

# Neue Wege in der industriellen Chemieforschung im Spiegel der *Angewandten Chemie*\*\*

Andreas Kreimeyer\*

Elektrochemie · Industrielle Chemie · Katalyse ·  
Nanotechnologie · Wissenschaftsgeschichte

Die Chemie-Forschung wird heute mehr denn je von der Frage angetrieben, wie sich die Lebensgrundlagen einer wachsenden Weltbevölkerung sichern lassen. Für die großen Chemiker von Justus Liebig, über Carl Bosch und Fritz Haber bis zu den führenden Forschern unserer Zeit standen immer wieder wissenschaftliche Erkenntnisse zum Nutzen der Gesellschaft im Vordergrund. Mit der steigenden Komplexität und der notwendigen Vernetzung der Disziplinen hat sich das Bild der Chemiewissenschaften in den vergangenen Jahrzehnten grundlegend gewandelt: Standen ursprünglich einzelne Moleküle im Mittelpunkt der Forschungstätigkeiten, geht es heute um „intelligente“ Chemie im Sinne ganzheitlicher Systeme, um Lösungen für Ernährung, Wasser-, Energieversorgung und Sicherung von Lebensqualität zu finden. Wie wir – Akademia und Industrie – nachhaltige Antworten finden, hängt nicht zuletzt von der Qualität des wissenschaftlichen Dialogs ab, den die *Angewandte Chemie* seit 125 Jahren souverän dokumentiert und immer wieder anstößt. Wie kaum ein anderes wissenschaftliches Journal in der Chemie weltweit bürgt sie für Qualität und wissenschaftliche Relevanz der Beiträge und hat als „Frühwarnsystem“ die großen gesellschaftlichen Herausforderungen wie auch die wissenschaftlichen Entwicklungen vom Haber-Bosch-Verfahren bis zur Entdeckung des Graphens und seiner Anwendungsmöglichkeiten begleitet. Zum Jubiläum werfen wir einen Blick auf die Zukunftsthemen der Chemiewissenschaft „From Chemicals to Chemistry“.

## Die Zukunft gehört der interdisziplinären Forschung

Der Innovationsfokus in der Chemieindustrie – und mit ihr auch in der Wissenschaft – hat sich in den vergangenen

Jahrzehnten zunehmend von Molekülen hin zu Materialien, Effekten und Systemen verschoben. Mehr denn je geht es heute um intelligente Chemie im Sinne ganzheitlicher Systeme, um entlang der Wertschöpfungskette Lösungen für Wasser-, Energieversorgung und Sicherung von Lebensqualität zu finden. Stand in den 70er Jahren noch die Entwicklung einzelner Moleküle im Mittelpunkt, so hat sich der Fokus der Wertschöpfung in Richtung funktioneller Materialien verschoben – von Rohstoffen und Grund- und Zwischenprodukten hin zu Systemlösungen. Für diese Art von Innovationen, die immer stärker nachhaltigkeitsgetrieben sind, muss man interdisziplinär arbeiten und Fachkompetenzen neu miteinander verknüpfen – in der Industrie ebenso wie in der akademischen Forschung. Diesen Wandel zu begleiten und voranzutreiben, ist ein wichtiges Anliegen der *Angewandten Chemie*. So unterstrich Chefredakteur Peter Gölitz bereits in seinem Editorial zum 100jährigen Jubiläum 1988 mit dem Bunsen-Zitat „Ein Chemiker, der kein Physiker ist, ist gar nichts“ die Offenheit gegenüber Nachbardisziplinen als ein charakteristisches Merkmal der Autorenbeiträge.<sup>[1]</sup>

Diese Offenheit und partnerschaftliche Zusammenarbeit auf internationalem Niveau sind die entscheidenden Voraussetzungen, wenn wir „Durchbruchstechnologien“ entwickeln wollen. Während am Anfang der Geschichte der Chemie die Entdeckung und Entwicklung der Stoffe stand, untersuchen und „designen“ wir heute komplexe Systeme und die Funktionen von Materialien, wobei wir immer auch deren Anwendung im Sinne gesamter Wertschöpfungsketten im Blick haben. Diese Entwicklung lässt sich in der *Angewandten* im Detail zurückverfolgen. Anhand einiger Beispiele aus der gemeinsamen Geschichte der *Angewandten* und der BASF zu vielfältigen Aspekten der Versorgungssicherung in den Feldern Energie, Ernährung und Lebensqualität möchte ich diesen Bogen zu Industrieforschern spannen, deren wissenschaftliches Wirken und Zusammenarbeit sich nachhaltig in dieser Zeitschrift niedergeschlagen haben:

- Die Farbe Blau – von der Farbenforschung zur organischen Elektronik
- Neue Lösungen durch Querschnittstechnologien – die Mobilität der Zukunft
- Wundermaterial Graphen – die Hoffnung auf neue Durchbruchstechnologien
- Vom Schlüsselmolekül Ammoniak zum Rohstoffwandel – Herausforderungen der Zukunft begegnen

[\*] Dr. A. Kreimeyer

Research Executive Director, BASF SE  
67056 Ludwigshafen (Deutschland)

[\*\*] Ich danke unseren Forschern, die mit ihren Arbeiten die Basis für den hier präsentierten Essay gelegt haben, namentlich Andreas Fischer, Ingo Münster, Rocco Paciello und Matthias G. Schwab. Wertvolle Hinweise zu den historischen Meilensteinen gaben meine Kollegen Peter Eckes, Christian Fischer, Dieter Jahn, Karl-Heinrich Hahn, Harald Lauke und Friedrich Seitz. Mein Dank gilt insbesondere Christian Defieber und Anja Feldmann für die Anfertigung des Manuskripts.

Diese Beispiele zeigen zugleich den Wandel in der industriellen Chemieforschung auf, die zunehmend interdisziplinär wird.

### Die Farbe Blau – Von der Farbenforschung zur organischen Elektronik

Die Farbe Blau ist gleichsam der Ursprung der BASF-Geschichte. Heinrich Caro, Begründer der Azofarbstoff-industrie und Vorstand, später Aufsichtsrat der BASF, schafft es 1876, einen rein blau färbenden Farbstoff für Baumwolle synthetisch herzustellen: das Methylenblau. Adolf von Baeyer, Chemiker in Straßburg, gelingt 1880 im Labor die Synthese des damals bedeutendsten Naturfarbstoffes Indigo. Die BASF erwirbt zusammen mit den Farbwerken Hoechst die Rechte zur Verwertung des Indigo-Patentes und steigt damit in den Wettlauf um die großtechnische Synthese des Naturfarbstoffes ein.

