandern und Wildwasser-Kanufahren. Jedes Jahr fuhr ich mindestens einen Monat lang in die Berge und paddelte auf Flüssen in den letzten Winkeln der Sowjetunion, vom Kaukasus bis nach Zentralasien. Zuweilen schaffte ich bis zu vier solcher Touren in einem Jahr. Häufige Mitreisende waren Max Maximenko und mein Freund vom Phystech, Stas Ionov. Auch lernte ich in dieser Zeit meine spätere Frau Irina Gri-

gorieva kennen, die im Nachbarinstitut für Festkörperphysik ebenfalls ihre Doktorarbeit anfertigte. Als spätere Kollegin und Mitarbeiterin trug sie auch erheblich zur Graphenarbeit bei.

In vieler Hinsicht bot Tschernogolowka ideale Arbeitsbedingungen für Wissenschaftler – es gab kaum Ablenkung, weshalb wir uns allein der Forschung widmen konnten. Die meiste Zeit verbrachten wir im Labor, wenn wir nicht gerade stundenlang für Wurst und Käse anstanden (was in den 1980ern ein regelmäßiges Ereignis war). Auch ohne sonderliche Begeisterung meinerseits schritt meine Forschung stetig voran. Ich schrieb einige Artikel und erzielte die nötigen Fortschritte. Erst dann, als ich unabhängig Forschung betreiben konnte, und insbesondere nach meinem Wechsel in den Westen 1990, begann ich mich jedoch wirklich anzustrengen. Ab hier änderte sich das Tempo meines Lebens drastisch, wie in meinem Nobel-Vortrag „Zufallswege zum Graphen“ beschrieben wird.

ZUFALLSWEGE ZUM GRAPHEN

Wenn man in die Schönheit der Graphenphysik eintauen möchte, wird man heute von einer Fülle verfügbarer Übersichten und populärwissenschaftlicher Artikel geradezu erschlagen. Der Leser mag mir verzeihen, wenn ich hier meine eigenen Arbeiten empfehle.^[1-3] Um mich aber nicht einfach selbst zu wiederholen, möchte ich in diesem Aufsatz den verschlungenen wissenschaftlichen Weg schildern, der mich schließlich zum Nobelpreis geführt hat. Der größte Teil dieser Geschichte wurde noch nie erzählt. Zeitlich wird die Spanne von der Promotion 1987 bis zur Annahme unseres vom Nobel-Komitee gewürdigten Artikels im Jahr 2004 abgedeckt. Gegen Ende der Geschichte verdichten sich natürgemäß sowohl die Ereignisse als auch die Erklärungen. Auch die Literatur vor 2004 berücksichtige ich im Detail und versuche rückblickend zu ergründen, warum Graphen so viel Interesse geweckt hat. Ich habe mein Bestes gegeben, den Aufsatz nicht nur informativ, sondern auch für Nichtphysiker gut lesbar zu gestalten.

Zombie-Management

Meine Doktorarbeit trug den Titel „*Untersuchung von Mechanismen der Transportrelaxation in Metallen durch eine Helikonresonanzmethode*“. Dazu kann ich nur sagen, dass dieses Zeug damals genauso interessant war, wie es sich heute für den Leser anhört. Fünf Artikel publizierte ich und brauchte fünf Jahre – die offizielle Dauer einer Doktorarbeit an meiner Institution, dem Institut für Festkörperphysik. Das *Web of Science* konstatiert nüchtern, dass die Artikel zweimal zitiert worden sind, und zwar von den Koautoren. Das Thema war schon zehn Jahre tot gewesen, bevor ich auch nur mit meiner Doktorarbeit angefangen hatte. Dennoch hat alles auch sein Gutes, und ich habe aus dieser Erfahrung den Vorsatz mitgenommen, niemals Studenten mit „Zombie“-Projekten foltern zu wollen.

Nach der Promotion war ich wissenschaftlicher Angestellter am Institut für mikroelektronische Technologie in Tschernogolowka, das zur Russischen Akademie der Wissenschaften gehört. Das Sowjetsystem ermöglichte und förderte es auch, dass sich Jungforscher ihr eigenes Forschungsthema suchen. Nachdem ich mich ein Jahr lang in verschiedene Richtungen umgesehen hatte, nahm ich als Forscher Abschied von meinem Doktorvater, Viktor Petraschow, und suchte mir meine eigene Forschungsrichtung aus. Das experimentelle System, das ich entwickelte, war sowohl neu als auch machbar, was bei den dürftigen Ressourcen eines Sowjet-Forschungsinstituts damals geradezu ein Widerspruch in sich war. Aus dünner Metallfolie und einem Supraleiter stellte ich einen Sandwich her, in dessen Mitte sich ein dünner Isolator befand. Den Supraleiter brauchte ich nur, um ein externes magnetisches Feld als Anordnung von Vortices zu kondensieren und dieses stark inhomogene Feld auf die zu untersuchende Folie zu projizieren. Die Messung des Elektronentransports im mikroskopisch inhomogenen Feld (Änderungen im Submikrometerbereich) war ein neues Forschungsteritorium, und ich veröffentlichte den ersten experimentellen Bericht über dieses Gebiet.^[4] Nur wenig später folgte ein unabhängiger Beitrag von Simon Bending.^[5] Ich hatte ein interessantes Nischenthema gefunden, das auch eine gewisse Bedeutung besaß und an dem ich noch einige Jahre weiterarbeitete. Noch 1991, als Postdoktorand an der University of Bath, wo ich mit Simon zusammenarbeitete, war ich zeitweilig daran tätig.

Diese Erfahrung lehrte mich, dass sich im Allgemeinen ein neuer experimenteller Ansatz mehr lohnt, als in schon überfüllten Bereichen nach neuen Phänomenen zu graben. Die Erfolgsschancen sind in einem neuen Gebiet viel höher. Natürlich materialisieren sich nicht unbedingt die ursprünglich erhofften, phantastischen Ergebnisse, aber irgend etwas Neues und Originelles findet sich immer.

Des einen Abfall ist des andren Goldgrube

Dank Witali Aristow, dem damaligen Direktor meines Tschernogolowkaer Instituts, konnte ich 1990 der Einladung von Laurence Eaves und Peter Main von der University of Nottingham für ein sechsmonatiges Besuchsstipendium von der britischen Royal Society folgen. Sechs Monate sind sehr wenig für einen Experimentator, und weil es nicht anders ging, konnte ich nur solche Apparaturen als Untersuchungsobjekte verwenden, die im Gastlabor direkt zur Verfügung standen. Dies waren schon einige Jahre vor sich hinstaubende, submikrometergroße GaAs-Drähte aus früheren Experimenten. Hier erwiesen sich meine Erfahrungen aus der von Armut geplagten Sowjetakademie als äußerst nützlich. Die Proben, die von meinen Gastgebern für praktisch verbraucht gehalten wurden, sahen für mich wie eine Goldader aus. Um sie auszubeuten, arbeitete ich hundert Stunden die Woche. Mein kurzer Besuch ergab zwei gute Zuschriften für die *Phys. Rev. Letters*.^[6,7] Mit dieser Erfahrung ziehe ich öfters meine jüngeren Kollegen auf. Immer wenn etwas nicht nach Wunsch läuft und sie sich zu beschweren beginnen, provoziere ich sie mit dem Spruch: „*Es gibt keine schlechten Proben, nur schlechte Methoden*“.

schlechte Postdoktoranden/Studenten“. Suche sorgfältig, dann findest du immer etwas Neues. Sicherlich ist es grundsätzlich besser, es soweit erst gar nicht kommen zu lassen und sich lieber gleich auf neue Gebiete zu begeben. Aber selbst, wenn man das Glück hat, ein so neues und spannendes System wie Graphen zu bearbeiten, kommt man mit den Tugenden Fleiß, Genauigkeit und Beharrlichkeit viel schneller voran.

Meine Forschung schritt in Nottingham so unerbittlich schnell voran und war gleichzeitig so überaus inspirierend, dass eine Rückkehr nach Russland für mich nicht mehr infrage kam. Im zähen sowjetischen System hätte ich schlicht den Rest meines Lebens vergeudet. Daher begab ich mich im Alter von dreiunddreißig und mit einem *h*-Index von 1 (die neuesten Arbeiten noch unveröffentlicht) auf den westlichen Arbeitsmarkt für Postdoktoranden. In den nächsten vier Jahren zog ich mehrfach zwischen Universitäten um, von Nottingham über Kopenhagen nach Bath und wieder zurück nach Nottingham, und jeder Umzug brachte mich in Kontakt mit einem oder zwei weiteren Themen, die meinen Forschungshorizont deutlich erweiterten. Die physikalischen Systeme und Phänomene, mit denen ich mich in jenen Jahren beschäftigte, kann man allgemein als mesoskopisch beschreiben; sie umfassten zweidimensionale Elektronengase (2DEGs), Quantenpunktkontakte, das Resonanztunnellen und den Quanten-Hall-Effekt (QHE), um nur einige zu nennen. Darüber hinaus machte ich mich mit durch Molekularstrahlepitaxie gewachsenen GaAlAs-Heterostrukturen vertraut und vertiefte meine Kenntnisse in der Mikrofabrikation und Elektronenstrahlolithographie. Für diese Techniken hatte ich mich schon in Russland aktiv interessiert. Auf all diese Erfahrungen gründete sich die erfolgreiche Graphenarbeit zehn Jahre später.

À la hollandaise

Bis zum Jahr 1994 hatte ich so viele hochwertige Artikel veröffentlicht und an so vielen Konferenzen teilgenommen, dass ich auf eine dauerhafte akademische Anstellung hoffen konnte. Als mir eine Assistenzprofessur an der Universität Nimwegen angeboten wurde, ergriff ich sofort die Gelegenheit, mich in meinem neuen, post-sowjetischen Leben etwas abzusichern. Meine erste große Aufgabe in Nimwegen war es natürlich, mich einzurichten und eine Forschung aufzubauen. Allerdings gab es dort weder eine Starthilfe noch eine Mikrofabrikation, mit der ich eine meiner bisherigen Tätigkeiten hätte weiterführen können. Als Einrichtung durfte ich die Magneten, Kryostaten und die Elektroausstattung im von Jan Kees Maan geleiteten Hochfeldmagnet-Laboratorium von Nimwegen mitbenutzen. Jan Kees war formal auch mein Vorgesetzter und verwaltete sämtliches Geld. Auch als ich als Gruppenleiter selbst Fördermittel erhielt (die niederländische FOM, die die Fördermittel vergibt, war mir gegenüber durchaus großzügig), durfte ich das Geld nicht einfach so ausgeben. Sämtliche Mittel wurden durch so genannte „Arbeitsgruppen“ verteilt, an deren Spitze ordentliche Professoren standen, die offiziell auch alle Doktoranden betreuten. Das mag seltsam erscheinen, aber so war in den 1990ern das akademische System in den Niederlanden. Ich fand es sehr

hart. Mehrere Jahre lang tat ich mich wirklich schwer, mich in das System einzufinden. Zu stark stand es im Gegensatz zu meinen angenehmen und produktiven Jahren in Nottingham. Zusätzlich kam mir die Situation ein wenig surreal vor, denn außerhalb der Universitätsmauern nahmen mich alle sehr herzlich auf, auch Jan Kees und andere Universitätsangehörige.

Aber die Forschungsbedingungen in Nimwegen waren immer noch viel besser als die in Russland, und letztlich habe ich auch dank auswärtiger Hilfe wissenschaftlich überlebt. Von Nottinghamer Kollegen (insbesondere Mohamed Henini) erhielt ich 2DEGs, die ich nach Tschernogolowka sandte. Dort stellte mein enger Kollege und Freund aus den 1980ern, Sergey Dubonos, die von mir verlangten Apparaturen in Mikrofabrikationstechnik her. Meine schließlich eingeschlagene Forschungsrichtung, die ich lange verfolgte, lässt sich als mesoskopische Supraleitung bezeichnen. Aus 2DEGs machten wir mikrometergroße Hall-Sonden, mit denen wir das lokale Magnetfeld von kleinen Supraleiterproben maßen. Die Messungen waren so genau, dass wir nicht nur Ein- und Austritt von einzelnen Vortices, sondern auch weit feinere Variationen detektieren konnten. Es war wieder eine neue experimentelle Nische, zu der wir durch die Weiterentwicklung einer ursprünglichen Technik der ballistischen Mikro-Hall-Magnetometrie gekommen sind.^[8] Die nächsten fünf Jahre loteten wir unser Nischengebiet aus und veröffentlichten mehrere Artikel in *Nature* und *Phys. Rev. Lett.*, die unter anderem einen paramagnetischen Meißner-Ochsenfeld-Effekt, Vortices mit fraktionalem Fluss und Vortexkonfigurationen mit eingeschränkter Geometrie zum Inhalt hatten. Weil meine Frau Irina Grigorieva, eine Expertin in der Vortexphysik,^[9] in den Niederlanden keine Anstellung fand, half sie mir in ihrer vielen freien Zeit dabei, das Thema zu erobern und Artikel zu schreiben. Sergey baute nicht nur die Apparaturen, sondern unterstützte mich bei Besuchen in Nimwegen auch mit den Messungen. Wir entwickelten eine sehr produktive Arbeitsverteilung, bei der er die Daten sammelte, die ich dann an meinem Computer im Nachbarraum analysierte. Anschließend entschieden wir, was als nächstes zu tun sei.

