HighChem

hautnah

PHYSIKALISCHE

ORGANISCHE

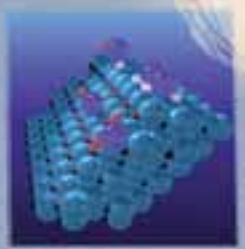
BIO

CHEMIE

ANALYTISCHE

THEORETISCHE

ANORGANISCHE



Aktuelles aus der Physikalischen Chemie in Deutschland

HighChem hautnah

Aktuelles aus der
PHYSIKALISCHEN CHEMIE IN DEUTSCHLAND

Herausgegeben von der
Deutschen Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie

Dr. Heinz Behret
Deutsche Bunsen-Gesellschaft
für Physikalische Chemie
Postfach 90 02 06
60442 Frankfurt am Main
E-Mail: h.behret@bunsen.de
Homepage: http://www.bunsen.de

Prof. Dr. Katharina Kohse-Höinghaus
Universität Bielefeld
Fakultät für Chemie
Physikalische Chemie I
Postfach 10 01 31
33501 Bielefeld
E-Mail: kkh@pc1.uni-bielefeld.de

Diese Veröffentlichung wurde mit Mitteln der Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie, der Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh), des Fonds der Chemischen Industrie (FCI) und der VolkswagenStiftung gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Das vorliegende Werk wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter http://dnb.ddb.de abrufbar.

© 2004 Deutsche Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie, Frankfurt am Main

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung der Bunsen-Gesellschaft in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.
Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Herstellung: Druck- und Verlagshaus Zarbock, Frankfurt am Main
Printed in Germany

ISBN 3-9809691-1-8

Vorwort

Chemie – das ist die Wissenschaft von der Materie, aus der die Welt besteht. Diese Wissenschaft handelt vom Spiel der Natur mit dem Baukasten der Elemente und von der unvorstellbaren Vielfalt der sich ergebenden Kombinationen, Erscheinungsformen und Veränderungen.

Physikalische Chemie – das ist die Disziplin, die sich mit den Regeln und Gesetzen befasst, denen alles Materielle unterworfen ist, nach denen es sich organisiert, entwickelt und verändert. Physikalische Chemiker fragen: Welche Spiele spielt die Natur, und welche spielt sie nicht? Können wir ihre Spielregeln nachvollziehen? Können wir sie verstehen? Können wir mitspielen?

HighChem – das ist die Kunst des Mitspielens auf hohem Niveau. Wer erfolgreich mitmachen will, muss die Spielregeln kennen. Sie sind der Bonus des Wissenden, wenn es etwa darum geht, optimierte Funktionsmaterialien oder umweltschonende Produktionsverfahren zu entwickeln.

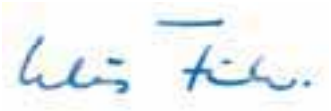
Die vorliegende Broschüre und die ihr beigefügte CD entwerfen eine lebendige Landkarte aktueller physikalisch-chemischer Forschung in Deutschland. Die Themen reichen von den Atomen bis zum Wetter, von den Elementarreaktionen bis zu den Brennstoffzellen und von den Nanopartikeln bis zu den interstellaren Wolken. Deutlich wird die Faszination erkennbar, die diejenigen verspüren, die diese Forschung selbst betreiben. Sollte diese Begeisterung auf die, die neugierig sind, überspringen, so hätten Broschüre und CD ihr Ziel erreicht.

Der Inhalt der CD ist identisch mit der „Aktuellen Wochenschau“, dem Internetauftritt der Deutschen Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie zum Jahr der Chemie, 2003. Im Jahr der Chemie wurden in wöchentlicher Folge 52 Internetbeiträge freigeschaltet, in Eigenregie verfasst von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern an Universitäten, an Forschungszentren und in der Industrie. Die Broschüre enthält Kurzversionen dieser 52 Beiträge.

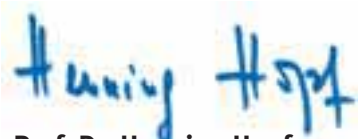
Idee und Konzept der „Aktuellen Wochenschau“ verdanken wir Frau Prof. Katharina Kohse-Höinghaus, Bielefeld. Sowohl für die „Aktuelle Wochenschau“ als auch für das Projekt der nun vorliegenden Broschüre hat sie sich mit großem Engagement eingesetzt. Herzlichen Dank! Unser besonderer Dank geht zugleich an den Geschäftsführer der Deutschen Bunsen-Gesellschaft, Herrn Dr. Heinz Behret, für die vorbildliche Organisation in jeder Phase des Projekts. Den Autorinnen und Autoren der 52 Beiträge sind wir sehr dankbar für das große Ausmaß an investierter Zeit und Arbeit. Frau Dr. Beate Meichsner danken wir für die gelungene redaktionelle Aufbereitung der Kurzbeiträge für die Broschüre. Frau Erika Wöhler sind wir dankbar für ihr unermüdliches Wirken in der Geschäftsstelle der Bunsen-Gesellschaft.

Neben der Deutschen Bunsen-Gesellschaft haben sich auch die Gesellschaft Deutscher Chemiker sowie der Fonds der Chemischen Industrie und die VolkswagenStiftung an der Umsetzung der Idee beteiligt, um so das gemeinsame Ziel der Förderung des Verständnisses für die Chemie zu unterstützen.

Ebenso wie die von uns repräsentierten Organisationen haben auch zahlreiche ungenannte Spender finanzielle Mittel bereitgestellt. Ihnen allen, die damit wesentlich zur Realisierung des Projekts beigetragen haben, sind wir sehr dankbar.