Während in rascher Folge ein Ton nach dem anderen auf der Farbskala erschlossen wird, erleben Wissenschaft und Wirtschaft in Deutschland eine neue Symbiose – Investitionen in Wissenschaft werden gezielt gefördert, die Patente sprudeln.<sup>[2]</sup> Kaum einer verknüpft wissenschaftliche Expertise in dieser Zeit so geschickt mit praktischer Anwendung wie Heinrich Caro, der sich „bis spät in die Nacht hinein, in seiner Studierstube (...) mit der chemischen Journalliteratur und der neueren Entwicklung der organischen Chemie vertraut“ macht und den Austausch mit Wissenschaftlern wie des Royal College of Chemistry in London sucht.<sup>[3]</sup> Caros Methylenblau ist das erste deutsche Farbstoffpatent nach der Einführung der Patentgesetzgebung 1877. Bei der technischen Darstellung der Indigoproduktion – 1897 wird der Farbstoff Indigo erstmals großtechnisch hergestellt – zeigt sich Caros Multitalent in technischer und wissenschaftlicher Expertise gepaart mit untrüglichem Gespür für die Erfordernisse des Marktes.

### OLED – intelligente Chemie auf Basis neuer Systeme

Heute steht die Farbe Blau erneut am Anfang einer Durchbruchstechnologie in der BASF-Geschichte: dieses Mal auf dem Lichtmarkt. Blau ist die Königsdisziplin, wenn es darum geht, weißes Licht mit organischen Leuchtdioden zu imitieren. Bisher entwickelte Materialien, fluoreszierende Emittoren, sind nicht effizient genug. Die Lösung fanden BASF-Forscher in der Farbstoffchemie: Vor einigen Jahren entdeckten sie hocheffiziente phosphoreszierende Blauemitter, die die Energie nahezu vollständig in Licht umwandeln können.

Die blaue Komponente markiert nicht nur einen wichtigen Meilenstein bei weißen organischen Leuchtdioden, sondern einen Konzeptwechsel in der Forschung an sich. In den 50er und 60er Jahren hatte Chemie die Aufgabe, Moleküle für Polymere, Farben und vieles mehr zu produzieren. Heute registrieren Chemiker eine ungeheure Erweiterung ihres Faches. George Whitesides formulierte dies so: „*Chemistry is moving to both make the molecules but also to make them by design to have a function. What people are really interested in is*

*the function. Making a molecule – that's terrific. But what you really want is a molecule that does something*“.<sup>[4]</sup>

Die organische Elektronik ist zweifellos eine solche Erweiterung und Vertiefung eines bestehenden Forschungsgebiets. Einen möglichen Ansatz beschreibt ein Forschungsteam aus Wissenschaftlern der TU Dresden und der Industrie im Jahr 2010: In Analogie zu früher patentierten Platin(II)-Verbindungen wurde durch Verwendung von N-heterocyclischen Carbenen (NHCs) der Zugang zu einer neuen Komplexklasse gefunden (Abbildung 1). Bei der Untersuchung



Abbildung 1. Testdioden basierend auf einer neuen Emittorklasse: cyclometallierte Pt-NHC-Komplexe.<sup>[5]</sup>

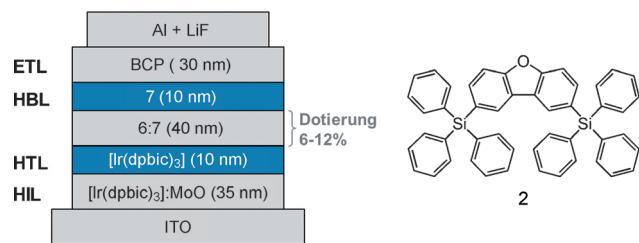
von Übergangsmetallkomplexen, die als Emitter für phosphoreszierende Leuchtdioden (PhOLEDs) geeignet sind, zeigten diese neuen Platin(II)-Komplexe mit Carbenliganden außergewöhnliche Lumineszenzeigenschaften im Blaubereich des sichtbaren Spektrums.<sup>[5]</sup>

### Dynamischer Transfer von Forschung in praktische Anwendungen

Lagen früher nicht selten Jahre und Jahrzehnte zwischen einer Entdeckung und ihrer Umsetzung in praktische Anwendungen, so beschleunigen sich Innovationszyklen zusehends, beispielweise bei der organischen Elektronik. Die Entwicklung großformatiger OLED-Display-Anwendungen wie Fernseher hängt beispielsweise maßgeblich von Effizienzsteigerungen ab. Ein hohes Potential zeigen hier phosphoreszierende Blauemitter. In den vergangenen Jahren haben wir bei BASF bei den Blauemittern die Lebensdauer von 10000 Stunden übertroffen und damit den Weg geebnet für ein breites Produktpotential und Praxisanwendungen mit unseren Partnern.

Die Antriebskräfte, die hinter dieser Entwicklung stehen, sind nicht weniger tiefgreifend als zu Caros Zeiten: Damals wie heute geht es um Effizienzsteigerung im Innovationsprozess. Doch wo vor 125 Jahren ein Molekül den Unterschied ausmachte, ist es heute mit dem richtigen „Farbstoff“ allein nicht getan. Neben dem Blauemitter müssen bei-

spielsweise auch die anderen Materialien robust sein und auf den Emitter abgestimmt werden. BASF arbeitet deshalb heute an dem gesamten Materialsystem für die blauen Dioden (Abbildung 2).



**Abbildung 2.** Aufbau des Diodentestsystems (links) und Struktur des Matrixmaterials 2 (rechts). ETL: Elektronentransportschicht, HBL: Lochblockierschicht, HTL: Lochtransportschicht, HIL: Lochinjektionschicht, BCP: 2,9-Dimethyl-4,7-diphenyl-1,10-phenanthrolin,  $[\text{Ir}(\text{dpbi})_3]$ : Iridium(III)-*fac*-Tris[N,N'-diphenylbenzimidazol-2-yliden-C<sub>2</sub>,C<sub>2'</sub>], ITO: Indiumzinnoxid. Nach Lit. [5].

### Neue Formen der Zusammenarbeit

Schlüsselerfolgsfaktor für diesen Schritt vom Molekül zur Systemforschung sind neue Formen der Zusammenarbeit mit Partnern aus Wissenschaft und Industrie. So wurden seit 2006 in mehreren Teilprojekten der Initiative OLED 2015 im Rahmen der Hightech-Strategie des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) zunächst Blauemitter-Klassen und blaue Dioden entwickelt.<sup>[\*]</sup> Das laufende Teilprojekt KOBALT (Kosteneffiziente OLED-Bauelemente für Anwendungen im Lichtmarkt) bündelt im nächsten Schritt Initiativen zur Entwicklung und Kommerzialisierung energieeffizienter Lichtlösungen.