Erhebende Momente

Als sich 1996 die ersten Ergebnisse zur mesoskopischen Supraleitung abzeichneten, begann ich mich im niederländischen System sicherer zu fühlen und wurde wissbegieriger. Ich sah mich nach neuen Gebieten um. Den Schwerpunkt des Hochfeldmagnet-Labors von Nimwegen bildeten seine leistungsstarken Elektromagneten. Außerdem waren sie ein Grund für Kopfschmerzen. Die Magneten konnten Feldstärken bis hin zu 20 T produzieren, mehr als die 16 bis 18 T der supraleitenden Magneten unserer Wettbewerber. Andererseits war der Betrieb der Elektromagneten so teuer, dass wir sie nur wenige Stunden nachts benutzen durften, wenn der Strom billiger war. Weil ich für meine Arbeit zur mesoskopischen Supraleitung aber nur winzige Feldstärken (< 0.01 T) brauchte, nutzte ich die Elektromagneten gar nicht. Ich fühlte mich deswegen sowohl schuldig als auch in der Pflicht, mir

Experimente auszudenken, die die Existenz der teuren Geräte rechtfertigten. Den einzigen Vorteil, den mir die Elektromagneten eventuell boten, war ihre Raumtemperaturbohrung. Sie galt eigentlich als Nachteil, denn klassisch wird auf dem Gebiet der Physik der kondensierten Materie bei extrem tiefer Temperatur von flüssigem Helium geforscht. Darum überlegte ich, so wie andere Wissenschaftler im Labor auch, welche Hochfeldphänomene sich für Raumtemperatur-Untersuchungen eignen könnten. Leider war die Auswahl nicht groß.

Schließlich stolperte ich über das Rätsel des so genannten magnetischen Wassers. Demnach soll ein kleiner Magnet um eine Heißwasserleitung herum die Bildung von Ablagerungen in der Leitung verhindern. Oder: Kein Kalk mehr im Topf, wenn auf dem Wasserhahn ein solcher Magnet sitzt. Solche Magneten sind in großer Auswahl in Geschäften und im Internet erhältlich. Hunderte von Artikeln wurden bereits über dieses Phänomen geschrieben, aber die dahinter steckende Physik ist nach wie vor unklar. Unter den Forschern gibt es viele, die die Existenz des Effekts bezweifeln.^[10] Während der letzten fünfzehn Jahre habe ich immer wieder versucht, „magnetisches Wasser“ zu erforschen, ohne aber etwas Definitives sagen zu können. Nach wie vor kann ich dem Argument nichts hinzufügen. Dennoch lud die Verfügbarkeit von ultrahohen Feldern bei Raumtemperatur dazu ein, sich einmal auf unorthodoxe Weise mit Wasser zu beschäftigen. Ich dachte, wenn magnetisches Wasser wirklich existiert, müsste der Effekt im Grunde bei 20 T besser zu beobachten sein als bei den <0.1 T der Standardmagneten.

Dies im Hinterkopf goss ich eines Freitagabends (so wird zumindest behauptet) Wasser in den auf Maximalleistung laufenden Elektromagneten. Wasser in einen Magneten zu schütten, ist sicher keine wissenschaftliche Standardmethode, und ich erinnere mich nicht, warum ich mich so „unprofessionell“ verhalten habe. Anscheinend hat aber vor mir niemand einen solch unsinnigen Versuch gemacht, obwohl ähnliche Apparaturen seit Jahrzehnten an verschiedenen Einrichtungen weltweit zu finden sind. Zu meiner Überraschung landete das Wasser nicht auf dem Boden, sondern blieb in der vertikalen Magnetbohrung stecken. Humberto Carmona, ein Gaststudent aus Nottingham, und ich spielten dann eine Stunde lang mit dem steckengebliebenen Wasser herum, indem wir zum Beispiel die Blockade mit einem Holzstückchen lösten und die Feldstärke veränderten. Als Ergebnis sahen wir Kügelchen von schwappendem Wasser (Abbildung 1). Es war aufregend. Erst eine Weile später haben wir verstanden, dass es sich bei der dahinter steckenden Physik um guten alten Diamagnetismus handelte. Noch viel mehr Zeit verging, bis sich in meinem Verstand die Erkenntnis breitgemacht hatte, dass die schwache magnetische Reaktion von Wasser (ca. 10^{-5}), die milliardenmal kleiner ist als die von Eisen, ausreicht, um die Schwerkraft der Erde zu kompensieren. Darüber waren viele Kollegen – auch solche, die ihr ganzes Leben mit hohen Magnetfeldern gearbeitet hatten – völlig verblüfft. Manche glaubten gar an einen Scherz.

Die nächsten Monate verbrachte ich damit, Kollegen und Besuchern dieses wunderschöne Phänomen der Levitation im Magnetfeld zu demonstrieren und eine allgemeinverständliche Darstellung zu finden. Den medialen Hype hat dann von

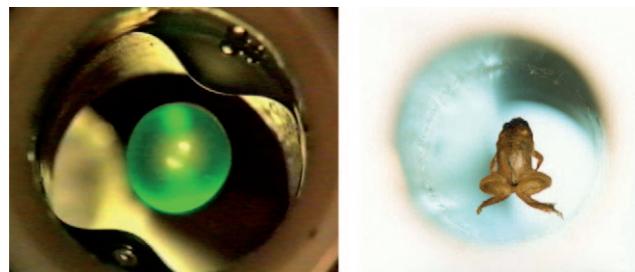


Abbildung 1. Freies Schweben in Nirwegen. Links: Eine Kugel aus Wasser (ungefähr 5 cm Durchmesser) schwebt innerhalb einer vertikalen Bohrung eines Elektromagneten. Rechts: der Frosch, der fliegen lernte. Dieses Bild wird nach wie vor als Symbol dafür verwendet, dass man den Magnetismus von „nicht magnetischen Dingen“, einschließlich des Menschen, nicht völlig vernachlässigen darf. Für dieses Experiment erhielten Michael Berry und ich den Ig-Nobelpreis 2000. Wir wurden zuerst gefragt, ob wir den Preis auch wirklich annehmen wollten, und ich bin stolz auf unseren Sinn für Humor und Selbstironie, dass wir zugestimmt haben.

den vielen Objekten, die im Magneten schweben durften, das Bild eines schwebenden Froschs ausgelöst (Abbildung 1). Und unbeachtet fand dieses Bild während des ganzen Medienlärm-Eingang in viele Lehrbücher, was wir wichtiger finden als eine punktuelle öffentliche Aufmerksamkeit. Obwohl es nicht gerade ein Standardbild aus der Wissenschaft ist, dient es hervorragend als Symbol für den stets präsenten Diamagnetismus, den man nun nicht mehr länger extrem schwach nennen kann. Auf Konferenzen wurde ich schon einmal mit den Worten angesprochen: „Ich kenne Sie! Tut mir leid, nicht wegen Graphen. Ich beginne meine Vorlesungen mit dem Bild Ihres Froschs. Die Studenten wollen immer wissen, warum er fliegen konnte.“ Die Geschichte des Froschs zusammen mit einiger nicht ganz trivialer Physik, die sich hinter der Stabilität der diamagnetischen Levitation verbirgt, bietet meine Übersicht in *Physics Today*.^[11]

Freitagabend-Experimente

Das Levitations-Erlebnis war interessant und machte Lust auf mehr. Es brachte mir die wichtige Erkenntnis, dass Dinge, die weit weg von meinem unmittelbaren Spezialgebiet liegen, durchaus sehr interessante Ergebnisse bringen können, auch wenn die ersten Ideen, die man dazu hatte, äußerst simpel waren. Meine Art, Forschung zu betreiben, hat sich dadurch geändert und weist nun regelmäßig solche Abstecher auf, für die sich irgendwie der Name „Freitagabend-Experimente“ eingebürgert hat. Natürlich ist dieser Ausdruck falsch. Keine ernsthafte Arbeit kann in einer Nacht vollbracht werden. Man muss vielmehr meist monatelang ungewöhnliche Ideen verfolgen und ohne klares Ziel irrelevante Literatur durchforsten. Letztlich bekommt man dann ein Gefühl – gar nicht so sehr eine Idee –, was zu untersuchen sich lohnen könnte. Dann versucht man es einfach – und scheitert normalerweise. Entweder versucht man es dann noch einmal oder lässt es eben bleiben. Irgendwann kommt aber immer der Punkt, an dem man sich entscheiden muss (der schwierigste Teil von allem), ob man weitere Mühen investieren oder besser einen

Schlussstrich ziehen und sich mit etwas anderem beschäftigen soll. All dies läuft vor dem Hintergrund der ganz normalen Forschung ab und beansprucht nur einen kleinen Teil der Arbeitszeit und des Gehirns.

Noch in Nimwegen begann ich solche unorthodoxen Ideen als Projekte während des Studiums oder der Doktorarbeit zu anzubieten. Die Studenten waren immer begeistert, die Katze im Sack zu kaufen. An vielen dieser Projekte war Kostya Novoselov beteiligt, der 1999 als Doktorand nach Nimwegen kam. Nie wurden diese Projekte mehr als nur ein paar Monate verfolgt, um nicht eine Doktorarbeit oder die weitere Forschungskarriere zu gefährden. Obwohl die Begeisterung gegen Ende, wenn sich erwartungsgemäß kein Erfolg einstellte, regelmäßig stark zurückging, bestätigten mir später einige Studenten, dass diese Abstecher für sie eine unschätzbare Erfahrung gewesen seien.

Gänzlich überraschend wollte sich in manchen Fällen kein Misserfolg einstellen. Ein Beispiel dafür ist das Gecko-Tape. Zufällig (oder nicht) las ich einen Artikel über die erstaunlichen Kletterkunststücke von Geckos.^[12] Die Physik dahinter ist recht leicht zu verstehen. Die Zehen des Geckos sind von winzigen Härchen bedeckt. Zwischen Oberfläche und Härchen besteht eine fast vernachlässigbare Van-der-Waals-Kraft (im nN-Bereich), die aber in Zusammenarbeit der Milliarden von Härchen solche Ausmaße annimmt, dass die Geckos an jeder Oberfläche, einschließlich einer Glasdecke, haften bleiben. Meine Aufmerksamkeit erweckte insbesondere die räumliche Ausdehnung der Härchen. Sie hatten Durchmesser im Submikrometerbereich, dem Standardgrößenbereich in der mesoskopischen Physik. Nachdem wir ein Jahr oder mehr hin- und herüberlegt hatten, entwarfen schließlich Sergey Dubonos und ich ein Verfahren, um die behaarten Geckofüße nachzubilden. Sergey stellte einen Quadratzentimeter Klebestreifen mit durchaus beachtlicher Haftung her.^[13] Leider funktionierte das Material doch nicht so gut wie der echte Gecko Fuß und verlor nach ein paar Haftversuchen vollständig seine Klebekraft. Das Experiment lieferte aber jedenfalls den Nachweis, dass das Konzept funktionierte, und inspirierte so weitere Forschungen an dem Thema. Es bleibt zu wünschen, dass jemand eines Tages erfolgreich die hierarchische Struktur der Gecko-Setae mitsamt ihres Selbstreinigungsmechanismus nachahmen kann. Dann wird es das Gecko-Tape zu kaufen geben.

Lieber danebenliegen als langweilig sein

In Vorbereitung auf meinen Vortrag in Stockholm stellte ich mir alle meine Freitagabend-Experimente in einer Liste zusammen. Dabei fand ich etwas Erstaunliches: In einem Zeitraum von annähernd fünfzehn Jahren haben wir um die zwei Dutzend Experimente durchgeführt, von denen wie erwartet die meisten scheiterten. Drei Volltreffer gab es aber doch: den schwebenden Frosch, das Gecko-Tape und Graphen. Dies ist eine außerordentliche Erfolgsquote, mehr als 10%. Darüber hinaus waren wir mit manchen Versuchen wahrscheinlich sehr nahe dran. So habe ich einmal einen Artikel^[14] über Riesen-Diamagnetismus bei FeGeSeAs-Legierungen gelesen, der als Zeichen für Hochtemperatur-Su-

praleitung gedeutet wurde. Ich bat die Lamarches um Proben, die sie mir gaben. Kostya und ich versuchten mit ballistischer Hall-Magnetometrie den Riesen-Diamagnetismus zu finden, hatten aber selbst bei 1 K keinen Befund. Dies geschah im Jahr 2003, lange bevor in Eisenpnictiden Supraleitung entdeckt wurde. Ich frage mich immer noch, ob wir nicht vielleicht mit unserem Ansatz kleine Einschlüsse eines supraleitenden Materials übersehen hatten. Ein anderer Fall war unser Versuch, den „Herzschlag“ von einzelnen lebenden Zellen nachzuweisen. Wir wollten mithilfe von 2DEG-Hall-Kreuzen als ultraempfindlichen Elektrometern elektrische Signale messen, die aufgrund der physiologischen Aktivität von einzelnen Zellen auftreten. Zwar konnten wir an lebenden Zellen keinen solchen Herzschlag feststellen, allerdings registrierte unser Sensor gewaltige Spannungsausschläge, wenn die Zellen ihr Leben aushauchten, als wir sie mit Alkohol tränkten.^[15] Heute denke ich, dass unser Fast-Treffer an der unklugen Verwendung von Hefe lag, die ein sehr untätiger Organismus ist. Vier Jahre später wurden ähnliche Experimente an embryonalen Herzzellen mit – Welch Überraschung – Graphensensoren durchgeführt, die tatsächlich eine solche bioelektrische Aktivität detektierten.^[16]

Offen gesagt hat unsere hohe Erfolgsquote wahrscheinlich weniger mit besonders intelligenten ungewöhnlichen Ideen von meiner Seite zu tun. Viel eher trifft die Aussage zu, dass es lohnender ist, sich auf neue Gebiete zu begeben, als man gemeinhin annimmt. Möglicherweise graben wir zu tief in etablierten Gebieten, während nur einen Spatenstich daneben massenweise Unerforschtes unentdeckt bleibt. Geht man das Wagnis dennoch ein, ist vielleicht der Lohn nicht garantiert, ein Abenteuer aber sicher.

