

# GROßFLÄCHIGE ABSCHIEDUNG VON GRAPHEN

## Ein wichtiger Schritt für neuartige Bauelemente

Harald Beyer, Mandy Hofmann, Sebastian Trutz, Helge Lux, Sven Stissel, Wolfgang Mehr, Sigurd Schrader, Peter Siemroth

### Zusammenfassung

Das wachsende Interesse an Graphen beruht auf seiner unverwechselbaren Bandstruktur und seinen damit zusammenhängenden herausragenden physikalischen Eigenschaften. Es wird daher weltweit nach einem Verfahren gesucht, Graphen großflächig und mit hoher Qualität abzuschneiden. In einer an der TH Wildau [FH] speziell für diese Aufgabe konzipierten Reaktionskammer wurde die Herstellung mittels chemischer Gasphasenabscheidung auf katalytischen Metalloberflächen für verschiedene Parameter studiert und deren Verträglichkeit mit der CMOS-Technologie untersucht. Die ersten Tests erfolgten auf Nickel, da hier eine im Volumen stattfindende katalytische Reaktion einsetzt. In weiteren Schritten fiel die Wahl auf Kupfer, da hier die Reaktion an der Oberfläche stattfindet und daher ein stabilerer Prozess realisiert werden konnte. Die Qualitätsprüfung der erzeugten Schichten erfolgte mittels Raman-Spektrometrie.

### Abstract

The growing interest on graphene is based on the distinctive band structure and the resulting physical properties. Worldwide the community is looking for a method to get large-area and uniform graphene with high quality. At the Technical University of Applied Sciences Wildau there was constructed a special chamber to grow graphene using chemical vapour deposition with different parameters on a catalytically metallic substrate. It was studied if this process is compatible to the CMOS technology. First tests were done on nickel where the catalytic process takes place inside the bulk material. In further steps it was investigated if copper is a better choice because here the reaction is situated on the surface. This might be a more stable process. To look for the quality of the grown films a Raman spectrometer was used.

### » I. EINLEITUNG

Kohlenstoff, als Baustein des Lebens, gilt als eines der interessantesten Elemente im Periodensystem. Durch seine vielseitigen Erscheinungsformen ist er seit Jahrzehnten Gegenstand unterschiedlichster Forschungen. Spätestens seit dem Nobelpreis 2010 für Physik, der an die Wissenschaftler Andre Geim und Konstantin Novoselov verliehen wurde, ist die quasi-zweidimensionale Struktur, das Graphen im weltweiten Interesse. Es wurde bereits 2004 von den beiden russischen Wissenschaftlern eine freitragende Monolage aus Kohlenstoff hergestellt und grundlegend charakterisiert (Sachse 2012, Lindinger 2012). Dies galt zum damaligen Zeitpunkt als ausgeschlossen, da die verbreitete Meinung herrschte, dass strikt zweidimensionale Kristalle nicht stabil sein können.

Es zeigt sich, dass Graphen eine extrem hohe Ladungsträgerbeweglichkeit aufweist und daher mögliche Anwendungen von hocheffektiven Solarzellen über neuartige Sensoren bis zu Transistorbauelementen für den Terahertzbereich reichen. Seit 2009 wird an der TH Wildau [FH] im Rahmen des Projektes „Kohlenstoffbasierte Funktionsschichten für die

Elektronik und Photonik“ an der Herstellung und Charakterisierung von Graphen geforscht. Das Joint Lab zwischen der TH Wildau [FH] und dem IHP Frankfurt (Oder) hat dabei eine wichtige Rolle übernommen. Der grundlegende Aufbau einer Anlage sowie erste Tests erfolgten im Rahmen einer Diplomarbeit. Ausgehend von diesen Untersuchungen werden die weitere Optimierung der Prozesse und notwendige Neuerungen im Rahmen einer Dissertation als Kooperation zwischen der TH Wildau [FH] und der Universität Rom „Tor Vergata“ weitergeführt.

### » II. STRUKTUR UND EIGENSCHAFTEN VON GRAPHEN

Die Verbindung mehrerer Kohlenstoffatome kann in unterschiedlichen Varianten auftreten, wobei jede gebildete Struktur spezielle Eigenschaften besitzt. Grundsätzlich kann Kohlenstoff in drei Hybridisierungszuständen ( $sp^1$ ,  $sp^2$ ,  $sp^3$ ) auftreten, die sich in unterschiedlichen Kräfteverteilungen und damit in unterschiedlichen Anordnungen der Atome auswirken, sodass verschiedene elektrische und mechanische Eigenschaften

resultieren. Ein typischer Vertreter von  $sp^3$ -hybridisiertem Kohlenstoff ist Diamant, bei dem alle Elektronenpaarbindungen gleich stark sind. Durch diese Konfiguration und die starken Bindungskräfte zwischen den Atomen ist der Diamant das härteste Material, was derzeit auf der Erde bekannt ist (Gottstein 2007).