Öffentlich geförderte Projekte bedürfen der Dokumentation und transparenten Aufarbeitung von Ergebnissen. Wenn die Forschung dermaßen rasant forschreitet wie in der organischen Elektronik, sind Wissenschaftsmagazine unverzichtbar für den Fachdialog: Klaus Müllen und Ullrich Scherff weisen darauf hin, dass die Entdeckung polymerer Leuchtdioden Anfang der 90er Jahre des 20. Jahrhunderts in ein neues Forschungsgebiet mit einer ungeheuren Dynamik in Wissenschaft und Anwendung mündete.<sup>[6]</sup> Um mit dieser Dynamik Schritt zu halten und angesichts der Interdisziplinarität Orientierung zu geben, muss sich eine wissenschaftliche Gemeinschaft professioneller Medien bedienen, die Durchbrüche registrieren und bewerten, und auch dort, wo Überblickswerke noch fehlen, den neuesten Stand der Forschung wiedergeben, die Bedeutung von Forschungsergebnissen einordnen.

Die organische Elektronik ist heute für BASF ein wichtiges Wachstumsfeld in einem Markt der Zukunft. Ob Ma-

terialsysteme für OLEDs und Displayanwendungen, organische Materialien für Logikspeicher oder elektronisch aktive Tinten für e-paper: Bei solchen Querschnittsthemen wird es in Zukunft mehr denn je darauf ankommen, Synergien bei Synthese, Formulierung, Produktion und System-Know-how zu erkennen und zu nutzen. Das wird jedoch nur gelingen, wenn wir einen ganzheitlichen Ansatz verfolgen, der im Fall der organischen Elektronik, die neben den OLEDs auch die organische Photovoltaik umfasst, die Elektrizitätserzeugung und -speicherung in eine Gesamtbetrachtung einbezieht.

### Neue Lösungen durch Querschnittstechnologien – Beispiel Mobilität der Zukunft

Die Beispiele aus der organischen Elektronik zeigen, dass diese Innovationen in Elektrizitätserzeugung und -nutzung nur mithilfe neuer Querschnittstechnologien wie der Nanotechnologie möglich sind. Dies gilt auch für Energiespeicherung beispielsweise im Bereich Mobilität der Zukunft.

Die Nanotechnologie eröffnet uns neue Perspektiven und ist der Schlüssel für zahlreiche neue Produkte. Im Positions-papier der Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh) „Perspektiven der Chemie“<sup>[7]</sup> finden sich in fast jedem Kapitel Hinweise auf die Bedeutung von Nanostrukturen, -kapseln, -chemie oder Nanoelektronik: In nahezu allen Teilbereichen der Chemie spielt diese Querschnittstechnologie eine immer größere Rolle.

Warum sind wir so überzeugt davon, dass hier einer der Schlüssel zur Lösung unserer großen Zukunftsfragen liegt? Es ist diese andere Dimension, die Invention möglich macht – von Nanoelektronik bis zu neuen Materialklassen und Produkten. Teilchengrößen im mittleren und unteren Nanometerbereich zeigen unter anderem erhöhte Löslichkeit, verbesserte biologische Resorption sowie modifizierte optische, elektrooptische und andere physikalische Eigenschaften, die die Entwicklung neuer „Verfahren zur Herstellung organischer Nanopartikel als dringend geboten erscheinen lassen“, schreiben die BASF-Forscher Dieter Horn und Jens Rieger 2001 in einem vielzitierten Beitrag über moderne Aspekte der Partikelbildung.<sup>[8]</sup>

Chemiker sollten sich mit Molekülen befassen, ohne die Probleme aus den Augen zu verlieren, für die Moleküle nur ein Teil der Lösung seien. „Wenn Chemiker sich aus dem Bereich der Moleküle hinausbewegen und das gesamte Problem erfassen – vom Design von Detergentien hin zur Synthese von Kolloiden hin zu Kontrastmitteln für die Kernspintomographie hin zu Trajektorien von Zellen im Embryo bis hin zu Anwendungen regenerativer Medizin – dann wird es auch zwangsläufig zu einem lebendigen Austausch von Ideen, Problemen und Lösungen zwischen Chemie und Gesellschaft kommen“, erklärte beispielsweise George Whitesides.<sup>[9]</sup>

### Beispiel Speicherhüllen – Hochleistungs-Anodenmaterialien für Lithium-Speicher

Es liegt im Wesen von Querschnittsgebieten, dass sie in zahlreiche Anwendungsbereiche einfließen: So ermöglicht

[\*] Das Teilprojekt TOPAS 2012 (Thousand Lumen organic Phosphorescent devices for Applications in Lighting Systems) endete im August 2011. Ergebnis: Entwicklung geeigneter Blauemitterklassen (low triplet lifetime); Entwicklung geeigneter Blue-Host-Klassen (high triplet energies); Implementierung in und Optimierung kompletter blauer Dioden mit Lebensdauer > 10000 h/300 nits.

erst Nanotechnologie neue Ansätze in der Elektrochemie, um die Effizienz von Batterien zu erhöhen. Zu den größten Herausforderungen in der Entwicklung der Elektromobilität zählen Reichweite des E-Fahrzeugs sowie Lebensdauer und Kosten der Batterie: Lithiumionenbatterien haben zwar bereits die größte Energiedichte aller gängigen Batteriesysteme, doch bislang reicht die darin speicherbare Energie nicht aus, um mit E-Fahrzeugen ähnlich hohe Reichweiten zu erzielen, wie mit konventionellen Kraftstoffen betriebenen Fahrzeugen. Um dieses Problem zu lösen, müssen die besten Köpfe der Welt zusammenarbeiten. BASF hat z.B. das Kompetenznetzwerk Elektrochemie initiiert.<sup>[10]</sup> Gemeinsam mit weltweit führenden Experten aus der akademischen Forschung sollen darin grundlegende Fragestellungen zu Materialien, Komponenten und Systemen für die Elektromobilität und Stromspeicherung bearbeitet werden. Einen Schwerpunkt der Arbeiten bilden neue Materialien und funktionelle Komponenten für künftige Batterietypen, wie z.B. Lithium-Schwefel- und Lithium-Luft-Batterien. Die Entwicklung neuer und optimierter Materialien für elektrochemische Energiespeicher stellt eines der aktivsten Gebiete der Materialforschung dar. Mit dem „Wissenschaftspreis Elektrochemie“ haben BASF und Volkswagen 2012 eine internationale Initiative gestartet, um die Forschung im Bereich der Elektrochemie zu fördern und Impulse für die Entwicklung von leistungsfähigen Energiespeichern zu geben. Im Gemeinschaftslabor BELLA (Batteries and Electrochemistry Laboratory) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und BASF werden sowohl grundlegende als auch anwendungsorientierte Projekte mit Zielsetzungen im Bereich zukünftiger Batteriegenerationen durchgeführt.