Auf nach Manchester!

Im Jahr 2000 war ich mit mesoskopischer Supraleitung, diamagnetischer Levitation und vier *Nature*-Beiträgen in der Tasche gut genug positioniert, um mich um eine Vollprofessur zu bewerben. Über meine letzliche Wahl der University of Manchester waren meine Kollegen etwas irritiert, denn ich hatte eine Reihe anscheinend prestigeträchtiger Angebote abgelehnt. Der Grund war einfach. Mike Moore, der Vorsitzende des Auswahlkomitees, kannte meine Frau Irina noch aus ihrer sehr erfolgreichen Zeit als Postdoktorandin in Bristol und weniger als meine Koautorin oder als technische Teilzeit-Ausbilderin in Nimwegen. Er schlug vor, dass Irina sich für die Dozentur bewerben sollte, die in Manchester den Lehrstuhl unterstützen soll. Nach sechs Jahren in den Niederlanden hatte ich nicht im Traum daran gedacht, dass Eheleute offiziell zusammenarbeiten könnten. Das war entscheidend. Nicht nur freuten wir uns darüber, dass wir künftig kein Problem mehr damit haben würden, unsere beiden Karrieren abzustimmen, sondern waren gleichzeitig auch sehr bewegt, dass unsere zukünftigen Kollegen so an uns dachten. Wir haben diesen Umzug niemals bereut.

Anfang 2001 nahm ich also mehrere marode Räume, in denen alte, wertlose Geräte herumstanden, und ein Startgeld von £100 000 im Empfang. Außer einem Helium-Verflüssiger gab es keine zentralen Einrichtungen, die ich mitbenutzen

konnte. Kein Problem. Ich machte das Gleiche wie in Nимвegen und suchte mir auswärts Hilfe, insbesondere bei Sergey Dubonos. Überraschend schnell nahm das Labor Gestalt an. Nach einem halben Jahr hielten wir meine ersten Fördermittel von £500 000 in den Händen, mit denen wir wichtige Ausstattung besorgten. Obwohl unsere ein Jahr alte Tochter unsere Zeit beanspruchte, erhielt auch Irina einige Monate später ihre Startmittel. Kostya luden wir als Forschungsstipendiat ein (offiziell war er nach wie vor in Nимвegen als Doktorand eingeschrieben, bis er dort 2004 seine Doktorprüfung ablegte). Und bald lieferte unsere Gruppe Ergebnisse, auf deren Grundlage wir mehr Mittel bekamen und wiederum mehr Ergebnisse lieferten.

Bis 2003 veröffentlichten wir mehrere gute Artikel in *Nature*, *Nature Materials*, *Phys. Rev. Lett.* und anderen. Immer weiter peppten wir unser Labor mit neuer Ausstattung auf. Darüber hinaus gründeten Ernie Hill vom Department of Computer Sciences und ich dank eines Förderbetrags von 1,4 Millionen Pfund (aus einem Projekt für Forschungsinfrastruktur unter der Federführung des damaligen Wissenschaftsministers David Sainsbury) das Manchester Centre for Mesoscience and Nanotechnology. Statt mit dem unverhofften Geldsegen zu bauen, richteten wir uns im existierenden Reinraumbereich (ca. 250 m²) der Computer Sciences ein. Vom überflüssigen Mobiliar in diesen Räumen trennten wir uns und installierten modernste Anlagen zur Mikrofabrikation, wie etwa ein neues System zur Elektronenstrahlolithographie. Am meisten stolz sind Ernie und ich aber darauf, dass viele Gruppen auf der Welt zwar über teurere Einrichtungen verfügen, unser Zentrum aber seit 2003 kontinuierlich neue Strukturen und Bauteile hervorbringt. Wir haben hier kein schickes Vorzeigeexemplar für die Show, sondern ein wirklich hart schuhftendes Arbeitspferd.

Wenn ich all das meinen Kollegen im Ausland erzähle, können sie kaum glauben, wie man in weniger als drei Jahren und ohne astronomisch hohe Startmittel ein voll funktionsfähiges Labor mitsamt Mikrofabrikationsanlage auf die Beine stellen kann. Wüsste ich es nicht selbst besser, wäre ich ebenfalls skeptisch. Die Dinge entwickelten sich unglaublich schnell. Von der Universität wurde ich gut unterstützt, aber den meisten Dank schulde ich dem Vergabemodus (dem Responsive Mode) des UK Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC). Dessen Fördersystem ist demokratisch und nicht fremdenfeindlich. Es zählen weder die universitäre Hierarchie noch etwaige Seilschaften. „Visionäre Ideen“ oder große Versprechungen, „soziale und ökonomische Bedürfnisse“ zu befriedigen, spielen für die Gutachter kaum eine Rolle. Vielmehr richtet sich der Verteilungsmodus nach deinen vorzeigbaren Leistungen, was das auch immer für die verschiedenen Fächer bedeuten mag. In der Regel erhalten diejenigen Forscher Geld, die hart und effizient arbeiten. Sicherlich ist kein System perfekt, und man kann immer auf ein besseres hoffen. Dennoch: Frei nach Winston Churchill hat Großbritannien meiner Meinung nach das schlechtestmögliche Fördersystem, abgesehen von allen anderen, die ich sonstwo gesehen habe.

Drei kleine Wolken

Während unser Labor und das Nanotech Centre immer mehr Gestalt annahmen, hatte ich etwas freie Zeit, um mir neue wissenschaftliche Abstecher zu überlegen. In diese Zeit fielen das Gecko-Tape und die fehlgeschlagenen Versuche mit Hefe und dem Quasi-Pnictid. Darüber hinaus vergeudete Serge Morozov, ein Wissenschaftler aus Tschernogolowka, der uns später regelmäßig besuchte und zum unschätzbareren Kollegen und Mitarbeiter wurde, seine ersten beiden Besuche mit der Erforschung des magnetischen Wassers. Im Herbst 2002 traf unser erster Manchesterer Doktorand, Da Jiang, ein, für den ich mir ein Promotionsprojekt ausdenken musste. Es war klar, dass er die ersten Monate damit verbringen musste, englisch zu lernen und sich mit dem Labor vertraut zu machen. Für den Anfang schlug ich ihm daher ein neues Ausser-Reihe-Experiment vor. Er sollte ultradünne Graphitfilme herstellen („so dünn wie möglich“), deren „mesoskopische“ Eigenschaften ich bei Erfolg zu untersuchen versprach. Als ich vor einiger Zeit rekonstruiert habe, wie ich damals auf diese Idee gekommen bin, kamen mir drei verschwommene Gedankenwolken wieder in den Sinn.

Eine dieser Wolken war das Konzept der „metallischen Elektronik“. Legt man an ein Metall ein externes elektrisches Feld an, ändert sich die Zahl der Ladungsträger an der Oberfläche, sodass sich eigentlich auch die Oberflächeneigenschaften des Metalls ändern müssten. Nach diesem Prinzip funktionieren die modernen Halbleiter. Warum nicht ein Metall anstelle von Silicium? Noch als Student wollte ich mithilfe des elektrischen Feldeffekts (EFE) und durch Röntgenstrukturanalyse Änderungen in der Gitterkonstante induzieren und nachweisen. Das war naiv, denn schon einfache Schätzungen zeigen, dass dieser Effekt vernachlässigbar klein ist. Tatsächlich lassen sich in keinem Dielektrikum höhere Felder als 1 V nm⁻¹ induzieren, die sich an der Metalloberfläche als maximale Änderung der Ladungsträgerkonzentration *n* von ungefähr 10¹⁴ pro cm² auswirken. Zum Vergleich enthält ein typisches Metall (z.B. Au) etwa 10²³ Elektronen pro cm³, sodass sich selbst bei einer 1 nm dicken Folie *n* und die Leitfähigkeit nur um ca. 1 % ändern würden, ganz zu schweigen von der noch viel kleineren Änderung in der Gitterkonstante.

Den Feldeffekt in Metallen wollten schon viele Forscher nachweisen. Zum ersten Mal wurde er bereits 1902 erwähnt, kurz nach Entdeckung des Elektrons. J. J. Thomson (Nobelpreis für Physik 1906) schlug Charles Mott, dem Vater von Nevill Mott (Nobelpreis für Physik 1977) vor, nach Anzeichen für den EFE in dünner Metallfolie zu suchen, aber ohne Ergebnis.^[17] Der erste Versuch, den EFE in einem Metall zu messen, ist in der wissenschaftlichen Literatur auf 1906 datiert.^[18] Abgesehen von normalen Metallen könnte man auch Halbmetalle wie Bismut, Graphit oder Antimon nehmen, die viel weniger Ladungsträger enthalten. In den im letzten Jahrhundert gerne verwendeten Bi-Folien (*n* ≈ 10¹⁸ cm⁻³) wurden nur sehr kleine Leitfähigkeitsänderungen festgestellt.^[19,20] Mit diesem Forschungsziel im Hinterkopf und meiner Erfahrung mit GaAlAs-Heterostrukturen schaute ich mich regelmäßig, wenn auch nicht mit letzter Konsequenz, nach anderen Kandidaten um. Besonders ultradünne Supra-

leiterfolien interessierten mich, in denen der Feldeffekt nahe am Übergang zur Supraleitung verstärkt werden kann.^[21,22] In Nimwegen hörte ich einmal von nanometerdünnen Al-Folien, die auf GaAlAs-Heterostrukturen durch Molekularstrahl-Epitaxie (MBE) aufgewachsen wurden. Nachdem mich dieses Thema zuerst begeistert hatte, entschied ich mich nach Abschätzung der möglichen Effekte letztlich gegen das Projekt, weil die Erfolgschancen viel zu gering waren.

Die zweite Wolke in den späten 1990ern und frühen 2000ern waren die Kohlenstoff-Nanoröhren. Nanoröhren erlebten damals ihre Glanzzeit, und als Wissenschaftler in den Niederlanden hörte ich Vorträge von Cees Dekker und Leo Kouwenhoven und las die Artikel von Thomas Ebbesen, Paul McEuen, Sumio Iijima, Pheadon Avouris und anderen. Jedesmal ließen mich diese außergewöhnlich schönen Ergebnisse mit dem Gedanken spielen, selbst in diese Forschung einzusteigen. Dafür kam ich aber zu spät und hätte mir abseits von der Masse eine andere Perspektive suchen müssen.

Was die dritte Wolke angeht, so las ich eine Übersicht von Millie Dresselhaus über Graphit-Interkalationsverbindungen,^[23] die sehr deutlich zeigte, dass das Wissen über Graphit auch nach vielen Jahrzehnten immer noch gering war, besonders im Hinblick auf seine elektronischen Eigenschaften. Nach diesem einflussreichen Übersichtsartikel begann ich mich tiefer in die Literatur über Graphit einzulesen. Mir fielen Beiträge von Pablo Esquinazi und Yakow Kopelevitsch über Ferromagnetismus, Supraleitung und einen Metall-Nichtleiter-Übergang (und zwar sogar bei Raumtemperatur) auf, die alle im guten alten Graphit beobachtet wurden.^[24,25] Diese provokanten Artikel weckten bei mir das starke Gefühl, dass es sehr lohnenswert sein müsste, sich Graphit einmal näher anzuschauen.

Diese drei Gedankenwelken (und vielleicht noch andere, an die ich mich nicht mehr erinnere) kumulierten irgendwie im Projekt von Da. Meine Vorstellung war die, in dünnen Filmen aus Graphit anstelle von Bi möglicherweise den EFE und/oder andere interessante Eigenschaften ähnlich denen von Kohlenstoff-Nanoröhren nachzuweisen. Im schlechtesten Fall wären unsere mesoskopischen Proben Einkristalle, an denen sich vielleicht die besagten Kontroversen über Graphit klären lassen würden. Warum sich also nicht auf diesem Gebiet ein paar Monate lang umschauen, dachte ich mir.