Die Bezeichnung „Graphen“ wird für die Kohlenstoffmodifikation verwendet, die aus einer monoatomaren Schicht von Kohlenstoffatomen, die in  $sp^2$ -Hybridisierung vorliegen, besteht. Das bedeutet, dass beim Kohlenstoff zwei 2p-Niveaus mit einem 2s-Orbital hybridisieren, wodurch sich drei energetisch gleichwertige und gleichstarke keulenförmige  $sp^2$ -Hybridorbitale bilden. Jedes Orbital ist zum anderen Orbital um  $120^\circ$  versetzt, sodass sich unter Einbeziehung aller Kohlenstoffatome im Gitter eine Honigwabenstruktur (Sechseck-Ringe) ergibt (Meyer 2009). Graphen bildet somit eine zweidimensionale Struktur, welche nach lange vorherrschender Meinung nicht existieren kann, da zweidimensionale Kristalle nachweislich thermodynamisch instabil sind. In den 60er Jahren des

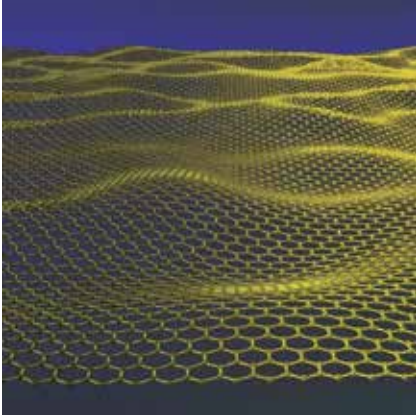


Abb. 1) Graphen ist ein perfektes Netz aus nur einer Atomlage von miteinander verbundenen Kohlenstoffatomen (Gottstein 2007).

20. Jahrhunderts gab es bereits erste theoretische Betrachtungen zum Graphen, deren Grundlagen genutzt wurden, um elektronische Eigenschaften komplexer Kohlenstoffmaterialien beschreiben zu können. Lange Zeit wurde davon ausgegangen, dass zweidimensionale Festkörper sich verklumpen und dreidimensionale Strukturen bilden. Graphen entzieht sich jedoch all dieser Einschränkungen, in dem es durch ein Aufwellen der Oberfläche metastabile Zustände annimmt, wodurch eine energetisch günstige, dreidimensionale Struktur entsteht (siehe Abb. 1). Es „knittert“ und mögliche auftretende Fluktuationen werden durch anharmonische Dehn- und Stauchschwingungen unterdrückt (Kliemt 2012).

Die Atome im Graphen sind 1,42 nm voneinander entfernt und haben eine Bindungsenergie von 4,3 eV (Baun 2012). Wenn sich nun mehrere Lagen Graphen übereinander befinden, so werden sie über die Van-der-Waals-Bindungen verknüpft, sodass sich ein dreidimensionaler Kristall, das Graphit, bildet (Trauzettel 2007). Die Bindungsenergien bei dieser Form betragen jedoch nur 0,07 eV, was um fast zwei Größenordnungen kleiner als bei der Elektronenpaarbindung ist. Das ist der Grund dafür, dass sich die Schichten des Graphits leicht voneinander lösen lassen.

Insgesamt sind damit vier Formen des  $sp^2$ -hybridisierten Kohlenstoffs bekannt (vgl. Abb. 2). Zu der monoatomaren Schicht Graphen und dem Graphitkristall kommen noch Kohlenstoffnanoröhrchen (Nanotubes), die aus zusammengerollten Graphenschichten bestehen.

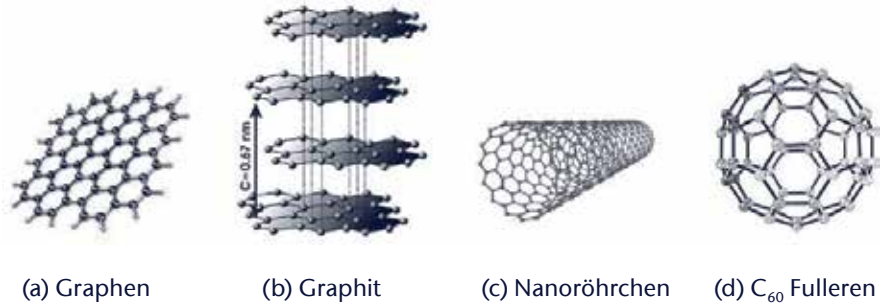


Abb. 2) Strukturen möglicher Kohlenstoffmodifikationen in  $sp^2$ -Hybridisierung (Biniok 2010)

Außerdem gibt es noch die Fullerene (Buckyballs). Sie bestehen aus Graphenschichten, bei denen teilweise Fünfecke anstatt Sechsecke eingebaut sind, sodass sich eine Kugel bildet (Baun 2012).

Graphen ist insgesamt ein für die Applikation sehr neuer und interessanter Werkstoff, dessen „Wellenstruktur“ neue elektrische Eigenschaften hervorruft. So ist z. B. im Gegensatz zu Halbleitern, die eine parabolische Dispersionsrelation haben, bei Graphen die Energie der Elektronen nahe der Fermikante eine lineare Funktion des Wellenvektors. Normalerweise ist das die Dispersionsrelation von relativistischen masselosen Teilchen (Seyller 2011). Es bedeutet, dass es eine doppel-kegelförmige Bandstruktur gibt, bei der sich die Leitungs- und Valenzbandkegel lückenlos in sechs Dirac-Punkten berühren,

den sogenannten K-Punkten (Kliemt 2012) (siehe Abb. 3). Graphen ist an diesen Punkten ein Halbleiter mit verschwindender Bandlücke. Dadurch können Elektronen ohne Hindernis vom Valenzband in das Leitungsband und umgekehrt wechseln, was dort zu einer hohen Ladungsträgerdichte führt. Eine extrem hohe Mobilität der Ladungsträger von bis zu 200.000  $cm^2/Vs$  resultiert aus der starken Krümmung der Bänder. Zudem kann das Fermi-Level durch ein elektrisches Feld so geändert werden, dass Graphen n-dotiert oder p-dotiert erscheint, sodass es als Halbleiterbaumaterial eingesetzt werden kann (Royal 2010). Insgesamt muss zur Beschreibung der Ladungsträger und ihres Verhaltens die Dirac-Gleichung für masselose Fermionen angewendet werden. Das bedeutet aber auch, dass ein für Graphen ungewöhnliches