Ein Ansatz wäre z.B. die Verwendung von neuen Anodenmaterialien mit wesentlich höherer Entladekapazität. Diese sind zwar bereits bekannt, jedoch ist deren Zyklenstabilität sehr gering. Arbeiten auf dem Gebiet der Nanotechnologie weisen hier neue Perspektiven und Lösungswege für diese Speichertechnologie: So zeigte ein Team des Max-Planck-Instituts für Polymerforschung in Mainz mit BASF-Forschern, dass flexible und ultradünne Graphenschichten um neue Anoden-Nanopartikel herum die Eigenschaften der Anode deutlich verbesserten.<sup>[11]</sup> Durch die hohe Leitfähigkeit der einhüllenden Graphenschichten konnten die Anoden-Nanopartikel nicht nur wesentlich höhere Entladeströme liefern, sondern auch deren Zyklenstabilität konnte verbessert werden.

Das öffentlich geförderte Forschungsprojekt meisterte die Herausforderung, die hohe elektrische Leitfähigkeit der dünnen Karbon-Teilschichten mit der hohen Kapazität der Anoden-Nanopartikel zu vereinen. Mit einem einfachen und kostengünstigen Verfahren sei der Weg frei für die Produktion verschiedener funktioneller Elektrodenmaterialien für Energiespeicherung im großindustriellen Maßstab, schlossen die Autoren.

Die Publikation des Teams um Klaus Müllen<sup>[11]</sup> war in mehrerer Hinsicht richtungweisend, indem sie den Gesamtzusammenhang von Forschung und die möglichen Konsequenzen berücksichtigte. Damit erleichtert sie Experten und Interessierten die Einordnung und Bewertung – in diesem Fall die herausragende Bedeutung der Graphenforschung für

die Mobilität der Zukunft und für zahllose weitere Anwendungen, die sich bislang nur ahnen lassen.

Der ganzheitliche Ansatz der BASF in der Entwicklung der Elektromobilität basiert auf den vier Säulen: umweltfreundliche Erzeugung des benötigten Stroms, sparsame und sinnvolle Nutzung und Übertragung der Elektrizität sowie neue Batteriematerialien und -konzepte (Energiespeicherung). Nicht nur mit Blick auf Mobilität ist die stoffliche – kosteneffiziente – Energiespeicherung angesichts der zunehmenden Nutzung von Wind- und Sonnenenergie unabdingbar. Vor welch anspruchsvoller Aufgabe wir in diesem Zusammenhang noch stehen, lässt sich an jüngsten Arbeiten zu chemischen und physikalischen Speichermöglichkeiten für Wasserstoff ablesen. „Wie bei allen Energietechnologien darf man nicht nur eine bestimmte Technik betrachten, sondern muss immer das ganze System analysieren“, heißt es in einer Studie von Ferdi Schüth.<sup>[12]</sup>

## Wundermaterial Graphen – die Hoffnung auf eine neue Durchbruchstechnologie

Tapeten, auf denen Nachrichtenschlagzeilen wie auf Bildschirmen laufen, Kleidung, die als Signalverstärker für einen besseren Empfang bei Mobiltelefonen wirken – ist dies alles Science Fiction oder demnächst alltägliche Anwendung?<sup>[13]</sup> 2010 wurde der Nobelpreis für Physik für die Untersuchung und Isolierung eines zweidimensionalen Kohlenstoffkristalls verliehen: Graphen gilt inzwischen dank seiner einzigartigen elektronischen Eigenschaften als „miracle material“. Es soll entscheidende Durchbrüche für Anwendungen von Elektronikbauteilen bis zu elektrochemischen Energiespeichersystemen liefern – darunter vielleicht eine nachrichtenschreibende Tapete mit flexiblem Display.

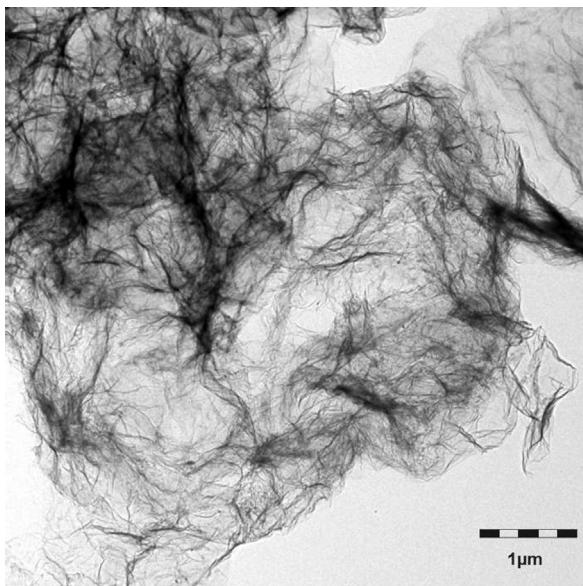
In seinem Nobelaufsatz, den die *Angewandte* im Rahmen ihrer Serie Nobelpreisträger veröffentlichte, macht einer der Entdecker, Konstantin Novoselov, einen gedanklichen Abstecher in die Unterhaltungsmedien und zitierte die amerikanische Sitcom „The Big Bang Theory“, die Graphen bereits 2010 thematisierte.<sup>[14]</sup> „Graphene has captured the imagination of physicists with its potential applications“, bloggte deren wissenschaftlicher Berater Professor David Saltzberg. Dass populärwissenschaftliche Medien schon früh über Graphen berichteten, zeigt, welche kreativen Impulse die zahlreichen Veröffentlichungen gaben.

Die Kombination aus Leitfähigkeit und Transparenz, mechanischer Festigkeit und Elastizität könnte in Zukunft eine Vielzahl von Materialien in bekannten Anwendungen ersetzen, heißt es in der jüngst in *Nature* erschienenen Roadmap, zu deren Autoren der BASF-Forscher Matthias Schwab zählt.<sup>[15]</sup> Angesichts erster Erfolge auf dem Weg zur Massenproduktion von Graphen sehen die Verfasser in Graphen das Potential zu einer „disruptive technology“ – einer Technologie, die nicht nur bestehende industrielle Prozesse nachhaltig verändert wird, sondern selbst unsere Art zu leben und zu arbeiten beeinflussen könnte.<sup>[16,17]</sup>

Das einatomar dünne Kohlenstoffmaterial mit seiner mechanischen Stärke, hohen elektrischen Leitfähigkeit und Gasdichtigkeit lässt sich z.B. durch Exfoliation von Graphit

gewinnen oder in Form von Filmen auf praktisch jede Oberfläche aufbringen (Abbildung 3).

Bereits heute werden polykristalline Graphenfilme aufgedampft und zeigen vielversprechende Eigenschaften, wenn



**Abbildung 3.** Einatomar dünne Kohlenstofffilme: elektronenmikroskopische Aufnahme einer aus Graphit exfolierten Graphenflocke. Quelle: BASF.