Die Legende vom Klebeband

Zur Herstellung des dünnen Graphitfilms gab ich Da eine mehrere Millimeter dicke Tablette von pyrolytischem Graphit mit einem Durchmesser von 2.4 cm, die er an einer Poliermaschine bearbeiten sollte. Wir besaßen ein ziemlich ausgeklügeltes Gerät, das flache Strukturen im Submikrometerbereich ermöglichte. Ein paar Monate später verkündete Da, dass er die geringstmögliche Dicke erreicht habe und zeigte mir einen winzigen Flecken von Graphit auf dem Boden einer Petrischale. Ich besah mir den Flecken in einem optischen Mikroskop und schätzte durch Fokussieren auf die obere und untere Oberfläche eine Dicke von ca. 10 µm ab. Zu dick, dachte ich und schlug eine feinkörnigere Polierflüssigkeit vor. Es stellte sich jedoch heraus, dass Da für diesen einen

kleinen Flecken die gesamte Tablette wegpoliert hatte. Schuld war eigentlich ich: Später machte Da noch erfolgreich seine Promotion, aber damals war er ein frisch aus dem Ausland eingetroffener Student mit enormer Sprachbarriere. Hinzu kam, dass ich ihm versehentlich hoch dichten anstelle von hoch geordnetem pyrolytischem Graphit (HOPG) gegeben hatte. Ersterer lässt sich nicht so leicht abblättern wie HOPG, den ich eigentlich verwenden wollte.

Meinen üblichen Schwung an ironischen Bemerkungen, diesmal darüber, dass für ein Körnchen Sand ein ganzer Berg wegpoliert worden sei, bekam unfreiwillig der in der Nähe arbeitende Oleg Shkliarevskii mit. Oleg, der aus Charkiw in der Ukraine stammte, war Experte für die Rastertunnelmikroskopie (STM) und arbeitete an einem Projekt, das sich später als eine weitere schlechte „Freitagabend“-Idee von mir herausstellen sollte. Er unterbrach mich, indem er uns ein Stück durchsichtiges Klebeband mit Graphitflocken darauf zeigte. Es geht das Gerücht, er habe es aus einem Müllheimer gezogen. Tatsache ist, dass HOPG Standardreferenz für die STM ist und seine frische Graphitfläche durch Abziehen der obersten Schicht mit Klebefilm hergestellt wird. Mit dieser Technik hatten wir Jahre gearbeitet, uns aber nie dafür interessiert, was genau wir da eigentlich zusammen mit dem Film weggeworfen hatten. Die Graphitüberbleibsel schaute ich mir im Mikroskop an (Abbildung 2) und fand weit dünn-

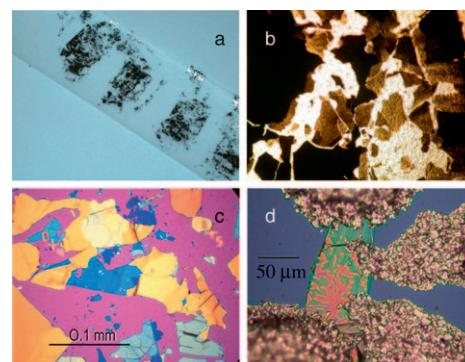


Abbildung 2. Im Rückblick sind dünne Kristalle von Graphit leicht zu erhalten. a) Die HOPG-Reste, die auf dem Klebeband haften blieben. b) Einige der Kristalle sind optisch transparent, wenn sie in einem optischen Mikroskop oder nur mit der Lupe betrachtet werden. c) Auf einem oxidierten Si-Wafer können die transparenten Kristalle verschiedene Blauschattierungen annehmen. d) Eines unserer allerersten Bauteile, die mit „Schnürsenkel und Siegelwachs“ erzeugt wurden – in unserem Fall mit Pinzette, Zahntocher und Silberfarbe.

nere Stückchen als jenes von Da. Erst in dem Moment merkte ich, wie unsinnig mein Vorschlag mit der Poliermaschine gewesen war. Polieren war tot, lang lebe das Klebeband!

Dieses Ereignis war noch kein Durchbruch, aber die Dinge begannen vielversprechend auszusehen. Mehr Leute mussten mit einbezogen werden. Oleg meldete sich nicht als Freiwilliger für noch ein weiteres Projekt, aber Kostya war dabei. „Freiwilliger“ ist vielleicht nicht das richtige Wort. Jeder in unserem Labor war immer willkommen, sich an jedem beliebigen Projekt zu beteiligen. Zu der Zeit arbeitete Kostya an einem vielversprechenden Ferromagnetismusprojekt.^[26] Kostya war auch unser „Hausmeister“, wenn etwas

schiefging, insbesondere bei den Messinstrumenten. Was mich betrifft, so verbrachte ich damals noch mehrere Stunden am Tag im Labor, bereitete Proben vor, machte Messungen und analysierte Ergebnisse. Erst nach 2006 mutierte ich völlig zu einer Artikelschreibmaschine mit angeschlossenem Datenanalysator. Letzteres habe ich immer geliebt, das Schreiben von Artikeln dagegen gehasst. Leider kann kein Labor ohne seinen Shakespeare auskommen.

Kostya und ich entschieden uns, die elektrischen Eigenschaften der Graphitflocken auf dem durchsichtigen Klebeband zu untersuchen. Dafür begann er sie auf dünne Glsträger zu übertragen, zunächst mit der Pinzette. Ein paar Tage später und mit meiner ursprünglichen Motivation der Messung des EFE im Kopf nahm ich oxidierte Si-Wafer als Substrat. Dies brachte uns einen unerwarteten Bonus. Mit den Wafern als Untergrund konnten wir Interferenzfarben sehen, die auf optische Transparenz mancher Fragmente hinwiesen. So war auch eine sehr intuitive Abschätzung möglich, welche der Flocken wirklich dünn waren (Abbildung 2c). Schnell fanden wir heraus, dass manche nur einige Nanometer maßen. Dies war der erste echte Durchbruch.

Heureka-Moment

In der Graphenliteratur und insbesondere in populärwissenschaftlichen Artikeln wird immer wieder die Klebebandtechnik als die besondere Technik zur Identifizierung und Isolierung von ultradünnen Graphitfilmen und Graphen angepriesen. Für mich war diese Entdeckung zwar wichtig, aber für sich alleine noch kein Heureka-Moment. Unser Ziel war es immer gewesen, aufregende Physik zu finden, und nicht einfach, in einem Lichtmikroskop ultradünnen Filme zu beobachten.

Noch keine paar Tage waren vergangen, seit Oleg uns auf das Klebeband gestoßen hatte, als Kostya bereits die vom Klebeband transferierten Graphitplättchen durch Silberfarbe mit elektrischen Kontakten versah. Zu unserer Überraschung leiteten die Plättchen exzellent, und selbst die Farbkontakte zeigten nur kleinen Widerstand. Die elektronischen Eigenschaften konnten jetzt untersucht werden, aber die hässlich ausschenden Proben (siehe Abbildung 2d) waren unserer Meinung nach noch nicht gut genug, um sie in einem Kryostaten zuverlässig zu vermessen. Als nächsten Schritt legten wir Spannung an, zuerst an den Glsträger und dann etwas später an den Si-Wafer als Backgate zur Bestimmung des Feldeffekts. Abbildung 2 zeigt ein Foto einer der ersten Proben. Der zentrale Teil ist ein Graphitkristall von etwa 20 nm Dicke und einer Ausdehnung ähnlich dem Durchmesser eines menschlichen Haars. Mit einer Pinzette diesen Kristall vom Klebefilm zu übertragen und dann noch mit einem Zahnstocher und Silberfarbe vier so eng beieinander liegende Kontakte zu setzen, ist Experimentierkunst auf allerhöchstem Niveau. Nicht viele Forscher haben dazu heutzutage noch den „grünen Daumen“. Ich fordere die Leser heraus, ihr eigenes Können an diesem Maßstab zu testen!

Schon das allererste selbst hergestellte Bauteil auf Glas zeigte einen deutlichen EFE, und sein Widerstand ließ sich um einige Prozent verändern. Dies mag nach wenig und eher

nach einer Fußnote klingen, aber in Anbetracht der früheren Schwierigkeiten, überhaupt einen EFE nachzuweisen, war es für mich ein echter Schock. Wenn schon diese hässlichen, aus relativ großen und dicken Plättchen gewonnenen Proben einen gewissen Feldeffekt zeigten, was würde erst geschehen, so dachte ich, wenn wir an den dünnstmöglichen Kristalliten unser ganzes Arsenal an Mikrofabrikationstechniken ausprobierten? In meinem Kopf machte es „Klick“, und ich wusste, dass wir auf etwas richtig Spannendes gestoßen waren. Dies war mein Heureka-Moment.

Was darauf folgte, war nicht länger ein Zufallsweg. Von hier an war es nur logisch, die einmal eingeschlagene Richtung beizubehalten. Jetzt galt es, die Spaltungstechniken zu verbessern sowie immer dünnere Kristalle und bessere Proben herzustellen; das taten wir. Je nach Sichtweise war die Entwicklung in dieser Zeit sowohl mühsam als auch unglaublich rasant. Monate brauchten wir zum Lernen, wie die Monoschichten durch optische und Kraftmikroskopie zu identifizieren waren. Zur Mikrofabrikation setzten wir jetzt vermehrt die Elektronenstrahlolithographie ein, um die Hall-Sonden-Bauteile sauber abzugrenzen und zu definieren. Die Kontakte setzten wir nicht mehr durch Silberfarbe, sondern durch Metallbedampfung. Dubonos leitete die Entwicklung der Mikrofabrikation und wurde von seinem Doktoranden Anatoly Firsov unterstützt. Zunächst nutzten sie die Einrichtungen in Tschernogolowka, aber wirklich beschleunigt wurde das Verfahren, als sich unsere Postdoktorandin Yuan Zhang an unserem vor Kurzem aufgebauten Lithographiesystem im Nanotech Centre in Manchester eingearbeitet hatte.

Der Übergang von Mehrfach- zu Monoschichten und von handgefertigten zu lithographischen Bauteilen war im Konzept einfach, aber in der Umsetzung nicht ohne Probleme. Wir vergeudeten viele Anstrengungen mit zahlreichen Ideen und Abstechern, die letztlich in Sackgassen endeten. Ein solcher großartiger Plan, der am Ende zu nichts geführt hat, war die Idee, durch Plasmaätzung Täfelchen aus Graphit in der Form der Hall-Sonden anzufertigen, die nach Spaltung ein schon fertig geformtes Bauteil ergeben würden – so dachte ich zumindest. Später mussten wir wieder auf das nicht prozessierte Graphit zurückgreifen. Wie sehr unser Projekt noch von Kinderkrankheiten geplagt war, zeigt sich auch daran, dass wir ursprünglich Graphenmonoschichten nur auf Si-Wafern mit einer definierten Oxidschichtdicke (von einigen nm) finden zu können glaubten. Heutzutage können wir Graphen auf praktisch jedem Substrat finden. Auch die Größe der Kristalle stieg von wenigen Mikrometern bis auf fast einen Millimeter, einfach indem wir an den Verfahren schraubten und andere Graphitquellen ausloteten.

Den wichtigsten Teil unseres Artikels aus dem Jahr 2004^[27] machten die elektrischen Messungen aus, die sehr arbeitsintensiv waren. Kostya und Serge Morozov haben mehrere Monate lang Vollzeit gemessen. Ich selbst war ebenfalls zugegen, um die Messergebnisse – oft sobald sie auf dem Bildschirm auftauchten – zu diskutieren und analysieren. Dadurch erhielten unsere Mikrofabrikanten sofort Rückmeldung. Wie immer, wenn man ein neues System vor sich hat, von dem man nicht weiß, was man erwarten kann, mussten wir mit der Interpretation der Befunde äußerst vor-

sichtig sein. Keiner Kurve trauten wir, bis sie nicht von mehreren Bauteilen reproduziert wurde. Um voreilige Schlüsse zu vermeiden, untersuchten wir über 50 ultradünne Proben. Jahre harter Arbeit haben wir so auf wenige Monate komprimiert, aber unsere Begeisterung über die immer besser werdenden Bauteile ließ uns rund um die Uhr arbeiten, das hieß im Normalfall vierzehn Stunden täglich, ohne Pause am Wochenende.

Bis Ende 2003 hatten wir uns ein vernünftiges experimentelles Bild gemacht, das bereit zur Veröffentlichung war. Zwischen diesem Zeitpunkt und der Annahme des Artikels durch *Science*, die meinen Vortrag abschließt, lag ein ziemlich großes zeitliches Loch von neun Monaten. Es war mit aufreibenden Versuchen gefüllt, die Ergebnisse in einer Topzeitschrift unterzubringen. Ständig fügten wir Daten hinzu und machten die Darstellung ansprechender. Irina war uns in diesem zeitraubenden Akt eine unschätzbare Hilfe, was nur diejenigen unter den Lesern verstehen können, die selbst schon in einer dieser Hochglanz-Zeitschriften veröffentlicht haben. Zuerst reichten wir das Manuskript bei *Nature* ein. Es wurde abgelehnt und nach Einfügen von mehr Informationen, die die Gutachter gefordert hatten, erneut abgelehnt. Laut einem der Gutachter brachte unser Beitrag „keinen ausreichenden wissenschaftlichen Fortschritt“. Die Gutachter von *Science* waren großzügiger (oder besser informiert?), und die Präsentation war besser. Rückblickend hätte ich uns auch die Zeit und Nerven sparen und bei einer Zeitschrift aus der zweiten Reihe einreichen können – auch wenn wir alle vom bahnbrechenden Charakter unserer Ergebnisse überzeugt waren. Denjenigen Lesern, die ihre Hoffnung auf eine Veröffentlichung in einem solchen Hochglanzmagazin setzen und gerade erst einen Beitrag abgelehnt bekommen haben, sei dies als Trost gesagt: Auch ihre Artikel können preisverdächtig sein!