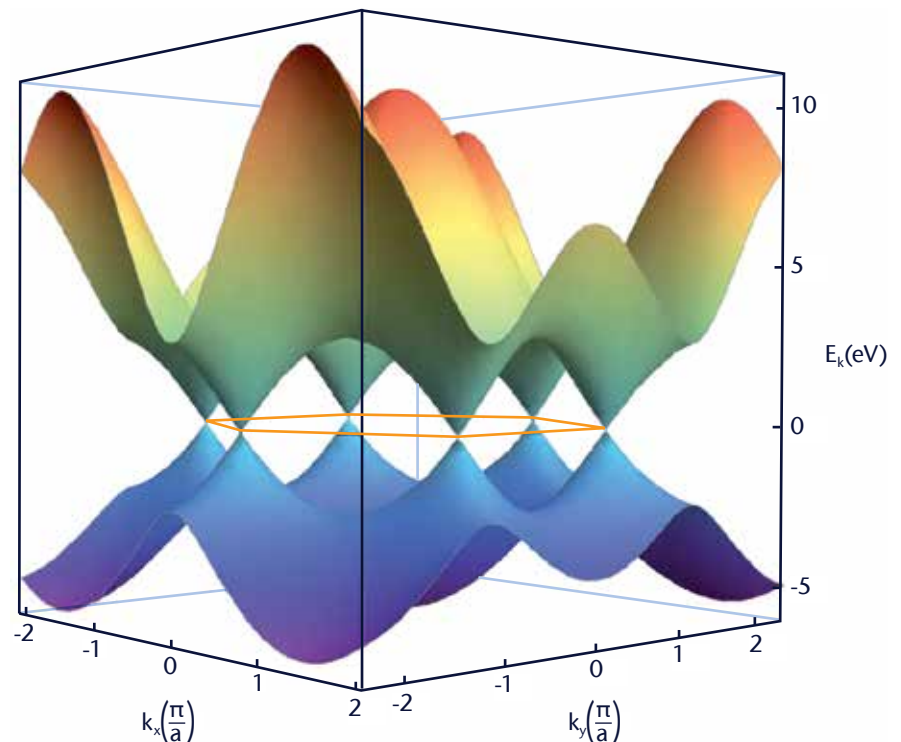


Abb. 3) Modelrechnung des Valenz- und Leitungsbandes von Graphen (Kliemt 2012)

Landauniveau-Spektrum existiert, das zu einem halbzahligen Quantenhalleffekt führt. Dieser Quantenhalleffekt ist auch schon bei Zimmertemperatur (20 °C) zu beobachten (Baun 2012). Weitere besondere Eigenschaften von Graphen sind das hohe Elastizitätsmodul mit 1020 GPa, das an die Härte des Diamanten heranreicht, und eine Zugfestigkeit von  $1,25 \cdot 10^{11}$  Pa, die die höchste ist, die je ermittelt wurde (Royal 2010). Graphen ist zudem außerordentlich transparent. Der Absorptionsgrad beträgt nur 2,3% und ist von der Wellenlänge des Lichts unabhängig (Kin Fai Mak 2008).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Graphen aufgrund seiner einzigartigen Eigenschaften für eine Vielzahl von Anwendungen denkbar ist. So ist die hohe Transparenz in Verbindung mit der hohen Leitfähigkeit eine ideale Voraussetzung für ein transparentes Elektrodenmaterial bei Solarzellen, LCD-Displays und Flachbildschirmen. Aufgrund seiner hohen elektrischen Leitfähigkeit könnte es als neues Transistormaterial eingesetzt werden, wodurch die Wärmeverluste in diesen Bauelementen drastisch gesenkt würden. Des Weiteren sind mit Graphen höhere Taktraten und damit Schaltvorgänge im Transistor möglich. Diese könnten theoretisch auf bis zu 1000 GHz steigen. Die derzeit gängigen siliziumbasierten Taktraten erreichen höchstens 500 GHz. Erste Schritte in diese Richtung der

Graphenanwendung wurden bereits getätigt. So entwickelte IBM am Anfang des Jahres 2010 einen Transistor mit einer Taktung von 100 GHz (Lindinger 2012). Das IHP in Frankfurt (Oder) hat zudem bereits mehrere Patente zur Anwendung von Graphen in Transistoren angemeldet (Mehr 2011). Hierbei wird das Graphen als Basis des Transistors verwendet (GTB, Graphene Base Transistor), wodurch die Nachteile eines Feldeffekttransistors (FET) mit Graphen vermieden werden sollen. Diese sind der fehlende Sättigungsstrom sowie der hohe Leckstrom eines Graphen-FETs, was den Einsatz als elektronischer Schalter verhindert.