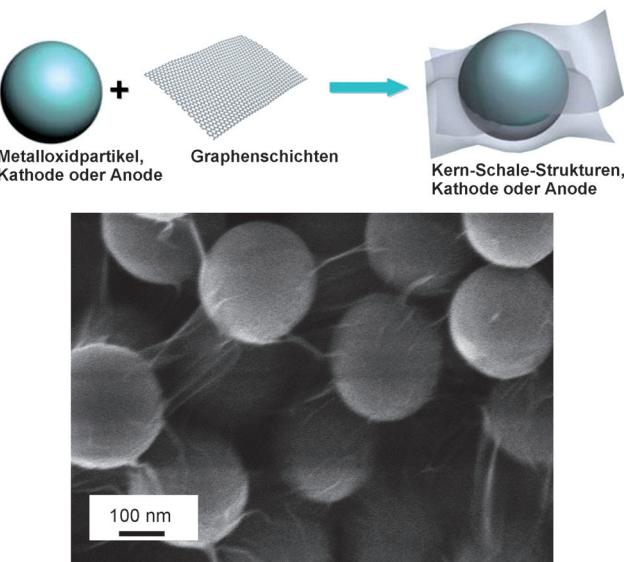
sie beispielsweise als transparente, elektrisch leitfähige Schicht in Displays oder Touchscreens eingesetzt werden und so neue Anwendungen schaffen. Wenn es gelingt, Graphen im industriellen Maßstab herzustellen, dann ist dies ein Beitrag zu nachhaltigen Innovationen, die unseren Lebensstandard sichern und steigern und dabei die Umwelt – unsere Rohstoffe – schonen.<sup>[15]</sup>

Zweierlei sticht hierbei ins Auge: Erstens die Geschwindigkeit, in der sich ein völlig neues Forschungsgebiet entwickelte und als nobelpreiswürdig erachtet wurde – nur knapp sechs Jahre lagen zwischen den ersten Studien von Geim und Novoselov und der Auszeichnung aus Stockholm.<sup>[18,19]</sup> Zweitens der umfassende Charakter der Entdeckung, die Wissenschaftler aus den unterschiedlichsten Bereichen beschäftigt und die nicht zuletzt die Chemieforschung in Richtung nachhaltiger Innovationen verändern dürfte. In kurzer Zeit ist eine Vielzahl an wissenschaftlichen Einrichtungen entstanden, die sich mit den möglichen Anwendungen beschäftigen.

Für die BASF und Müllens Team am Max-Planck-Institut für Polymerforschung fiel deshalb 2012 das Startsignal zur Gründung eines gemeinsamen Labors in Ludwigshafen, dem Carbon Materials Innovation Center (CMIC).

Die Wissenschaftsmedien haben Anteil an dieser Entwicklung: An einer Reihe von Veröffentlichungen in der *Angewandten Chemie* in den vergangenen acht Jahren lässt sich ablesen, wie die Entdeckung der mikromechanischen Spaltung von Graphitlagen (vereinfacht: Klebebandmethode) auch die Chemie bewegt: Klaus Müllen untersuchte beispielsweise bereits 2008 die Eignung von Graphenlagen mit

ihren bemerkenswerten elektronischen Eigenschaften für OLEDs und Solarzellen.<sup>[20]</sup> Neuartige Kern-Schale-Strukturen für Batteriematerialien illustrieren die mögliche Eignung von Graphen für Energiespeichersysteme der Zukunft (Abbildung 4). Erst kürzlich schloss sich ein Übersichtsartikel



**Abbildung 4.** Neuartige Kern-Schale-Strukturen für Batteriematerialien: Quelle: Yang et al. 2010<sup>[10]</sup>

über erfolgreiche Synthesestrategien sowie Größen und Bereiche an, in denen Graphen bereits erfolgreich synthetisiert wurde. Besondere Aufmerksamkeit verdient hier die Be- trachtung der auf chemischem Weg erzeugten Graphen- Nanostrukturen.<sup>[21]</sup>

In dieser Zeitschrift wird stets eine besondere Verantwortung der Chemiewissenschaft für die Lösung künftiger Herausforderungen abgeleitet. George Whitesides bezeichnete dies vor mehr als 20 Jahren in dieser Zeitschrift als Wettstreit zwischen „societal pull“ und „research push“.<sup>[22]</sup> Die Chemie der Zukunft werde zugleich an der Lösung bedeutender gesellschaftlicher Probleme partizipieren und neue Ideen durch Grundlagenforschung hervorbringen. Als vorrangige gesellschaftliche Fragen identifizierte er Gesundheit, Umwelt, Sicherheit, Energie und Globalisierung. Heute mehr denn je wissen wir: Ohne Innovationen aus der Chemie lassen sich diese Herausforderungen nicht bewältigen. Als Stichwort sei nur die Energiewende erwähnt, deren Erfolg nicht zuletzt von Durchbruchsinnovationen bei Werkstoffen abhängen wird. Als Antwort der Wissenschaft auf diese Herausforderungen sind die Materialchemie von Oberflächen über funktionelle und nachhaltige Materialien bis zur Computerchemie sowie eine Grundlagenforschung zu nennen, die nach dem Motto „exploring the limits“ gewillt ist, immer wieder an ihre Grenzen zu gehen. Zu letzterem ist zweifellos die Graphenforschung zu rechnen. Sie zeigt, welche Energien ambitionierte Ziele in Forschung und Entwicklung freisetzen können, um die dringend erforderlichen Lösungen zu liefern. Sie führt uns auch die Komplexität moderner Forschung vor Augen. Im Fall von Graphen haben die Suche nach dem „miracle ma-

terial“ sowie das Spannungsverhältnis zwischen wissenschaftlicher Erkenntnis und gesellschaftlicher Fortschrittswartung zu einer herausragenden Symbiose zwischen Grundlagenforschung eines MPI und dem Prozess- und Anwendungs-Know-how bei BASF geführt.

## Vom Schlüsselmolekül Ammoniak zum Rohstoffwandel – Herausforderungen der Zukunft begegnen

Die Chemie spielt eine entscheidende Rolle dabei, wie wir die Herausforderungen der nächsten Jahrzehnte angehen werden.

Die Auseinandersetzung mit der großen Menschheitsangst Hunger stand auch am Anfang einer der größten Errungenschaften der Chemiegeschichte: dem Haber-Bosch-Verfahren. Dunikowska et al. erinnern an die Ängste im Europa des Industriealters.<sup>[2]</sup> Wie schon bei Malthus, dem Nationalökonom und Bevölkerungstheoretiker des frühen 19. Jahrhunderts, gefährdeten Bevölkerungswachstum, Klimaschwankungen und intensive Landwirtschaft auch zur Jahrhundertwende die weitere Entwicklung.<sup>[2]</sup> In seiner legendären Rede vor der British Association for the Advancement of Science prophezeite der britische Chemiker William Crookes der westlichen Welt eine Hungersnot: in 20 Jahren werde die Stickstoffnachfrage das Angebot übersteigen, die Weltbevölkerung sei dann nicht mehr zu ernähren. Einzig die Chemie könne Abhilfe schaffen.