Hartnäckige Existenz

Eines der überraschendsten Ergebnisse aus dem *Science*-Bericht war die Beobachtung, dass die isolierten Atomsschichten unter Umgebungsbedingungen weiterhin eine kontinuierliche und leitende Ebene bildeten. Selbst heute noch gibt es viele Gründe dafür, dies seltsam zu finden.

Erstens ist während der schon Jahrzehnte langen Erfahrungen mit ultradünnen Filmen die allgemeine Erkenntnis gewachsen, dass kontinuierliche Monoschichten praktisch unmöglich herzustellen sind (z.B. Lit. [28,29]). Versucht man einen Metallfilm von wenigen Nanometern Dicke durch Bedampfung zu gewinnen, so ist er niemals kontinuierlich, sondern koaguliert zu winzigen Inseln. Dieser Inselwachstum genannte Prozess ist universell und wird dadurch bewirkt, dass ein System stets versucht, seine Oberflächenenergie zu minimieren. Selbst auf epitaktischen Substraten, die durch ihre Epitaxie dem Beitrag der Oberflächenenergie entgegenwirken und auf deren Oberfläche bei der Temperatur flüssigen Heliums auch keine Atom-Migration mehr möglich ist, lassen sich nur sehr schwer Bedingungen für kontinuierliche nanometerdünne Filme finden, geschweige denn für Monoschichten.^[28,29]

Der zweite Grund zur Überraschung ist, dass die Theorie klar besagt, dass eine isolierte Graphenschicht thermodynamisch instabil sei. Rechnungen zufolge ist „*Graphen bis zu einer Größe von ungefähr 6000 Atomen die am wenigsten stabile [Kohlenstoff-]Struktur*“.^[30] Bis zu einer Zahl von ca. 24000 Atomen (ein flaches Blatt von etwa 25 nm Größe) sind verschiedene dreidimensionale (3D-)Konfigurationen energetisch gegenüber der zweidimensionalen (2D-)Geometrie bevorzugt.^[30,31] Bei größeren Strukturen ist das Graphenblatt der Theorie zufolge wiederum instabil, aber jetzt in Bezug auf das Einrollen. Dieser Schluss wurde aus einem Vergleich der konkurrierenden Beiträge aus Biege- und Oberflächenenergie gezogen.^[32,33] Die Rechnungen wurden spezifisch für Kohlenstoff durchgeführt, aber die zugrundeliegende Physik steht mit dem Konzept des Inselwachstums durch Minimierung der Oberflächenenergie in Verbindung.

Drittens können isolierte 2D-Kristalle nicht ohne ein epitaktisches Substrat wachsen, das zusätzliche Atombindungen zur Verfügung stellt. Dies folgt aus dem Landau-Peierls-Argument, dass die Dichte der thermischen Fluktuationen für einen 2D-Kristall im 3D-Raum mit zunehmender Temperatur divergiert.^[1] Zwar ist die Divergenz nur logarithmisch, aber zum Kristallwachstum sind normalerweise hohe Temperaturen erforderlich, um eine genügend hohe Mobilität der Atome zu gewährleisten. Das bedeutet, dass 2D-Kristalle ein elastischeres Gitter mit geringer Schubsteifigkeit haben müssen. In Kombination schränken diese beiden Bedingungen die erreichbare Größe L von atomaren 2D-Kristallen auf ein bestimmtes Maß ein. So lässt sich L als $\approx a \exp(E/T_G)$ bestimmen, wobei $a \approx 1 \text{ \AA}$ der Gitterabstand ist, $E \approx 1 \text{ eV}$ die atomare Bindungsenergie und T_G die Wachstumstemperatur. Diese Überlegungen sollten aber auf Graphen bei Raumtemperatur nicht angewendet werden ($300 \text{ K} \cong 0.025 \text{ eV}$), denn im Ergebnis würden astronomische Größen erhalten. Kristallwachstum benötigt normalerweise Temperaturen T_G im Bereich der Bindungsenergie, und der unordnungserzeugende Mechanismus ist bei viel tieferen Temperaturen irrelevant. Hier muss hinzugefügt werden, dass im Prinzip Graphen bei Raumtemperatur durch Selbstorganisation wachsen könnte, aber dies wurde bislang nur für nanometergroße Graphenblättchen erreicht.^[34]

Der vierte und vielleicht wichtigste Grund zur Überraschung ist die Stabilität von Graphen unter normalen Umgebungsbedingungen. Die Oberflächen von Materialien reagieren mit Luft und Feuchtigkeit, und einlagiges Graphen hat nicht nur eine, sondern zwei Oberflächen, was die Reaktivität noch erhöht. Normalerweise wird Oberflächenforschung im Ultrahochvakuum und häufig auch bei der Temperatur von Flüssighelium betrieben, um die Oberflächen stabil und von reaktiven Spezies fernzuhalten. So ist zum Beispiel Gold eines der inertesten Materialien der Natur, aber selbst hier lässt sich kaum vermeiden, dass die Oberflächenschichten teilweise von Luft oxidiert werden. Welche Chancen kann dann eine Monoschicht haben, unter normalen Umgebungsbedingungen inert zu bleiben?

Graphen kümmert sich um all dies nicht, und die Frage nach dem Warum zu untersuchen, ist äußerst lehrreich. Zunächst beginnt jedes Verfahren zur Herstellung von Graphen mit dem 3D- und nicht mit 2D-Wachstum. Die ersten Gra-

phenschichten bilden sich entweder im Volumenmaterial oder auf der Oberfläche eines epitaktischen Substrats, was divergierende thermische Fluktuationen ausschaltet. Die Wechselwirkung kann relativ schwach sein, wie bei Graphen auf Graphit,^[35] ist aber immer vorhanden. Auf diese Weise entgeht Graphen dem Landau-Peierls-Argument und ebenso der Inselbildung und der Bildung von 3D-Strukturen. Zweitens wird der Spaltprozess oder das Ablösen vom Substrat normalerweise bei Raumtemperatur durchgeführt. Somit ist die Energiebarriere stets hoch genug, dass die Atomebenen auch ohne Substrat in einer isolierten, nicht eingerollten Form existieren können,^[36] obwohl diese eigentlich die energetisch ungünstigere ist. Werden sie auf ein Substrat übertragen, reicht die Van-der-Waals-Wechselwirkung aus, um das Graphenblatt vor dem Einrollen zu bewahren. Drittens ist Graphit chemisch inerter selbst als Gold. Obwohl Graphen reaktiver als Graphit ist und mit Luft und Verunreinigungen bei Raumtemperatur schwach reagiert, werden seine Gitterstruktur und seine hohe Leitfähigkeit dadurch nicht beeinträchtigt.^[37,38] Erst bei Temperaturen über 300°C nimmt Graphen an der Luft irreversiblen Schaden. Offenbar haben wir es mit unseren normalen Umgebungsbedingungen gerade noch richtig getroffen, um das Überleben des Graphitgitters sicherzustellen.

Requiem für brillante Ideen

Die wissenschaftliche Literatur ist voll von brillanten Ideen, die nicht funktioniert haben. Danach die Literatur zu durchforsten, ist keine gute Idee. Wenn man ein neues Projekt beginnt, reichen normalerweise einige wenige gute Übersichten aus, um sicherzugehen, dass man nicht das Rad neu erfindet. Die Alternative kann wirklich schädlich sein. Ich habe eine Menge vielversprechende Forscher kennengelernt, die ihrem Talent später nicht gerecht wurden, weil sie die Zeit mit Literaturrecherche verbrachten, anstatt sich auf neue Phänomene zu konzentrieren. Nach monatelanger Recherche kamen sie unausweichlich zum gleichen Schluss: Alles, was sie planten, war schon einmal gemacht worden. Weil es dann keinen Grund mehr gab, ihre eigenen Ideen zu verwirklichen, begannen sie folgerichtig mit neuer Literaturrecherche. Man muss sich aber klarwerden, dass keine Idee wirklich neu ist. Egal wie brillant sie ist, jede folgt immer nur früherem Wissen, und bei so vielen klugen Leuten kann man darauf wetten, dass irgendjemand zuvor schon eine ähnliche Idee gehabt hat. Dies soll keinesfalls als Entschuldigung herhalten, es gleich sein zu lassen, denn von Ort zu Ort sind die Umstände anders, und die technischen Möglichkeiten ändern sich ebenfalls mit der Zeit. Infolge der vielen neuen Technologien kann es durchaus sein, dass früher gescheiterte Ideen jetzt vielleicht unerwartet gut funktionieren.

In den Jahren 2002/2003 hatten meine vereinigten Gedankenwolken, die ich nicht einmal eine brillante Idee nennen möchte, ausreichend Substanz, um das Projekt endgültig auf die Beine zu stellen. Auch boten sie uns den Ariadnefaden, der uns bei der Entscheidung über die einzuschlagende Richtung weiterhalf. Die Literaturrecherche machten wir zum angemessenen Zeitpunkt, nämlich nachdem

wir uns schon ungefähr informiert hatten, insbesondere aber beim Aufbereiten der Ergebnisse für die Publikation. Außer der für die Gedankenwolken relevanten Literatur zitiert unser *Science*-Paper noch die problematische Herstellung von isolierten 2D-Kristallen, ihre thermodynamische Instabilität, das Einrollen im Nanomaßstab sowie Artikel über das epitaktische Wachstum. Diese Zitate waren wichtig, um unseren experimentellen Fortschritt zu belegen. Im Folgeartikel von 2007 wird dann eine erste Gesamtübersicht über die frühere Literatur gegeben.^[1] Seitdem aktualisiere ich all meine Konferenzvorträge mit jedem neu aufgetauchten Artikel von historischer Bedeutung. Mit diesem Aufsatz habe ich nun die erste Gelegenheit, den geschichtlichen Teil auch schriftlich mit neuen Zitaten zu versehen. Darüber hinaus teilen mir auf meine kürzliche Anfrage nach weiteren historischen Einblicken hin^[39] zahlreiche Forscher noch viele andere frühere Ideen und Beiträge mit, die ich der Vollständigkeit halber an dieser Stelle würdigen möchte.

Inkarnationen von Graphen

Betrachten wir die ganze Geschichte des Graphens, sollten wir wohl mit einer Beobachtung von Benjamin Brodie beginnen.^[40] Als der britische Chemiker 1859 Graphit starken Säuren aussetzte, erhielt er eine Substanz, die er „Kohlenäsäure“ nannte (Abbildung 3a). Brodie glaubte, dass er „Graphon“ entdeckt hatte, eine neue Form von Kohlenstoff mit einem Molekulargewicht von 33. Heute wissen wir, dass er eine Suspension winziger Kristalle von Graphenoxid beobachtet hatte, also dicht mit Hydroxygruppen und Epoxidfunktionen bedeckte Graphenblätter.^[41] Während der folgenden hundert Jahre erschienen mehrere Artikel zur Lamellenstruktur von Graphitoxid, aber der nächste wirklich einschneidende Schritt in der Graphengeschichte war der

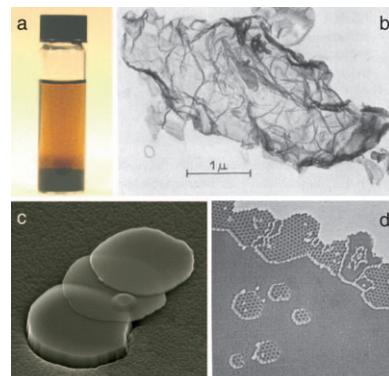


Abbildung 3. Die Vorgeschichte von Graphen. a) Graphen, wie es wahrscheinlich Brodie vor 150 Jahren gesehen hat. Graphitoxid am Gefäßboden löst sich in Wasser als gelbe Suspension aus Graphenflocken. b) TEM-Bild von ultradünnen graphitischen Flocken aus den frühen 1960er Jahren (Wiedergabe aus Lit. [43] mit Genehmigung). c) Rasterelektronenmikroskopische (SEM-)Aufnahme von dünnen Graphitplättchen, die durch Spaltung erzeugt wurden (ähnlich den Bildern in Lit. [60]). d) STM von auf Pt gewachsenem Graphen (Wiedergabe aus Lit. [53] mit Genehmigung). Das Bild hat die Maße 100×100 nm². Die hexagonale Überstruktur hat eine Periode von ca. 22 Å und ist ein Resultat der Wechselwirkung von Graphen mit dem Metallsubstrat.