### » III. HERSTELLUNGSVERFAHREN

Grundsätzlich kann Graphen auf unterschiedliche Art und Weise hergestellt bzw. abgeschieden werden. Die Methode von Novoselov und Geim beruht auf dem wiederholten Abziehen von graphitischem Kohlenstoff mittels Klebeband, das so genannte „Sticky-Tape-Verfahren“. Durch immer weiteres Abziehen lassen sich so Monolagen erzeugen, die bis heute die besten Schichten liefern. Das Verfahren ist aber für eine Produktion von Bauelementen vollkommen ungeeignet, da nur kleine Graphenflakes in  $\mu\text{m}$ -Skalierung hergestellt werden können. Für die industrielle Massenproduktion muss daher ein Herstellungsverfahren entwickelt werden,

das es gestattet, Graphen defektfrei und großflächig abzuscheiden. Für die Transistorfertigung muss bei der Entwicklung auf die Kompatibilität zur CMOS-Technologie geachtet werden, was einige Verfahren von vornherein ausschließt.

Ein möglicher Prozess ist die Epitaxie von Graphen auf SiC-Kristallen. Wird ein solcher Kristall auf 1200–1600 °C erwärmt, so verdampft das Silizium aufgrund des höheren Dampfdrucks, wodurch sich auf der Oberfläche der zurückbleibende Kohlenstoff als Graphen abgelagert. Die sehr hohen Prozesstemperaturen machen diese Methode für industrielle Anwendungen aber wenig attraktiv.

Die Variante der chemischen Gasphasenabscheidung (CVD) von Graphen, die auch an der TH Wildau [FH] angewendet wird (Biniok 2010, Hofmann 2012, Lux 2012), beruht auf der Aufspaltung eines kohlenstoffhaltigen Precursorgases (z. B. Methan) an einer erwärmten (für Methan ca. 1000 °C) katalytischen Metalloberfläche. Verschiedene Metalle zeigen hierbei unterschiedliche Mechanismen, wobei sich in allen Fällen der durch den Aufspaltungsprozess freiwerdende Kohlenstoff unter optimalen Bedingungen auf der Oberfläche abgelagert und zu Graphen organisiert. Die jeweilige Prozessführung ist hierbei von dem verwendeten Substratmaterial abhängig. Bei der Abscheidung auf Nickeloberflächen handelt es sich um einen katalytischen Volumeneffekt, bei dem zunächst der Kohlenstoff nach dem Aufspaltungsprozess an der Oberfläche in die oberen Atomlagen des erwärmten Substratmaterials eindiffundiert. Durch den sich anschließenden Kühlprozess wird der im Nickel gespeicherte Kohlenstoff an die Oberfläche gebracht und bildet dort Graphen. In Abhängigkeit der Prozessparameter (Partialdrücke von Wasserstoff und Precursorgas, Prozesszeit, Kühlrate) kann defektfreies Graphen großflächig hergestellt werden. Ein typischer Prozessablauf für die Abscheidung von Graphen auf Nickel ist in Abbildung 4 dargestellt. Nach dem Aufheizen des Substrats auf 950 °C erfolgt hier ein Reinigungsschritt mit reinem Wasserstoff für 10 Minuten, gefolgt von dem eigentlichen Graphenprozess unter Zugabe von Methan für 3 Minuten. Anschließend wird das

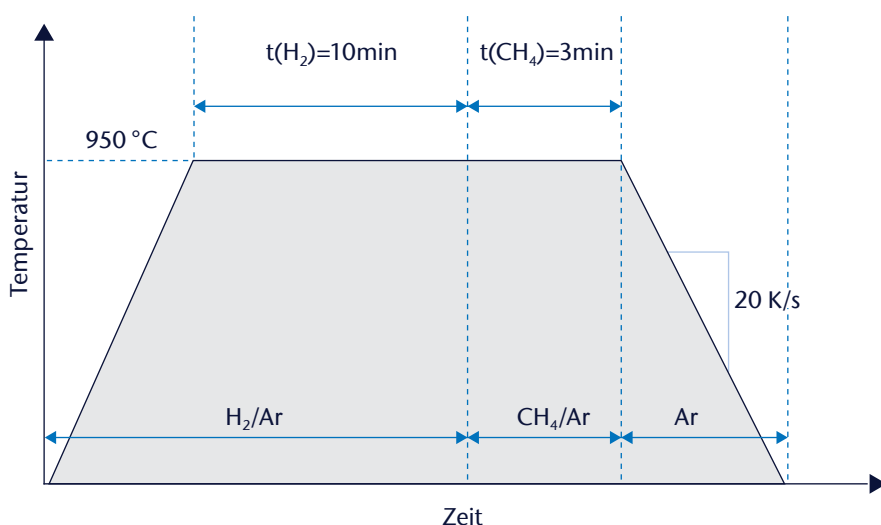


Abb. 4) Prozessablauf für die Abscheidung von Graphen auf Nickel (Baun 2012). Nach dem Aufheizen auf 950 °C wird das Substrat in einer wasserstoffhaltigen Atmosphäre gereinigt. Anschließend erfolgt die Kohlenstoffabscheidung aus Methan.

Substrat mit einer definierten Kühlrate von 10 K/s abgekühlt. Zusätzlich kann in diesem Prozess Argon als inertes Puffergas verwendet werden.