Dies alles trieb Wissenschaft und Forschung an und führte zum erfolgreichen Zusammenwirken von Hochschulwissenschaft und aufstrebender Industrie. Die Symbiose zwischen dem Wissenschaftler Haber, der an der Technischen Hochschule Karlsruhe die Synthese von Ammoniak betrieb, und Carl Bosch, der bei BASF das großtechnische Verfahren ausarbeitete, mündete 1913 in die erste Ammoniaksyntheseanlage der Welt, an deren Jubiläum wir 2013 erinnern – auch in dem Wissen, dass vor allem der Rohstoffhunger der Militärs nach Ammoniumnitrat der Weiterentwicklung des Verfahrens bis zur industriellen Großanwendung den Weg ebnete. Das Verfahren von großer technischer Reife ist heute Bausteinlieferant für Anwendungen von Düngemitteln bis Pharmaka, Farbstoffen und Sprengmitteln – auf dem Umweg über den Acker habe es Milliarden Menschen ernährt und die Welt verändert, schrieb Jörg Albrecht 2008 in der FAZ.<sup>[23]</sup> Die Hälfte der Menschheit könnte ohne das Haber-Bosch-Verfahren nicht überleben, war das Fazit eines Kommentars in *Nature Geoscience* zum 100. Jahrestag der Patenteinreichung.<sup>[24]</sup>

Der Schweizer Chemiker Albert Eschenmoser bezeichnete Wissenschaft in einem Interview vor einigen Jahren als „zutiefst menschliche Tätigkeit“, die letztlich menschlichen Denkweisen und Vorlieben folge.<sup>[25]</sup> Vor allem aber sah er sie als Fortsetzung der Aufklärung. Das Haber-Bosch-Verfahren ist dafür ein hervorragendes Beispiel: „Die katalytische Ammoniaksynthese hat nicht nur wegen ihrer technischen Relevanz, sondern auch als eine Schlüsselreaktion zur Entstehung von Leben und als die prototypische Modellreaktion zur Erlangung eines grundsätzlichen Verständnisses der Katalyse überhaupt eine wichtige wissenschaftlich-kulturelle Bedeu-

tung“, schrieb Robert Schlägl in dieser Zeitschrift.<sup>[26]</sup> „Die Aufklärung des Wirkmechanismus und die Umsetzung zur technischen Perfektion wurden zum Prüfstein für die wissenschaftliche Grundlagenentwicklung der Katalyseforschung.“ Dem Nobelpreisträger Gerhard Ertl ist genau dieses grundlegende Verständnis der Entdeckung und des Mechanismus der Ammoniaksynthese zu verdanken: Ertl ist mit dem Einsatz oberflächenphysikalischer Studien und seiner Definition katalytischer Reaktionen als offene Systeme zum Aufklärer dieser technisch und wissenschaftlich so bedeutenden Disziplin geworden, die – wie er selbst schrieb – „lange Zeit stark von Empirie geprägt“ war.<sup>[27]</sup> Unter anderem für die vollständige theoretische Aufklärung der Reaktion erhielt er 2007 den Nobelpreis.

Auch in Zukunft liegt eine der großen Aufgaben der Chemieforschung im Rohstoffwandel: hier werden innovative und nachhaltige Beiträge zur Versorgungssicherung erwartet. Wir suchen nach Wegen, wie wir Rohstoffe bei geringerem Energieaufwand sinnvoller nutzen können, und nach Alternativen zu bestehenden Rohstoffen. Ein Beispiel dafür ist die Forschung zur stofflichen Nutzung von CO<sub>2</sub>, deren Potential derzeit bewertet wird.<sup>[28]</sup> Hier sind die Katalytiker gefragt. Der wirtschaftliche Einsatz von CO<sub>2</sub> als Rohstoff lässt sich nur mit der Katalyse bewältigen: Das stabile, reaktionsunfreudige Molekül muss durch reaktive Partner und geeignete Katalysatoren für die Nutzung erschlossen werden. In diesem selektiven und sparsamen Ausbalancieren liegen die klassischen Katalyseaufgaben – und zugleich die großen Zukunftsaufgaben der Chemie.

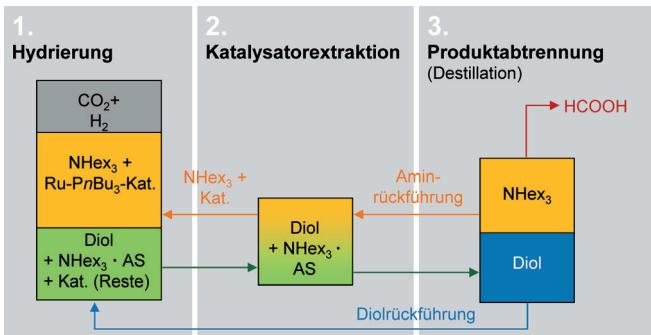
Effiziente und damit nachhaltige Lösungen setzen voraus, die gesamte Wertschöpfungskette und den gesamten Prozess zu durchdenken. Denn ökoeffizient wird die CO<sub>2</sub>-Verwendung sicherlich nur sein, wenn regenerative Energie eingesetzt wird. Stattdessen werden in der Öffentlichkeit immer häufiger vorschnelle Teilergebnisse zur CO<sub>2</sub>-Verwendung als Lösungen des Klimaproblems diskutiert.

Gern wird übersehen, dass die derzeitige Nutzung von CO<sub>2</sub> als Industriegas und Chemierohstoff nur ein Tausendstel der durch den Menschen verursachten Emissionen an Kohlendioxid ausmacht und damit Kohlendioxidemissionen nur begrenzt reduzieren kann. Gleichwohl findet der Wertstoff CO<sub>2</sub> schon heute als Rohstoff in einer Reihe von bedeutenden chemischen Prozessen Anwendung.

Ein vielversprechender Ansatz ist ein bei BASF entwickeltes Verfahren zur Herstellung von Ameisensäure durch CO<sub>2</sub>-Hydrierung; es zeigt, dass CO<sub>2</sub> als kostengünstiger C<sub>1</sub>-Synthesebaustein durchaus vorteilhaft sein kann, und stellt einmal mehr unter Beweis, dass die Chemie noch längst nicht mit ihren Ideen am Ende ist.