Nachweis, dass diese „Kohlensäure“ aus in der Lösung verteilten Atomschichten bestand. Ruess und Vogt, die 1948 durch Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) einen eingetrockneten Tropfen einer Suspension von Graphenoxid auf einem TEM-Gitter betrachteten, beschrieben bis zu einigen Nanometern dicke, geknitterte Flocken.^[42] Die Untersuchungen wurden von der Gruppe um Hofmann weitergeführt. 1962 versuchten Hofmann und Boehm die dünnstmöglichen Fragmente von reduziertem Graphitoxid zu identifizieren und beschrieben manche von ihnen als Monoschichten (Abbildung 3b).^[43]

Bis 2009/2010 fand diese bemerkenswerte Beobachtung nur wenig Beachtung. Dazu muss ich sagen, dass 1962 die Identifizierung auf relativem TEM-Kontrast beruhte; dieser Ansatz würde modernen Kriterien nicht mehr standhalten, weil der Kontrast stark vom Fokus abhängig ist.^[44] So versuchten Rahul Nair und ich das Gleiche, konnten aber allein durch TEM-Kontrast erwartungsgemäß nicht zwischen Monoschichten und etwas dickeren Flocken unterscheiden. Erst vierzig Jahre nach dem Artikel von 1962 wurden Graphenmonoschichten eindeutig durch TEM identifiziert, und zwar durch Zählen der Faltungslinien.^[45–47] Dennoch kann die Arbeit von Boehm und Hofmann meiner Meinung nach als die erste Beobachtung von Graphen gelten, denn in der Probe waren mit Sicherheit auch Monoschichten vorhanden, und die Idee war richtig. Darüber hinaus haben Boehm und seine Kollegen 1986 selbst den Ausdruck Graphen eingeführt. Sie leiteten das Wort aus einer Kombination von „Graphit“ und dem Suffix für polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe ab.^[48]

Eine weitere wichtige Richtung der Graphenforschung vor 2004 war neben den TEM-Beobachtungen das epitaktische Aufwachsen. Ultradünne graphitische Filme und sogar manchmal Monoschichten wurden auf Metallsubstraten,^[49–53] nichtleitenden Carbiden^[54–57] und Graphit^[35] gezüchtet (Abbildung 3d). Die ersten mir bekannten Artikel zu dem Thema reichen bis 1970 zurück. Grant und Haas beschrieben graphitische Filme auf Ru und Rh^[49] und Blakely et al. solche auf Ni.^[50] Epitaktisches Wachstum auf Nichtleitersubstraten wurde zuerst 1975 von van Bommel et al. gezeigt,^[54] und Oshima et al. identifizierten weitere Carbide, die sich zum Graphenwachstum eignen (z.B. TiC).^[55] Analysiert wurden die Filme in der Regel durch Oberflächentechniken, die über große Bereiche mitteln und kaum Aussagekraft bezüglich der Kontinuität und Qualität des Films haben. Zur Sichtbarmachung und lokalen Analyse wurden gelegentlich auch STM-Techniken eingesetzt.

Noch wichtiger als diese Techniken waren die früheren Versuche, ultradünne Filme aus Graphit durch Spaltung zu erzeugen, ähnlich unserer Technik von 2003. Schon 1990 berichtete die Gruppe von Kurz, dass sie „optisch dünne Schichten mit transparentem Klebeband“ abgelöst und mit diesen Proben dann die Ladungsträgerdynamik in Graphit untersucht hatten.^[58] 1995 beschrieben Ebbesen und Hiura wenige Nanometer dünne „Origamis“, die sie auf HOPG durch Rasterkraftmikroskopie (AFM) sichtbar machten.^[59] Ruoff et al. fotografierten dünne Graphitplättchen durch SEM (Abbildung 3c).^[60] Gan et al. beschrieben 2003 Monoschichten, die sie durch STM auf HOPG gespalten hatten.^[61]

Weiterhin wurden dünne Graphitfilme auf ihre elektrischen Eigenschaften getestet. Zwischen 1997 und 2000 gelang Ohashi et al. die Spaltung von Kristallen bis zu einer Dicke von etwa 20 nm. Unter anderem untersuchten sie die Schubnikow-de-Haas-Oszillation und beobachteten tatsächlich einen elektrischen Feldeffekt mit einer Widerstandsänderung von bis zu 8 %.^[62,63] Außerdem erhielt die Gruppe von Ebbesen mikrometergroße graphitische Scheiben mit Dicken von wenigstens 60 Schichten und maß ihre elektrischen Eigenschaften.^[64]

Auf die Theorie möchte ich nur kurz eingehen (mehr in Lit. [1,65]). Theoretisch kennt man Graphen („eine Monoschicht von Graphit“) seit der Berechnung seiner Bandstruktur durch Wallace 1947. Ziel war es, ausgehend von diesen Rechnungen die elektronischen Eigenschaften von Graphit zu verstehen.^[66] Semenoff und Haldane erkannten, dass Graphen für die (2+1)-dimensionale Quantenelektrodynamik (QED) ein ausgezeichnetes Kondensierte-Materie-Analogon darstellt.^[67,68] Seither diente Graphen als Modell zur Untersuchung von verschiedenen Fragestellungen der QED (siehe z.B. Lit. [69,70]). Viele Theorien wurden im Zuge der elektronischen Untersuchung von Kohlenstoff-Nanoröhren (aufgerollten Graphenbändern) auch weit vor 2004 experimentell erprobt und bestätigt. Viele wichtige theoretische Arbeiten verdanken wir Ando, Dresselhaus und Mitarbeitern (siehe z. B. Lit. [71–73]).

Die Geschichte von Graphen möchte ich nicht beschließen, ohne noch einige frühere Ideen zu würdigen. Ebbesen und Hiura sahen 1995 bereits die Möglichkeit von Nanoelektronik auf Graphenbasis voraus (zum Beispiel durch epitaktisch auf TiC gewachsene Graphenschichten).^[59] In der Patentliteratur reichen Spekulationen über „Feldeffekt-Transistoren mit pyrolytischem Graphit“ bis 1970 zurück.^[74] Ruoff et al. und Little erwähnten mir gegenüber, dass in ihren Artikeln vor 2004 die Möglichkeit von isolierten Monoschichten diskutiert und auch ein möglicher Weg dahin genannt wurde.^[60,75] Zu guter Letzt ist die Schichtstruktur von Graphit schon seit den frühen Tagen der Röntgenkristallographie bekannt, aber mit Sicherheit weiß man seit noch längerer Zeit, dass Graphit aus stapelförmig angeordneten, schwach gebundenen Graphenschichten besteht. Dieses besondere Merkmal von Graphit wurde bereits für zahlreiche Graphit-Interkalationsverbindungen genutzt^[23] – sowie natürlich beim Zeichnen. Schließlich wissen wir jetzt, dass sich isolierte Monoschichten in jedem Bleistiftstrich finden lassen, schaut man ihn sich nur genau genug in einem optischen Mikroskop an.^[2] Graphen befand sich Jahrhunderte lang buchstäblich vor unseren Augen, wurde aber nie als das erkannt, was es eigentlich ist.

Πλανήτη – Graphen

Manche der hier zitierten Gedanken und historischen Artikel mag der Leser vielleicht nicht ganz so wichtig finden, aber ich wollte unter keinen Umständen eines der Resultate aus der Zeit vor 2004 unter den Tisch fallen lassen, schon gar nicht ein experimentelles. All diese Studien gingen in die richtige Richtung, aber ihnen fehlte das große Überra-

schungsmoment, der Funke zum Auslösen des Graphengoldrauschs. Grund ist wahrscheinlich ein gemeinsames Moment der früheren Experimente. Sie waren rein beobachtend. Es wurden ultradünne graphitische Filme und manchmal sogar Monoschichten beobachtet, ohne aber die einmaligen Eigenschaften von Graphen irgendwie zu beschreiben. Die wenigen oben zitierten elektrischen und optischen Messungen wurden an dünnen Graphitfilmen durchgeführt und erfassten wiederum nicht die besondere Physik, die uns das Graphen seit 2004 offenbart hat.

Unser *Science*-Paper war ein echter Wendepunkt. Klar berichteten wir darin über die Isolierung von Graphenkristallen, deren Größe für Messungen über die reine Beobachtung im Elektronen- oder Rasterkraftmikroskop hinaus ausreichte. Klar war die dort beschriebene Methode der Graphenisolierung so naheliegend und einfach, dass sie wahrscheinlich selbst Schulkinder schon ausführen könnten. Dies alles war wichtig – aber hätten wir an der Stelle aufgehört, es beim Beobachten belassen, unsere Arbeit wäre nur ein weiteres Literaturzitat geblieben und, so glaube ich, in der Versenkung verschwunden. Nicht die Beobachtung an sich und die Isolierung von Graphen, sondern seine elektronischen Eigenschaften waren das Überraschungsmoment für die Wissenschaft. Unsere Messungen lieferten neue Erkenntnisse, die weit über die Klebebandtechnik hinausgingen und die viele Forscher so überzeugten, dass sie ebenfalls vom Graphenrausch erfasst wurden.

Die erste Neuigkeit des Artikels von 2004 war der ambipolare elektrische Feldeffekt mit einer Widerstandsänderung um einen Faktor von ca. 100. Dies ist tausendmal mehr als die wenigen Prozent Änderungen, die zuvor bei metallischen Systemen gefunden worden waren, und bedeutet einen wirklich qualitativen Unterschied. Um das zu erkennen, stelle man sich eine nanometerdünne Au-Folie vor. Egal, was man mit dieser Folie physikalisch anstellt, sie bleibt ein normales Metall mit dessen Eigenschaften. Dagegen lassen sich die Eigenschaften von Graphen schon durch Variation der Gate-Spannung verändern und einstellen. Wir können zum Beispiel Graphen von einem Zustand sehr nahe dem eines normalen Metalls mit einer Elektronenkonzentration von etwa 10^{21} cm^{-3} bis zum Metallzustand mit ähnlicher Lochkonzentration bringen. Dazwischen liegen „Halbleiter“-Zustände mit nur wenigen Ladungsträgern.

Noch bemerkenswerter ist, dass unsere Bauteile von erstaunlich hoher elektronischer Qualität waren. Ohne Schutz seiner Umgebung ausgesetzt und von beiden Seiten mit Adsorbaten und Polymer bedeckt, lag das Graphen auf mikroskopisch rauen Substraten. Trotzdem legten die Elektronen ungestreut Strecken im Submikrometerbereich zurück, als ob die Elemente da draußen sie gar nicht stören würden. Dies verstößt gegen jede Intuition und widerspricht dem allgemeinen Verständnis, dass Oberflächenforschung nur im Ultrahochvakuum betrieben werden kann und selbst unter diesen Bedingungen dünne Filme immer schlechter werden, je dünner sie sind. Selbst im Rückblick gibt eine solche elektronische Qualität Rätsel auf. Und wirklich ist sie auch noch nicht ganz verstanden.

In der Halbleiterphysik wird die elektronische Qualität in Form der Ladungsträgermobilität μ beschrieben. Unser *Sci-*

ence-Artikel nennt für Graphen bei Raumtemperatur einen Wert von $\mu \approx 10000 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ (2010 liegt dieser Wert für μ bereits bei Raumtemperatur 10-mal und bei tiefen Temperaturen 100-mal höher^[76,77]). Für den Leser mag 10000 zunächst nur eine weitere Zahl sein. Um ihre Bedeutung zu erkennen, vergegenwärtige man sich, dass wir unsere Bauteile von 2004 zum Beispiel aus reduziertem Graphenoxid hergestellt haben, das wegen eines irreversibel geschädigten Kristallgitters selbst nur einen Wert von $\mu \approx 1 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ aufwies.^[78] In unserem zweiten Artikel zu Graphen beschrieben wir 2D-Dichalkogenide mit ähnlich niedrigem Wert von μ .^[79] Dieses Material fand seitdem nie mehr größeres Interesse. Einzig der ballistische Transport über Distanzen im Submikrometerbereich, der 2004 und danach die Beobachtung vieler Quanteneffekte möglich machte, hat letztlich das gewaltige Interesse an Graphen entfacht. Dies alles gäbe es bei einem kleineren μ -Wert von weniger als mehreren $1000 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ nicht.

Wäre Graphen nicht von so hoher Qualität und Wandelbarkeit, gäbe es keine neue Graphenphysik und auch keinen Graphenboom. In dieser Hinsicht hat die Graphengeschichte etwas mit jener der Planeten unseres Sonnensystems zu tun: Diese wurden von den alten Griechen zunächst die „Wanderer“, πλανήτες, genannt. Nachdem später die Physik hinter diesem Wandern geklärt war, fasste man die Planeten ganz anders auf als πλανήτες. Auf ähnliche Weise änderte sich in den letzten sechs Jahren die Auffassung über Graphen von Grund auf, nachdem sein wahres Wesen aufgedeckt worden war. Unser *Science*-Artikel warf einen ersten Blick auf Graphen in seiner neuen Inkarnation als ein hochwertiges 2D-Elektronensystem und darüber hinaus.