Wird Kupfer als Substratmaterial verwendet, so ist die Kühlrate kein begrenzender Faktor, da die Graphenbildung hier ein reiner Oberflächenprozess ist. Nach dem Aufspaltungsprozess des Precursors an der erwärmten Metalloberfläche wird das Graphen direkt auf der Oberfläche gebildet. Die Qualität des Graphens wird allerdings von Korngrößen des Substratmaterials negativ beeinflusst, was durch regelmäßige Unterbrechung der Gaszufuhr (gepulstes CVD) verbessert werden kann (Zheng Han 2012). Zusätzlich zu den auch an der TH Wildau [FH] getesteten Metallen ist die Bildung von Graphen sowohl auf Einkristallen, dünnen Schichten, Folien, Blechen oder Bulk-Materialien denkbar.

Für viele Anwendungen ist es entscheidend, dass Graphen nicht auf einem leitenden Substrat abgeschieden wird, sondern auf einem Isolator (z. B. Siliziumoxid). Mit den hier beschriebenen Verfahren ist das leider nicht möglich. Aus diesem Grund ist es erforderlich, die auf katalytischen Metallen abgeschiedenen Graphenschichten auf die gewünschten Halbleitermaterialien zu transferieren, die für die meisten Einsatzgebiete als Substrat notwendig sind. Im Rahmen einer Bachelorarbeit zum Thema „Transfer und Charakterisierung von CVD-Graphen“, die in Kooperation zwischen der TH Wildau [FH] und dem IHP Frankfurt (Oder) durchgeführt wurde, erfolgten ein intensives Studium und Tests des notwendigen Transferprozesses (Trutz 2012). Ziel der Arbeit war es, dass an der TH Wildau [FH] auf Kupfer hergestellte Graphen auf ein Silizium-Waferstück zu übertragen. Hierfür musste zunächst das Graphen vom Kupfer abgelöst werden, was einige Probleme in sich birgt, denn das Graphen haftet auf dem Kupfer und hat sich der Topografie der Kupferoberfläche angepasst. Daher kann die monoatomare Graphenschicht nicht vom Kupfer abgelöst werden, ohne dass sie beschädigt wird und Restpartikel vom Kupfer am Graphen hängen bleiben. Aus diesem Grund musste das Kupfer komplett mithilfe einer Säure aufgelöst werden. Dieser Schritt alleine würde jedoch

bedeuten, dass die Graphenschicht am Ende des Ätzschrittes ohne Trägermaterial in der Säure schwimmt. Trotz der hohen Stabilität würde sie im Anschluss schwer handhabbar sein und vermutlich bei weiteren Schritten beschädigt werden. Zudem ist es möglich, dass das Graphen dann auf seinem zukünftigen Substrat nicht haftet. Aus diesen Gründen wird ein Transfermaterial benutzt, was übergangsweise das Graphen an sich bindet. In Anlehnung an einen in der Literatur beschriebenen Übertragungsprozess (Liang 2011) gelang es, Graphen auf Siliziumoxid ( $\text{SiO}_2$ ) zu übertragen und diesen Prozess gezielt zu untersuchen und zu optimieren.

Um die Qualität der erzeugten Schichten zu charakterisieren wird vielfach die Ramanpektrometrie verwendet. Der Abbildung 5 ist ein typisches Ramanpektrum von Graphen zu entnehmen. Dort sind verschiedene Peaks zu sehen, die ihre Ursache wiederum in unterschiedlichen Schwingungen des Kristallgitters haben. Die Lage der Peaks ist dabei u. a. von der Anregungswellenlänge des Ramanlasers abhängig. Auf der linken Seite ist der D-Peak bei ca.  $1350 \text{ cm}^{-1}$  zu sehen, der bei Vorhandensein Aufschluss über Defekte im Kristallgitter (z. B.  $\text{sp}^3$ -hybridisierter Kohlenstoff) gibt. Bei reinem, defektfreiem Graphen ist dieser Peak nicht detektierbar, sodass seine Höhe ein Maß für die Güte der erzeugten Schicht darstellt (Krueger 2010). Rechts daneben befindet sich

der G-Peak, der bei ca.  $1600 \text{ cm}^{-1}$  liegt. Er zeigt an, dass es sich um  $\text{sp}^2$ -hybridisierten Kohlenstoff handelt, sodass er auch bei Graphit nachgewiesen werden kann. Seine Intensität sinkt mit der Anzahl der Kohlenstofflagen und erreicht bei Graphen ein Minimum. Er ist dann, abhängig von der Anregungswellenlänge, meist deutlich kleiner als der 2D-Peak (vgl. Abb. 5).

Der wichtigste Peak für die Identifikation von Graphen ist gleichzeitig der höchste im Graphenspektrum und liegt bei ca.  $2700 \text{ cm}^{-1}$ . Er ist die 2. Ordnung des D-Peaks und wird daher auch als 2D bezeichnet. Die Höhe, Halbwertsbreite (FWHM) sowie die Lage im Spektrum geben Aufschluss über die Anzahl der Graphenlagen. Bei einer Peakbreite (FWHM) von unter  $40 \text{ cm}^{-1}$  und einer Peaklage nahe  $2700$  Wellenzahlen liegt eine Monolage Graphen vor. Mit steigender Anzahl der einzelnen Graphenschichten wird der 2D-Peak breiter und flacher und verschiebt sich nach rechts Richtung  $2800 \text{ cm}^{-1}$ . Die absolute Höhe des „2D-Peak“ ist dabei wieder von der eingestrahlten Wellenlänge abhängig. Bei kurzweiliger Anregung (z. B.  $488 \text{ nm}$ ) ist der 2D-Peak bei Monolagen mehr als doppelt so hoch wie der G-Peak (vgl. Abb. 5).