Unter den Industriechemikalien steht Ameisensäure dem Kohlendioxid energetisch am nächsten.<sup>[28]</sup> Die homogen katalysierte Hydrierung hatte jedoch aufgrund fehlender effizienter Rückführkonzepte für die Edelmetallkatalysatoren und mangelnder Wirtschaftlichkeit bislang keine industrielle Anwendung gefunden. Erst ein von BASF-Forschern entwickeltes mehrphasiges Flüssig-flüssig-Verfahrenskonzept verbindet eine effiziente Katalysatorrückführung mit der Isolierung von Ameisensäure in drei Schritten: Hydrierung, Katalysatorextraktion und Produktabtrennung. Die BASF-

Forscher Thomas Schaub und Rocco Paciello publizierten 2011 eine neue Methode zur Ameisensäuresynthese durch  $\text{CO}_2$ -Hydrierung (Abbildung 5).<sup>[29]</sup> Dabei wurden Lösungsmittel, das Amin und der Katalysator durch Nutzung ihrer



**Abbildung 5.** Prozesskonzept zur Herstellung von Ameisensäure (AS) durch Hydrierung von  $\text{CO}_2$ .<sup>[29]</sup>

Stoffeigenschaften und ihres Phasenverhaltens optimal aufeinander abgestimmt. Intensive Untersuchungen zum Mechanismus und der Thermodynamik wurden ausgeführt und veröffentlicht. Während das Verfahren derzeit im Technikumsmaßstab erprobt wird, hat die Veröffentlichung bereits weitere wissenschaftliche Kontakte nach sich gezogen. Darüber hinaus geht die Suche nach leistungsfähigeren Katalysatoren weiter. An der Anwendung des Reaktionsprinzips auf strukturell verwandte Moleküle wird ebenfalls gearbeitet.

BASF engagiert sich auch im Fachgebiet Rohstoffwandel intensiv in der akademischen Forschung. Gemeinsam mit dem Exzellenzcluster „Unifying Concepts in Catalysis“ (UniCat) wurde 2011 ein Gemeinschaftslabor für neue katalytische Prozesse für den Rohstoffwandel gestartet. Damit wird die Suche nach Alternativen zum Erdöl vorangetrieben, insbesondere die Nutzung von Erdgas. Langfristiges Ziel ist die Versorgungssicherheit mit Rohstoffen für die Herstellung von chemischen Produkten. Bereits seit 2006 arbeitet ein internationales Wissenschaftsteam am Catalysis Research Laboratory (CaRLa) im Rahmen der Initiative „Industry on Campus“ der Universität Heidelberg und BASF an neuen homogenen Katalysatoren. In diesem Jahr berichtete CaRLa die erste katalytische Acrylsynthese aus  $\text{CO}_2$  und Ethylen, ein wichtiges Signal und ein möglicher Wertschöpfungsbeitrag für die Produktion von Acrylsäure oder Acrylat auf Basis neuartiger Rohstoffe.<sup>[30]</sup>

### Interdisziplinäres Denken und Handeln fördern: ein Kernanliegen der Angewandten Chemie

Historische und aktuelle Beispiele vom Haber-Bosch-Verfahren bis zu unserem jüngsten Gemeinschaftsprojekt, dem Carbon Materials Innovation Center (CMIC), zeigen: Nur forschende Industrieunternehmen sind langfristig erfolgreich. Dazu bedarf es zum einen herausragender Partner in der Wissenschaft, zu denen auch und gerade die Wissenschaftsverlage zählen, zum anderen aber auch der Bereit-

schaft, sich als vollwertiges Mitglied im Wissenschaftsbetrieb zu engagieren, nicht zuletzt in Form von Veröffentlichungen.

Wissenschaftliche Aufsätze von hoher Qualität und interdisziplinärer Wirkung waren und sind zu jeder Zeit wichtige Auslöser für Veränderung: Sie setzen Innovationsprozesse in Gang, indem sie wissenschaftliche Erkenntnis mit den Bedürfnissen in der Gesellschaft abgleichen – vorausgesetzt, wir beherrschen angesichts der Vervielfachung wissenschaftlicher Literatur seit Mitte des 19. Jahrhunderts die Techniken der Informationsverarbeitung. „*Science does not advance by piling up information – it organizes information and compresses it*“, schrieb der Sozialwissenschaftler Herbert Simon 1947.<sup>[31]</sup> Für Innovationsforscher gehören Informations- und Wissensverarbeitung sowie -anwendung deshalb zum Grundinstrumentarium jeder Forschung. Doch nicht nur der strategische Umgang mit Wissen, die Fähigkeit zur Differenzierung und Selektion sind seit jeher herausragende Merkmale der *Angewandten*. Aus der Chemiewissenschaft heraus Antworten auf diese Bedürfnisse zu finden, ist ein Leitmotiv dieser Zeitschrift.

In der *Angewandten* spiegelt sich deshalb zugleich die Geschichte der BASF. Unter den zahlreichen Autoren, die in 125 Jahren über industrierelevante Forschungsthemen publiziert haben, sind Namen wie Walter Reppe – Vater der Acetylenchemie – und Rudolf Knietsch (Chlorverflüssigung) zu finden. Nicht nur die Fachbeiträge sind hier zu nennen, sondern ebenso lesenswert sind die Nachdrucke von Verbandsprotokollen, die beispielsweise die Dispute von Carl Duisberg und Heinrich Caro über Farbstoffeigenschaften penibel festhielten.<sup>[32]</sup> Der Aufgabe, „*der engen Verbundenheit von Wissenschaft und Technik Ausdruck zu geben und dem in der täglichen Praxis stehenden Fachgenossen den Überblick über die Fülle des Geschehens auf allen Arbeitsgebieten zu vermitteln*“, wie der damalige Präsident der Gesellschaft Deutscher Chemiker, Karl Winnacker, 1963 zum 75. Jubiläum schrieb, wird diese Zeitschrift mehr als gerecht.<sup>[33]</sup>

Als zunehmend global forschendes Unternehmen sind wir uns darüber hinaus der Herausforderung einer zweisprachigen Ausgabe der *Angewandten Chemie* wohl bewusst – und des hohen Einsatzes, den ein solch wissenschaftliches Sprachbiotop fordert. François Diederich hat 2005 den wichtigen Beitrag zur Erhaltung und Weiterentwicklung der deutschen Sprache in der chemischen Forschung und Lehre gerade zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses an weiterführenden Schulen herausgehoben: Mit einer deutschsprachigen Edition erleichtern wir Abiturienten und Studenten in den ersten Semestern überhaupt erst den Zugang zu Fachliteratur und damit langfristig zu unseren Forschungsthemen.<sup>[34]</sup>

Nur einige Beispiele aus unserer gemeinsamen Geschichte konnten hier in aller Kürze genannt werden. Sie zeugen von dem grundlegenden Wandel von der Molekül- zur Systemforschung, den unser Fachgebiet erfährt: in der Materialforschung von Graphen bis zu Batteriematerialien, ebenso wie in der Katalyse. Während die Chemie auf breiter Basis zu den Grundlagen der Technologie beiträgt, trägt die *Angewandte* ihrerseits zu den Grundlagen der Chemie bei – sie ist „*die Brücke zwischen den Wissensinseln*“.<sup>[35]</sup>

In diesem Sinne hat Wandel Tradition. „Will journal publishers perish?“ fragte der Economist Anfang dieses Jahrhunderts angesichts des Erfolgszuges des Online Publishing und der Open-Source-Initiative besorgt.<sup>[36]</sup> Die Wirtschaftszeitschrift gab die Antwort gleich selbst: „No, because science could not function without the vetting and endorsement of results they provide.“ Es ist eine besondere Kunst, einerseits diese Kernaufgaben zu pflegen und weiterzuentwickeln, und gleichzeitig Medieninnovationen offen aufzugreifen. Längst twittert die *Angewandte* in den Social Media und lässt sich seit Neuestem bequem am iPad lesen. Solchermaßen gerüstet wird die *Angewandte* ihre Autoren und Leser auch weiter zuverlässig begleiten. Ich wünsche Ihnen weiterhin kreative Ideen gepaart mit dem sicheren Zukunftsblick für das Anliegen einer einzigartigen Wissenschaft.