Die Magie des flachen Kohlenstoffs

Was ist diese neue Inkarnation? Für mich markiert 2004 lediglich den Ausgangspunkt, um viele einmalige Eigenschaften von Graphen zu erforschen. In der Folge zeigten wir, dass die Ladungsträger in Graphen masselose Fermionen sind, die durch die Dirac- statt durch die Standard-Schrödinger-Gleichung beschrieben werden.^[80] Ein anderes Gewand tragen die Elektronen im doppelschichtigen Graphen und sind nun massebehaftete Dirac-Fermionen.^[81] Dies wurde im Zuge der Beobachtung von zwei neuen Arten des integralen Quanten-Hall-Effekts entdeckt, der durch diese beiden Arten von Dirac-Fermionen erklärt werden kann.^[1,65] Eine weitere Entdeckung war, dass Graphen im Grenzfall verschwindender Ladungsträger metallisch bleibt, selbst wenn in einem mikrometergroßen Bauteil nur noch ein paar Elektronen vorhanden sind.^[1,77] Nach unseren Experimenten weist Graphen eine universelle optische Leitfähigkeit von $\pi e^2/2h$ auf, und seine Opazität im Sichtbaren beträgt $\pi\alpha$, mit α als der Feinstrukturkonstanten.^[82] Wir schlugen vor, dass das Phänomen des Klein-Tunnelns, das in der relativistischen Quantenphysik seit vielen Jahrzehnten zwar bekannt war, aber als nicht beobachtbar galt, mit unseren Graphenbauteilen detektiert werden könnte.^[83] Mehrere Gruppen haben dies später experimentell bestätigt. Anderen waren wir glücklich um eine Nasenlänge voraus, indem wir doppel-

schichtiges Graphen als Halbleiter mit einstellbarer Bandlücke präsentierten^[84] und Graphen in funktionierende nanometergroße Bauteile zerlegten.^[85] Wir stellten Sensoren zum Einzelmolekülnachweis vor, die empfindlicher als jeder frühere Sensor sind.^[38] Wir schlugen vor, dass mechanische Spannung im Graphen pseudomagnetische Felder induziert, die wiederum seine elektronischen Eigenschaften verändern,^[86] und erörterten dann eine Möglichkeit, wie man gleichförmige Pseudofelder erhalten und den Quanten-Hall-Effekt ohne externes Magnetfeld beobachten kann.^[87] Ein halbes Jahr später wurden experimentell Pseudomagnetfelder über 400 T erreicht. Wir machten den ersten Schritt hin zur Chemie von Graphen und stellten die Derivate Graphan und stöchiometrisches Fluorgraphan her.^[88,89] Diese Liste von schönen Phänomenen, die wir und andere Gruppen gefunden haben, ist noch nicht einmal vollständig. Viele andere Forscher haben zahlreiche weitere aufregende Entdeckungen gemacht, die Graphen in seinen neuen Status als fast schon zauberhaftiges System katapultierten.

Ode an die Eine

Nach der Lektüre über die phantastischen Eigenschaften von Graphen mag sich der Leser fragen, warum nicht auch andere Stapel bildende Atom-Monoschichten, wie im Graphit, ähnliche Eigenschaften haben. Jedes Graphitderivat hat etwas mit seiner Stammverbindung gemein, aber im Fall von Graphen sind die Unterschiede zwischen Stammverbindung und Derivaten fundamental. Dies lässt sich leichter verstehen, wenn wir vereinfacht Graphen zunächst mit seiner Doppelschicht vergleichen. Schon hier sind die Unterschiede essenziell.

Zunächst weist Graphen eine Steifheit und mechanische Zugfestigkeit in Rekordhöhe auf.^[90] In Form seiner Doppelschicht wird diese Festigkeit durch die Möglichkeit des gegenseitigen Verrutschens der beiden Schichten teilweise wieder zunichte gemacht. Schon deshalb ist es ein grundlegender Unterschied, ob etwa in Kompositen Graphen oder dickere Plättchen eingesetzt werden. Zweitens unterscheidet sich die Reaktivität von Graphen je nachdem, ob eine oder zwei Oberflächen der Monoschicht freiliegen. So kann zum Beispiel atomarer Wasserstoff an Graphen von einer Seite aus nicht binden, bildet aber eine stöchiometrische Verbindung (Graphan), wenn beide Oberflächen exponiert sind. Dies macht Graphen viel reaktiver als seine Doppelschicht. Drittens spürt Graphit ein elektrisches Feld nur bis zum Abstand von etwa dem Schichtabstand, was selbst schon bei einer Doppelschicht zum Tragen kommt. Im Fall von mehrschichtigem Graphen kann das elektrische Feld höchstens ein paar oberflächennahe Atomebenen dotieren, die inneren Schichten bleiben unbeeinflusst. Daher ist es naiv, über die Verwendung von mehrschichtigem Graphit in aktiven elektronischen Bauelementen zu spekulieren. Viertens sind die Ladungsträger einer Monoschicht masselose Dirac-Fermionen, in der Doppelschicht hingegen massebehaftet. Dadurch unterscheiden sie sich in manchen elektronischen Eigenschaften wesentlich, zum Beispiel in der Schubnikow-de-Haas-Oszillation, dem Quanten-Hall-Effekt, dem Klein-Tunneln und so

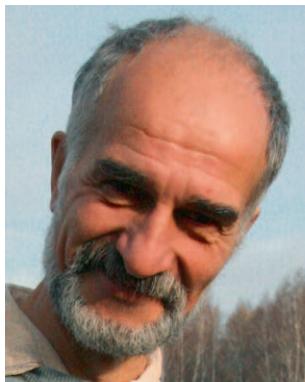
weiter. Das Sorites-Paradoxon bezeichnet den Punkt, an dem ein Haufen durch das einzelne Abtragen der Körner nicht mehr länger ein Haufen ist. Im Fall von Graphen unterscheidet sich schon die Doppel- so stark von der Monoschicht, dass bereits zwei Schichten einen Haufen bilden.

An Kollegen und Freunde

Unser *Science*-Artikel war eine Gemeinschaftsleistung, und ich möchte hiermit nochmals – im Namen von Kostya und mir – allen anderen sehr danken, die dazu Beiträge geleistet haben. Serge Morozov war und ist immer noch unsere „Multitasking-Messmaschine“ und arbeitet im Rund-um-die-Uhr-Modus, wenn er in Manchester ist. Seine Fertigkeiten in allem, was elektrische Messungen betrifft, sind unübertroffen. Von jeder seiner Kurven weiß ich genau, dass sie absolut zuverlässig ist, und niemals ist es nötig zu fragen, ob dieses oder jenes geprüft und gegengeprüft worden ist. Da Jiang war bei uns vom allerersten Moment an, und es ist schade, dass ich ihn von dem Projekt abziehen musste. Es war für einen einzelnen neuen Doktoranden einfach nicht machbar. Sergey Dubonos und Yuan Zhang haben die gesamten Bauteile hergestellt, ohne die unsere Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Zutiefst betrübt mich, dass sich unsere Lebenswege später getrennt haben, und ganz besonders bedaure ich, dass Sergey die Mikrofabrikation mit der Ziegenzüchtung getauscht hat. Anatoly Firsov möchte ich für die Hilfe bei der Herstellung dieser Bauteile danken. Irina Grigorieva unterstützte uns nicht nur bei der Rasterelektronenmikroskopie, sondern vor allem auch mit dem Schreiben des Manuskripts von 2004 (Abbildung 4).

Das Ende ist wiederum nur der Anfang von weiterer harter Arbeit zusammen mit vielen Kollegen und Mitarbeitern. Ohne Mischa Katsnelson, der uns so viel theoretische Hilfe zukommen ließ, wie ein Experimentator sich nur erträumen kann, wären unsere raschen Fortschritte nicht möglich gewesen. Seit 2006 erfreue ich mich auch der Zusammenarbeit mit anderen großartigen Theoretikern wie Antonio Castro Neto, Paco Guinea, Nuno Peres, Wolodja Fal'ko, Leonid Levitov, Allan MacDonald, Dima Abanin, Tim Wehling und deren Mitarbeitern. Insbesondere bei Antonio und Paco möchte ich mich für die zahlreichen erhellen Diskussionen und unterhaltsamen Wortgefechte bei vielen gemeinsamen Abendessen bedanken. Die Liste der Experimentatoren ist noch länger und schließt Philip Kim, Ernie Hill, Andrea Ferrari, Eva Andrei, Alexej Kuzmenko, Uschi Bangert, Sasha Grigorenko, Uli Zeitler, Jannik Meyer, Marek Potemskii und viele Kollegen ein.

Philip verdient eine besondere Erwähnung. Seine Gruppe reichte im August 2004, gerade vor der Veröffentlichung unseres *Science*-Beitrags, einen anderen wichtigen Artikel ein,^[91] in dem die elektronischen Eigenschaften von ultradünnen Graphitplättchen (bis zu ungefähr 35 Schichten) beschrieben wurden. Abgesehen von den dickeren Proben verfolgte Philips Gruppe die gleiche Richtung wie wir in unserem gewürdigten Artikel. Wie nahe sie dran waren, lässt sich daran ablesen, dass Philip nach Übernahme der Klebebandtechnik bereits Anfang 2005 mit der Untersuchung von Mo-



Sergey Dubonos



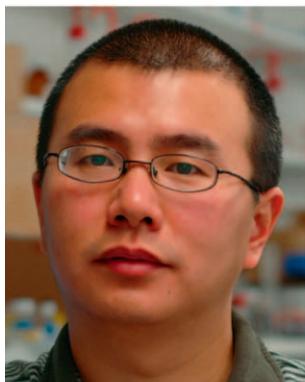
Serge Morozov



Irina Grigorieva



Yuan Zhang



Da Jiang



Anatoly Firsov

Abbildung 4. Diejenigen, die unseren ersten Graphenartikel möglich gemacht, aber nicht den Preis gewonnen haben.

noschichten begann. Er holte sehr schnell auf, und 2005 haben unsere beiden Gruppen unabhängig voneinander in *Nature* Beiträge eingereicht, die dort dann zusammen publiziert wurden. Beide Artikel schilderten die überaus wichtige Beobachtung von Dirac-Fermionen in einlagigem Graphen.^[80,92] Später hatte ich das Vergnügen, mit Philip zwei gemeinsame Artikel zu verfassen, die in *Science* und im *Scientific American* erschienen. Für mich persönlich markierten die beiden in *Nature* veröffentlichten Artikel den Wendepunkt. Ab hier gab es in der großen Halbleitergemeinschaft kein Gemauerschel mehr, dass „*die Ergebnisse so schwierig zu reproduzieren seien wie die von Hendrik Schön*“, und im Flur warnten mich nicht mehr Freunde: „*Sei etwas vorsichtiger, weißt du*

...“. Philip bin ich dafür ganz besonders dankbar, und viele hörten mich – vor und nach dem Nobelpreis – sagen, dass ich mich geehrt fühlen würde, diesen mit ihm zu teilen.

Zu guter Letzt möchte ich vielen aufgeweckten jungen und auch weniger jungen Kollegen danken: Peter Blake, Rahul Nair, Roman Gorbachev, Leonid Ponomarenko, Fred Schedin, Daniel Elias, Sasha Mayorov, Rui Yang, Vasyl Kravets, Zhenhua Ni, Wencai Ren, Rashid Jalil, Ibtsam Riaz, Soeren Neubeck, Tariq Mohiuddin und Tim Booth. Während der letzten sechs Jahre haben sie hier in Manchester als Doktoranden und Postdoktoranden gearbeitet – ich vermeide wie stets das feudale Wort „meine“.

Zum Schluss danke ich für die optimale finanzielle Unterstützung durch den EPSRC, nämlich in Form des Responsive Mode. Ohne ihn wäre dieser Nobelpreis absolut unmöglich gewesen. Auch möchte ich der Royal Society und dem Leverhulme Trust für die Reduktion meiner Lehrverpflichtungen danken, die mir die Konzentration auf das Projekt gestattete. Unterstützt wurde ich außerdem vom Office of Naval Research und dem Air Force Office of Scientific Research, was uns ein noch schnelleres Vorankommen ermöglichte. Der Körber-Stiftung möchte ich für den Preis von 2009 danken. Keine freundlichen Worte kann ich dagegen für die EU-Forschungsrahmenprogramme aufbringen, für die wohl, mit Ausnahme des Europäischen Forschungsrats, einzig Europhobe Worte des Lobes finden werden, da sie die ganze Idee eines effektiv arbeitenden Europas diskreditieren.

Eingegangen am 17. Februar 2011
Online veröffentlicht am 5. Juli 2011

Übersetzt von Dr. Roswitha Harrer, Otterberg

-
- [1] A. K. Geim, K. S. Novoselov, *Nat. Mater.* **2007**, *6*, 183.
 - [2] A. K. Geim, P. Kim, *Sci. Am.* **2008**, *298*, 90.
 - [3] A. K. Geim, *Science* **2009**, *324*, 1530.
 - [4] A. K. Geim, *JETP Lett.* **1989**, *50*, 389.
 - [5] S. J. Bending, K. von Klitzing, K. Ploog, *Phys. Rev. Lett.* **1990**, *65*, 1060.
 - [6] A. K. Geim, P. C. Main, P. H. Beton, P. Streda, L. Eaves, C. D. Wilkinson, S. P. Beaumont, *Phys. Rev. Lett.* **1991**, *67*, 3014.
 - [7] A. K. Geim, P. C. Main, P. H. Beton, L. Eaves, C. D. W. Wilkinson, S. P. Beaumont, *Phys. Rev. Lett.* **1992**, *69*, 1248.
 - [8] A. K. Geim, S. V. Dubonos, J. G. S. Lok, I. V. Grigorieva, J. C. Maan, L. T. Hansen, P. E. Lindelof, *Appl. Phys. Lett.* **1997**, *71*, 2379.
 - [9] I. V. Grigorieva, *Supercond. Sci. Technol.* **1994**, *7*, 161.
 - [10] J. S. Baker, S. J. Judd, *Water Res.* **1996**, *30*, 247.
 - [11] A. Geim, *Phys. Today* **1998**, *51*(9), 36.
 - [12] K. Autumn, Y. A. Lang, S. T. Ksieh, W. Zesch, W. P. Chan, T. W. Kenny, R. Fearing, R. J. Full, *Nature* **2000**, *405*, 681.
 - [13] A. K. Geim, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, K. S. Novoselov, A. A. Zhukov, S. Y. Shapoval, *Nat. Mater.* **2003**, *2*, 461.
 - [14] G. Lamarche, F. Lamarche, A. M. Lamarche, *Europhys. Lett.* **2001**, *53*, 378.
 - [15] I. I. Barbulina, K. S. Novoselov, S. V. Morozov, S. V. Dubonos, M. Missous, A. O. Volkov, D. A. Christian, I. V. Grigorieva, A. K. Geim, *Appl. Phys. Lett.* **2006**, *88*, 013901.
 - [16] T. Cohen-Karni, Q. Qing, Q. Li, Y. Fang, C. M. Lieber, *Nano Lett.* **2010**, *10*, 1098.
 - [17] N. Mott, *A Life in Science*, Taylor & Francis, **1986**.
 - [18] E. Bose, *Phys. Z.* **1906**, *7*, 373.