Die Ramanlinie bei  $2370 \text{ cm}^{-1}$  ist charakteristisch für Stickstoff ( $\text{N}_2$ ), der hier nur auftritt, da der Laserstrahl beim Messen den Stickstoff in der Luft durchquert und

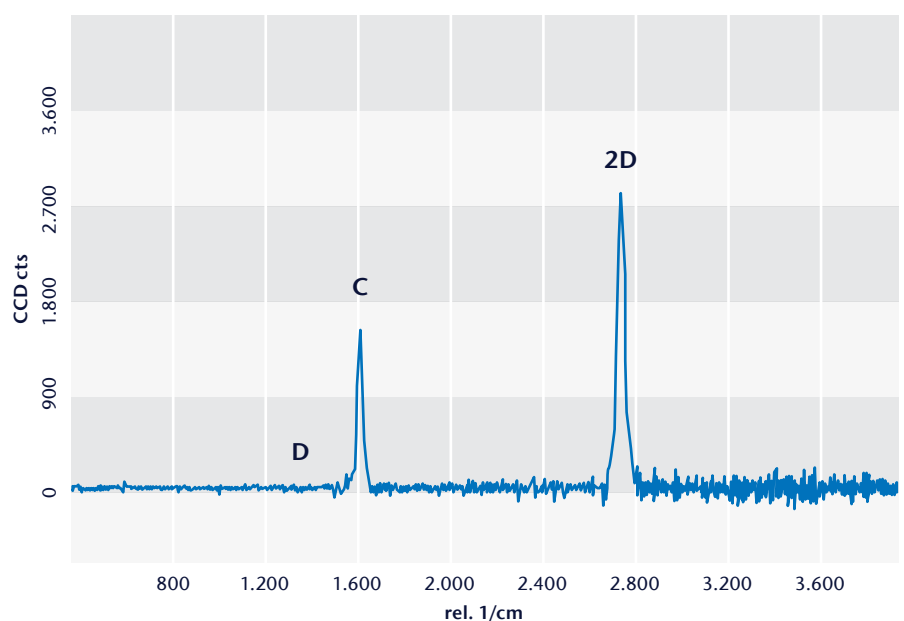


Abb. 5) Ausschnitt von einem Raman-Spektrum von Graphen auf einem Silizium-Wafer



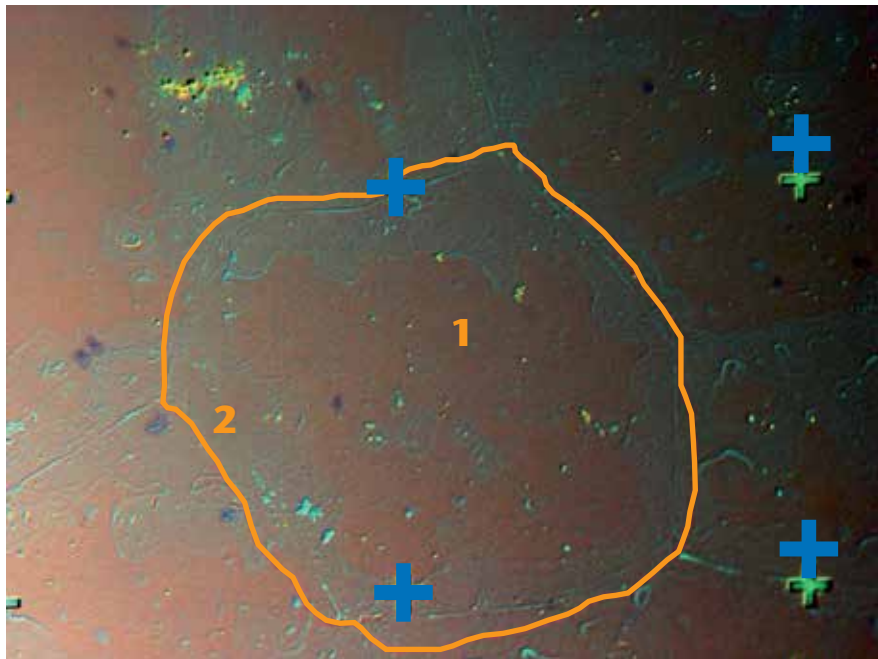


Abb. 6) Lichtmikroskopieaufnahme von Graphen auf einem Silizium-Wafer mit einem veränderten Kontrastwert. Die Kreuze sind Orientierungsmarken auf dem Wafer im Abstand von 10µm.

diesen dabei detektiert. Bei Untersuchungen der Schichten in einer Vakuumkammer verschwindet dieser Peak. Der kleine Peak zwischen dem 2D-Peak und dem Stickstoff-Peak bei ca.  $2450 \text{ cm}^{-1}$  ist wie der 2D-Peak eine Anregung zweiter Ordnung von Graphen. Er gibt also an, wie viel Graphen in wie vielen Schichten vorhanden ist, jedoch ist seine Intensität so gering, dass er qualitativ nicht für reproduzierbare Aussagen herangezogen werden kann (Gupta 2006).