Eingegangen am 7. November 2012  
Online veröffentlicht am 6. Dezember 2012

- 
- [1] P. Gölitz, *Angew. Chem.* **1988**, *100*, 3–4; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1988**, *27*, 3–4; zitiert nach W. Klemm, *Angew. Chem.* **1937**, *50*, 524–535, dort S. 526.
- [2] M. Dunikowska, L. Turko, *Angew. Chem.* **2011**, *123*, 10226–10240; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2011**, *50*, 10050–10062.
- [3] Z. *Angew. Chem.* **1911**, *24*, 1059–1064.
- [4] „The World That We Live in Is Chemistry“: George Whitesides, Earthsky, March 16, 2012, <http://earthsky.org/human-world/george-whitesides-the-world-that-we-live-in-is-chemistry>.
- [5] Y. Unger, D. Meyer, O. Molt, C. Schildknecht, I. Münster, G. Wagenblast, T. Strassner, *Angew. Chem.* **2010**, *122*, 10412–10414; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2010**, *49*, 10214–10216.
- [6] C.-S. Hsu, *Angew. Chem.* **2006**, *118*, 7273–7274; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2006**, *45*, 7115–7116.
- [7] *Perspektiven der Chemie. Ein Diskussionspapier aus der Wissenschaft für die Wissenschaft* (Hrsg.: M. Dröscher, F. Diederich, S. Jaroch, F. G. Schmidt, H.-G. Weinig), **2011**.
- [8] D. Horn, J. Rieger, *Angew. Chem.* **2001**, *113*, 4460–4492; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2001**, *40*, 4330–4361.
- [9] G. M. Whitesides, *Angew. Chem.* **2004**, *116*, 3716–3727; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2004**, *43*, 3632–3641.
- [10] Akademische Gründungsmitglieder des Kompetenznetzwerks Elektrochemie: Prof. Jürgen Janek (Universität Gießen), Prof. Hubert Gasteiger (TU München), Prof. Petr Novák (PSI Villigen, Schweiz), Prof. Doron Aurbach (Bar-Ilan University, Israel), Prof. Brett Lucht (University of Rhode Island, USA), Prof. Linda Nazar (University of Waterloo, USA).
- [11] S. Yang, X. Feng, S. Ivanovici, K. Müllen, *Angew. Chem.* **2010**, *122*, 8586–8589; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2010**, *49*, 8408–8411.
- [12] U. Eberle, M. Felderhoff, F. Schüth, *Angew. Chem.* **2009**, *121*, 6732–6757; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2009**, *48*, 6608–6630.
- [13] P. Gwynne, *Research-Technology Management* **2012**, *55*, 2–7.
- [14] K. S. Novoselov, *Angew. Chem.* **2011**, *123*, 7123–7141; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2011**, *50*, 6986–7002.
- [15] K. S. Novoselov, V. I. Fal'ko, L. Colombo, P. R. Gellert, M. G. Schwab, K. Kim, *Nature* **2012**, *490*, 192–200.
- [16] H. W. Chesbrough, *Open Innovation: The New Imperative for Creating And Profiting from Technology*, Harvard Business Press, **2006**.
- [17] H. W. Chesbrough, *Research-Technology Management* **2012**, *55*, 20–27.
- [18] K. S. Novoselov, *Science* **2004**, *306*, 666–669.
- [19] A. K. Geim, *Angew. Chem.* **2011**, *123*, 7100–7122; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2011**, *50*, 6966–6985.
- [20] X. Wang, L. Zhi, N. Tsao, Ž. Tomović, J. Li, K. Müllen, *Angew. Chem.* **2008**, *120*, 3032–3034; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2008**, *47*, 2990–2992.
- [21] L. Chen, Y. Hernandez, X. Feng, K. Müllen, *Angew. Chem.* **2012**, *124*, 7758–7773; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2012**, *51*, 7640–7654.
- [22] G. M. Whitesides, *Angew. Chem.* **1990**, *102*, 1247–1257; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1990**, *29*, 1209–1218.
- [23] J. Albrecht, Frankfurter Allgemeine Zeitung (FAZ), **2008**.
- [24] J. W. Erisman, M. A. Sutton, J. Galloway, Z. Klimont, W. Winiwarter, *Nat. Geosci.* **2008**, *1*, 636–639.
- [25] L. Weber, *Chimia* **2010**, *64*, 323–327.
- [26] R. Schlögl, *Angew. Chem.* **2003**, *115*, 2050–2055; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2003**, *42*, 2004–2008.
- [27] G. Ertl, *Angew. Chem.* **1990**, *102*, 1258–1266; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1990**, *29*, 1219–1227.
- [28] F. Ausfelder, T. Isenburg, *Feuerlöscher oder Klimakiller? Kohlendioxid CO<sub>2</sub> – Facetten eines Moleküls*, Deutsche Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie, Frankfurt, **2010**.
- [29] T. Schaub, R. A. Paciello, *Angew. Chem.* **2011**, *123*, 7416–7420; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2011**, *50*, 7278–7282.
- [30] M. L. Lejkowski, R. Lindner, T. Kageyama, G. É. Bódiz, P. N. Plessow, I. B. Müller, A. Schäfer, F. Rominger, P. Hofmann, C. Futter, S. A. Schunk, M. Limbach, *Chem. Eur. J.* **2012**, *18*, 14017–14025.
- [31] H. A. Simon, *Administrative Behaviour: A Study of the Decision Making processes in Administrative Organisation*, Macmillan, New York, **1948**.
- [32] C. Duisberg, Z. *Angew. Chem.* **1911**, *24*, 1057–1058.
- [33] K. Winnacker, *Nachr. Chem. Tech.* **2010**, *11*, 1–2.
- [34] F. Diederich, *Angew. Chem.* **2005**, *117*, 2360–2361; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2005**, *44*, 2308–2309.
- [35] R. Boutellier, O. Gassmann, M. von Zedtwitz, *Managing Global Innovation: Uncovering the Secrets of Future Competitiveness*, Springer, **2008**.
- [36] Economist, May 11th, **2000**.