- [19] A. V. Butenko, Dm. Shvarts, V. Sandomirsky, Y. Schlesinger, R. Rosenbaum, *J. Appl. Phys.* **2000**, 88, 2634.
- [20] V. T. Petrushov, V. N. Antonov, B. Nilsson, *J. Phys. Condens. Matter* **1991**, 3, 9705.
- [21] R. E. Glover, M. D. Sherrill, *Phys. Rev. Lett.* **1960**, 5, 248.
- [22] C. H. Ahn, A. Bhattacharya, M. Di Ventra, J. N. Eckstein, C. D. Frisbie, M. E. Gershenson, A. M. Goldman, I. H. Inoue, J. Mannhart, A. J. Millis, A. F. Morpurgo, D. Natelson, J.-M. Triscone, *Rev. Mod. Phys.* **2006**, 78, 1185.
- [23] M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, *Adv. Phys.* **1981**, 30, 139.
- [24] Y. Kopelevich, P. Esquinazi, J. H. S. Torres, S. Moehlecke, *J. Low Temp. Phys.* **2000**, 119, 691.
- [25] H. Kempa, P. Esquinazi, Y. Kopelevich, *Phys. Rev. B* **2002**, 65, 241101.
- [26] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Dubonos, E. W. Hill, I. V. Grigorieva, *Nature* **2003**, 426, 812.
- [27] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, A. A. Firsov, *Science* **2004**, 306, 666.
- [28] J. A. Venables, G. D. T. Spiller, M. Hanbucken, *Rep. Prog. Phys.* **1984**, 47, 399.
- [29] J. W. Evans, P. A. Thiel, M. C. Bartelt, *Surf. Sci. Rep.* **2006**, 61, 1.
- [30] O. A. Shenderova, V. V. Zhirnov, D. W. Brenner, *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.* **2002**, 27, 227.
- [31] D. Tománek, W. Zhong, E. Krastev, *Phys. Rev. B* **1993**, 48, 15461.
- [32] R. Setton, *Carbon* **1996**, 34, 69.
- [33] S. Braga, V. R. Coluci, S. B. Legoas, R. Giro, D. S. Galvão, R. H. Baughman, *Nano Lett.* **2004**, 4, 881.
- [34] C. D. Simpson, J. D. Brand, A. J. Berresheim, L. Przybilla, H. J. Räder, K. Müllen, *Chem. Eur. J.* **2002**, 8, 1424.
- [35] A. Affoune, B. Prasad, H. Sato, T. Enoki, Y. Kaburagi, Y. Hishiyama, *Chem. Phys. Lett.* **2001**, 348, 17.
- [36] T. J. Booth, P. Blake, R. R. Nair, D. Jiang, E. W. Hill, U. Bangert, A. Bleloch, M. Gass, K. S. Novoselov, M. I. Katsnelson, A. K. Geim, *Nano Lett.* **2008**, 8, 2442.
- [37] S. Ryu, L. Liu, S. Berciaud, Y. J. Yu, H. Liu, P. Kim, G. W. Flynn, L. E. Brus, *Nano Lett.* **2010**, 10, 4944.
- [38] F. Schedin, A. K. Geim, S. V. Morozov, E. W. Hill, P. Blake, M. I. Katsnelson, K. S. Novoselov, *Nat. Mater.* **2007**, 6, 652.
- [39] Letter to the Editor, „October 22, 2004: Discovery of Graphene“ www.aps.org/publications/apsnews/201001/letters.cfm.
- [40] B. C. Brodie, *Philos. Trans. R. Soc. London* **1859**, 149, 249.
- [41] D. R. Dreyer, S. Park, C. W. Bielawski, R. S. Ruoff, *Chem. Soc. Rev.* **2010**, 39, 228.
- [42] G. Ruess, F. Vogt, *Monatsh. Chem.* **1948**, 78, 222.
- [43] H. P. Boehm, A. Clauss, G. O. Fischer, U. Hofmann, *Z. Anorg. Allg. Chem.* **1962**, 316, 119.
- [44] J. C. Meyer, A. K. Geim, M. I. Katsnelson, K. S. Novoselov, D. Oberfell, S. Roth, C. Girit, A. Zettl, *Solid State Commun.* **2007**, 143, 101.
- [45] H. Shioyama, *J. Mater. Sci. Lett.* **2001**, 20, 499.
- [46] L. M. Viculis, J. J. Mack, R. B. Kaner, *Science* **2003**, 299, 1361.
- [47] S. Horiuchi, T. Gotou, M. Fujiwara, T. Asaka, T. Yokosawa, Y. Matsui, *Appl. Phys. Lett.* **2004**, 84, 2403.
- [48] H. P. Boehm, R. Setton, E. Stumpf, *Carbon* **1986**, 24, 241.
- [49] J. T. Grant, T. W. Haas, *Surf. Sci.* **1970**, 21, 76.
- [50] J. M. Blakely, J. S. Kim, H. C. Potter, *J. Appl. Phys.* **1970**, 41, 2693.
- [51] R. Rosei, M. De Crescenzi, F. Sette, C. Quaresima, A. Savois, P. Perfetti, *Phys. Rev. B* **1983**, 28, 1161.
- [52] C. F. McConville, D. P. Woodruff, S. D. Kevan, M. Weinert, J. W. Davenport, *Phys. Rev. B* **1986**, 34, 2199.
- [53] T. A. Land, T. Michely, R. J. Behm, J. C. Hemminger, G. Comsa, *Surf. Sci.* **1992**, 264, 261.
- [54] A. J. van Bommel, J. E. Crombeen, A. van Tooren, *Surf. Sci.* **1975**, 48, 463.
- [55] A. Nagashima, K. Nuka, K. Satoh, H. Itoh, T. Ichinokawa, C. Oshima, S. Otani, *Surf. Sci.* **1993**, 287, 609.
- [56] M. Terai, N. Hasegawa, M. Okusawa, S. Otani, C. Oshima, *Appl. Surf. Sci.* **1998**, 130, 876.
- [57] I. Forbeaux, J. M. Themlin, J. M. Debever, *Phys. Rev. B* **1998**, 58, 16396.
- [58] K. Seibert, G. C. Cho, W. Kütt, H. Kurz, D. H. Reitze, J. I. Dadap, H. Ahn, M. C. Downer, A. M. Malvezzi, *Phys. Rev. B* **1990**, 42, 2842.
- [59] T. W. Ebbesen, H. Hiura, *Adv. Mater.* **1995**, 7, 582.
- [60] X. Lu, M. Yu, H. Huang, R. S. Ruoff, *Nanotechnology* **1999**, 10, 269.
- [61] Y. Gan, W. Chu, L. Qiao, *Surf. Sci.* **2003**, 539, 120.
- [62] Y. Ohashi, T. Koizumi, T. Yoshikawa, T. Hironaka, K. Shiiki, *TANSO* **1997**, 180, 235.
- [63] Y. Ohashi, T. Hironaka, T. Kubo, K. Shiiki, *TANSO* **2000**, 195, 410.
- [64] E. Dujardin, T. Thio, H. Lezec, T. W. Ebbesen, *Appl. Phys. Lett.* **2001**, 79, 2474.
- [65] A. H. Castro Neto, F. Guinea, N. M. R. Peres, K. S. Novoselov, A. K. Geim, *Rev. Mod. Phys.* **2009**, 81, 109.
- [66] P. R. Wallace, *Phys. Rev.* **1947**, 71, 622.
- [67] G. W. Semenoff, *Phys. Rev. Lett.* **1984**, 53, 2449.
- [68] F. D. M. Haldane, *Phys. Rev. Lett.* **1988**, 61, 2015.
- [69] J. González, F. Guinea, M. A. H. Vozmediano, *Phys. Rev. B* **1999**, 59, R2474.
- [70] E. V. Gorbar, V. P. Gusynin, V. A. Miransky, I. A. Shovkovy, *Phys. Rev. B* **2002**, 66, 045108.
- [71] T. Ando, T. Nakanishi, R. Saito, *J. Phys. Soc. Jpn.* **1998**, 67, 2857.
- [72] Y. Zheng, T. Ando, *Phys. Rev. B* **2002**, 65, 245420.
- [73] R. Saito, M. Fujita, G. Dresselhaus, M. S Dresselhaus, *Appl. Phys. Lett.* **1992**, 60, 2204.
- [74] „Method of producing isolated field effect transistors employing pyrolytic graphite“: H. J. Teuschler, US Patent 3,522,649, **1970**.
- [75] R. B. Little, *J. Cluster Sci.* **2003**, 14, 135.
- [76] C. R. Dean, A. F. Young, I. Meric, C. Lee, L. Wang, S. Sorgenfrei, K. Watanabe, T. Taniguchi, P. Kim, K. L. Shepard, J. Hone, *Nat. Nanotechnol.* **2010**, 5, 722.
- [77] E. V. Castro, H. Ochoa, M. I. Katsnelson, R. V. Gorbachev, D. C. Elias, K. S. Novoselov, A. K. Geim, F. Guinea, *Phys. Rev. Lett.* **2010**, 105, 266601.
- [78] K. Erickson, R. Erni, Z. Lee, N. Alem, W. Gannett, A. Zettl, *Adv. Mater.* **2010**, 22, 4467.
- [79] K. S. Novoselov, D. Jiang, F. Schedin, T. J. Booth, V. V. Khotkevich, S. V. Morozov, A. K. Geim, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2005**, 102, 10451.
- [80] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. M. Morozov, M. I. Katsnelson, I. V. Grigorieva, S. V. Dubonos, A. A. Firsov, *Nature* **2005**, 438, 197.
- [81] K. S. Novoselov, E. McCann, S. V. Morozov, V. I. Fal'ko, M. I. Katsnelson, U. Zeitler, D. Jiang, F. Schedin, A. K. Geim, *Nat. Phys.* **2006**, 2, 177.
- [82] R. R. Nair, P. Blake, A. N. Grigorenko, K. S. Novoselov, T. J. Booth, T. Stauber, N. M. R. Peres, A. K. Geim, *Science* **2008**, 320, 1308.
- [83] M. I. Katsnelson, K. S. Novoselov, A. K. Geim, *Nat. Phys.* **2006**, 2, 620.
- [84] E. V. Castro, K. S. Novoselov, S. V. Morozov, N. M. R. Peres, J. M. B. Lopes dos Santos, J. Nilsson, F. Guinea, A. K. Geim, A. H. Castro Neto, *Phys. Rev. Lett.* **2007**, 99, 216802.
- [85] L. A. Ponomarenko, F. Schedin, M. I. Katsnelson, R. Yang, E. W. Hill, K. S. Novoselov, A. K. Geim, *Science* **2008**, 320, 356.
- [86] S. V. Morozov, K. S. Novoselov, M. I. Katsnelson, F. Schedin, L. A. Ponomarenko, D. Jiang, A. K. Geim, *Phys. Rev. Lett.* **2006**, 97, 016801.
- [87] F. Guinea, M. I. Katsnelson, A. K. Geim, *Nat. Phys.* **2010**, 6, 30.

- [88] D. C. Elias, R. R. Nair, T. M. G. Mohiuddin, S. V. Morozov, P. Blake, M. P. Halsall, A. C. Ferrari, D. W. Boukhvalov, M. I. Katsnelson, A. K. Geim, K. S. Novoselov, *Science* **2009**, *323*, 610.
- [89] R. R. Nair, W. Ren, R. Jalil, I. Riaz, V. G. Kravets, L. Britnell, P. Blake, F. Schedin, A. S. Mayorov, S. Yuan, M. I. Katsnelson, H.-M. Cheng, W. Strupinski, L. G. Bulusheva, A. V. Okotrub, I. V. Grigorieva, A. N. Grigorenko, K. S. Novoselov, A. K. Geim, *Small* **2010**, *6*, 2877.
- [90] C. Lee, X. Wei, J. W. Kysar, J. Hone, *Science* **2008**, *321*, 385.
- [91] Y. Zhang, J. P. Small, M. E. S. Amori, P. Kim, *Phys. Rev. Lett.* **2005**, *94*, 176803.
- [92] Y. B. Zhang, Y. W. Tan, H. L. Stormer, P. Kim, *Nature* **2005**, *438*, 201.
-