Trotz aller Optimierung, eingesetzter hochwertiger Analysentechnik und Sorgfalt zeigte sich, dass auch die Transfertechnik nicht in der Lage ist, großflächige und defektfreie Graphenschichten zu liefern. In Abbildung 6 lassen sich einige der Defekte gut identifizieren. So sind die Korngrenzen der Kupferfolie sowie kleine Löcher in der Schicht zu erkennen. Es zeigen sich auch Gebiete mit unterschiedlicher Färbung (Pos. 1 und Pos. 2). Hier konnte mit der Ramanpektrometrie ermittelt werden, dass es sich zwar in beiden Fällen um Graphen handelt, jedoch ist es durch Verspannungen bei der Position 2 zu Störungen des Kristallgefüges gekommen.

Zur Herstellung von störungsfreien, großflächigen Graphenschichten auf katalytischen Metalloberflächen konnte

an der TH Wildau [FH] demonstriert werden, dass die Methode der chemischen Gasphasenabscheidung geeignet ist. Der anschließend notwendige Transferprozess von den Metalloberflächen auf die für den späteren Einsatz geeigneten Halbleiter oder Isolatoren stellt mit den heute bekannten Methoden jedoch noch immer ein Problem dar. Im Rahmen einer Kooperation zwischen der TH Wildau [FH] und der Firma Arc Precision GmbH wurde nach einer Alternativmethode gesucht, um Graphen auf isolierenden Siliziumoxidschichten direkt abscheiden zu können. Erste Versuche mit einem gefilterten Hochstrombogen und einem anschließenden Temperprozess zeigen vielversprechende Ergebnisse, da mittels Ramanpektrometrie graphenhaltige Schichten nachgewiesen werden konnten. Diese sind über einige  $\text{cm}^2$  homogen und zeigen in Hall-Messungen bereits Flächenwiderstände von  $16 \text{ K}\Omega$ . Die Idee und die damit zusammenhängende Technologie wurden im Zuge dieser Pionierarbeiten bereits als Patent angemeldet (Patent 2012).

#### » IV. AUSBLICK

Graphen ist ein außerordentlich vielversprechendes Material für eine große Zahl innovativer Anwendungen, insbesondere für das Gebiet der Energienutzung und -umwandlung. Der Weg der Überführung in einen großindustriellen Einsatz ist jedoch langwierig und mühevoll. Die TH Wildau [FH] hat zusammen mit dem IHP Frankfurt (Oder) in einem gemeinsamen JointLab an dieser Entwicklungsarbeit erfolgreich teilgenommen. In einem geförderten Projekt, einer Diplom-, einer Bachelor- und einer Masterarbeit wurden aufschlussreiche Details zum Wachstum, der Messmethodik und des Transfertechnik untersucht. Zudem ist ein Patent aus den Untersuchungen hervorgegangen. Grundsätzlich sind die Wissenschaftler der Arbeitsgruppe Photonik, Laser- und Plasmatechnologien der TH Wildau [FH] in der Lage, störungsfreies, großflächiges Graphen herzustellen und gezielt zu charakterisieren. In der Zukunft sind jedoch noch viele Ideen notwendig, um mithilfe von Graphen die vielen neuen Bauelemente und Anwendungen zu realisieren.

## LITERATUR

Baun, A. (2012): Vortrag „Funktionalisierung von Graphen“, Johannes Gutenberg Universität Mainz, Mainz. Available: [www.chemie.uni-mainz.de](http://www.chemie.uni-mainz.de) (Zugriff am 24.04.2012, 12:45 Uhr).

Biniok, D. (2010): „Konzipierung, Aufbau und Test einer Reaktionskammer zur Abscheidung von Kohlenstofffunktionsschichten“, Diplomarbeit, TH Wildau [FH].

Gottstein G. (2007), „Physikalische Grundlagen Materialkunde. 3. Auflage.“ Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

Gupta, A., Chen, G., Joshi, P., Tadigadapa, S., und Eklund, P. (2006): „Raman Scattering from High-Frequency Phonons in Supported n-Graphene Layer Films“. In: Nano Letters Vol. 6, No. 12., 2667–2673.

Han, Zh., Kimouche, A., Allain, A., Arjmandi-Tash, H., Reserbat-Plantey, A., Pairis, S., Reita, V., Bendiab, N., Coraux, J., Bouchiat, V. (2012): Suppression of Multilayer Graphene Patches during Graphene growth; Institut N<sub>2</sub>EEL, CNRS and Universite Joseph Fourier, BP166, F-38042 Grenoble Cedex 9.

Hofmann M., D. Biniok, O. Seifarth, Beyer, H., Schrader, S., Mehr, W. (2011): Design und Test einer Reaktionskammer zur Abscheidung von Kohlenstofffunktionsschichten auf Nickel- und Iridiumsubstraten; 12. Nachwuchswissenschaftlerkonferenz mitteldeutscher Fachhochschulen, Hochschule Harz, Wernigerode, 14.04.2011, Tagungsband.

Kliemt, K., Neumann, C. (2012): „Graphen“, Vortrag an der Goethe Universität Frankfurt am Main, Frankfurt am Main, 2012. Available: [http://itp.uni-frankfurt.de/~valenti/TALKS\\_BACHELOR/GraphenVortrag.pdf](http://itp.uni-frankfurt.de/~valenti/TALKS_BACHELOR/GraphenVortrag.pdf). (Zugriff am 23.04.2012, 10:11 Uhr).

Krueger, A. (2010): „Carbon Materials and Nanotechnology“, Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 207.

Li, T., Jongho, L., Chou, H., Holt, M., Ruo, R. S., Akinwande, D. (2012): Synthesis of High Quality Monolayer Graphene at Reduced Temperature on Hydrogen-Enriched Evaporated Copper (111) Films; ACSNANO VOL. 6, NO. 3, 2319–2325.

Liang, X., Sperling, B. A., Calizo, I. (2011): „Toward Clean and Crackless Transfer of Graphen“, ACS Nano, [www.acsnano.org](http://www.acsnano.org).

Lindinger, M. (2012): „Frankfurter Allgemeine“, Frankfurter Allgemeine Zeitung GmbH 2012, 5 Oktober 2010. (Online). Available: <http://www.faz.net/aktuell/wissen/physik-chemie/nobelpreis-fuer-physik-2010-die-bremsspur-des-bleistifts-11051468.html> (Zugriff am 26.04.2012, 10:49 Uhr).

Lux, H., Villringer, C., Seifahrt, O., Hofmann, M., Schrader, S., Mehr, M. (2011): Abscheidung von Graphenschichten auf Kupfersubstraten; 12. Nachwuchswissenschaftlerkonferenz mitteldeutscher Fachhochschulen, Hochschule Harz, Wernigerode, 14.04.2011, Tagungsband.

Mak, K. F., Sfeir, M. Y., Wu, Y., Lui, Ch. H., Misewich, J. A., Heinz, T. F. (2008): Measurement of the Optical Conductivity of Graphene. In: Phys. Rev. Lett. 101, 196405 (2008).

Mehr, W., Dabrowski, J., Lippert, G., Lemme, M., Lupina, G., Scheytt, J. C. (2011): P-type Graphene Base.

Meyer, J. (2009): Science, Vol. 324, 15.05.2012.

Patent Aktenzeichen 10 2012 0112 77.7 eingereicht am 08.06.2012.

Sachse, M. (2012): „Hardware-Infos“, Hardware-Infos, 8 Februar 2010. (Online). Available: <http://www.hardware-infos.com/news.php?news=3415> (Zugriff am 26.04.2012, 11:08 Uhr).

Seyller, T. (2011) „[www.graphene.nat.uni-erlangen.de](http://www.graphene.nat.uni-erlangen.de/)“, Universität Erlangen, 28 Juni 2011. (Online). Available: <http://www.graphene.nat.uni-erlangen.de/graphen.htm> (Zugriff am 12.05.2012, 11:43 Uhr).

The Royal Swedish Academy of Sciences (2010): „Graphene – Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2010“, [www.nobelprize.org](http://www.nobelprize.org), Stockholm, 2010. Available: [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2010/advanced-physicsprize2010.pdf](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2010/advanced-physicsprize2010.pdf) (Zugriff am 30.04.2012, 16:32 Uhr).

Transistor (Patent); IHP.379.11, EP-Erstanmeldung am 23.12.2011, AZ: 11 195 711.4.

Trauzettel, B. (2007): „Von Graphit zu Graphen“. In: Physik Journal 6, pp. 39-44, 7 Juli 2007. Available: [www.prophysik.de/details/articlePdf/1104875/issue.html](http://www.prophysik.de/details/articlePdf/1104875/issue.html) (Zugriff am 27.04.2012, 13:23 Uhr).

Trutz, S. (2012): Transfer und Charakterisierung von CVD-Graphen, Bachelorarbeit, TH Wildau.

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Graphen ist ein perfektes Netz aus nur einer Atomlage von miteinander verbundenen Kohlenstoffatomen

Abbildung 2: Strukturen möglicher Kohlenstoffmodifikationen

Abbildung 3: Modelrechnung des Valenz- und Leitungsbandes von Graphen

Abbildung 4: Prozessablauf für die Abscheidung von Graphen auf Nickel (Baun 2012). Nach dem Aufheizen auf 950°C wird das Substrat in einer wasserstoffhaltigen Atmosphäre gereinigt. Anschließend erfolgt die Kohlenstoffabscheidung aus Methan.

Abbildung 5: Ausschnitt von einem Raman-Spektrum von Graphen auf einem Silizium-Wafer

Abbildung 6: Lichtmikroskopieaufnahme von Graphen auf einem Silizium-Wafer mit einem veränderten Kontrastwert. Die Kreuze sind Orientierungsmarken auf dem Wafer im Abstand von 10µm.

## KONTAKTDATEN

Harald Beyer  
TH Wildau [FH]  
[harald.beyer@th-wildau.de](mailto:harald.beyer@th-wildau.de)

## IHP

– Innovations for High Performance Microelectronics  
Materials Research Department  
Im Technologiepark 25  
15236 Frankfurt (Oder)  
[harald.beyer@th-wildau.de](mailto:harald.beyer@th-wildau.de)

[www.ihp-microelectronics.com](http://www.ihp-microelectronics.com)