Prof. Dr. Klaus Funke
Erster Vorsitzender der Deutschen Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie



Prof. Dr. Henning Hopf
Präsident der Gesellschaft Deutscher Chemiker

Dr. Wilhelm Krull
Generalsekretär der VolkswagenStiftung

Prof. Dr. Thomas Schreckenbach
Vorsitzender des Kuratoriums des Fonds der Chemischen Industrie

Tipps zum Gebrauch der Broschüre

1. NICHT SOFORT WEGWERFEN

Sie studieren seit kurzer Zeit Chemie oder ein verwandtes Fach und haben dieses Heft in der Vorlesung überreicht bekommen, durch die Fachschaft erhalten, gefunden... Werfen Sie es nicht weg – dieses Heft ist etwas Besonderes! In 52 Städten, in Universitäten, Firmen und Forschungszentren haben wir für Sie gearbeitet. Wir – der Diplomand, die Doktorandin, der Assistent, die Professorin, der Laborleiter – wir alle möchten Ihnen nahe bringen, was insbesondere die physikalisch-chemischen, quantitativen Aspekte der Chemie zu moderner Forschung und HighTech-Entwicklung beitragen. Sie erhalten hier einen „hautnahen“, aktuellen Eindruck dessen, was heute in der „HighChem“ passiert.

2. BLÄTTERN UND FESTLESEN

Damit wir Sie nicht langweilen, sind die einzelnen Beiträge in der Druckfassung thematisch gruppiert, kurz und mit aussagekräftigen Bildern gestaltet. Wenn Sie sich auf das Lesen einzelner Kapitel einlassen, merken Sie, dass hier verschiedene Leute am Werk waren. So wird Ihnen zum Beispiel die Analyse schneller Reaktionen auf mehrere Arten erläutert. Wir alle haben uns bemüht, Ihnen unsere Wissenschaft zu erklären. Jeder benutzt dabei andere Bilder. Suchen Sie sich das für Sie passende heraus!

3. MEHR INFORMATIONEN SUCHEN

Die beigefügte CD enthält über die gedruckten Texte hinausgehende Informationen. Sie ist auch anders strukturiert, nämlich als „Wochenschau“, in der Reihenfolge, wie die ursprünglichen Beiträge der einzelnen Forschergruppen im Jahr der Chemie 2003 auf der Internetseite der Deutschen Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie erschienen sind. Diese längeren elektronischen Versionen der einzelnen Beiträge enthalten zum Teil mehrere Ebenen, durch die Sie weitere Details über bestimmte Themen erfahren. Nach ausgewählten Schlagwörtern können Sie mit dem Stichwortverzeichnis suchen. Wenn Sie am Ball bleiben wollen, können Sie sich natürlich auch direkt bei den einzelnen Gruppen, zum Beispiel über ihre Internetseiten, informieren.

4. DRANBLEIBEN

„PC“ – die Physikalische Chemie in Ihrem Studium – erscheint Ihnen manchmal trocken und sperrig? Thermodynamik ist nicht Ihr Ding – Sie interessieren sich mehr für unsere Umwelt, für Katalysatoren, neue Materialien oder biochemische Reaktionen? Kein Problem. In all diesen Bereichen ist auch die PC zu Hause, und ohne moderne physikochemische Methoden wären Fortschritte in diesen Bereichen undenkbar. Hier in der Broschüre sehen Sie, wohin es führt, wenn man sich länger mit PC beschäftigt: Es eröffnen sich Wege und Querverbindungen zu einer Vielzahl interessanter Themen. Deshalb: Wenn Ihr Berufsziel etwas mit Chemie zu tun hat, bleiben Sie am besten dran an der Physikalischen Chemie, es lohnt sich!

Mit den besten Wünschen

Katharina Kohse-Höinghaus
Universität Bielefeld

Vorwort

Tipps zum Gebrauch der Broschüre

Inhaltsverzeichnis

1 Von festen, flüssigen und sonstigen Stoffen

1.1 Können sich Kristalle „schwarz ärgern“? – Farbspiele mit Kristallen 13
Alexander Börger, Marc Kreye, Marius Schrader und Klaus D. Becker, Institut für Physikalische und Theoretische Chemie, Technische Universität Braunschweig (16. Woche)

1.2 Plasmen: Wenn Elektronen zu heiß werden – der vierte Aggregatzustand 15
Jürgen Janek, Marcus Rohnke, Carsten Korte und Holger Reinshagen, Physikalisch-Chemisches Institut, Justus-Liebig-Universität Gießen (20. Woche)

1.3 Assoziationskolloide oder Der Widerstreit der Gefühle bei amphiphilen Molekülen 16
Alfred Blume und Karen Köhler, Institut für Physikalische Chemie, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg (31. Woche)

1.4 Neue Materialien und Elektrochemie 18
Matthias Intelmann, Ursula Rammelt, Waldfried Plieth, Sibylle Gemming, Thomas Heine, Gotthard Seifert, Thomas Wolff, Andreas Richter und Karl-Friedrich Arndt, Institut für Physikalische Chemie und Elektrochemie, TU Dresden (32. Woche)

1.5 Environment, Ions and Polymers 20
Steven Pas, Institut für Physikalische Chemie, Westfälische Wilhelms-Universität Münster (35. Woche)

1.6 Sind Farbstoffe mehr als nur farbig? – Farbstoffe als Lichtfänger und Elektronenkanäle 22
Derck Schlettwein, Institut für Angewandte Physik, Justus-Liebig-Universität Gießen (39. Woche)

1.7 Wie hüpfen Ionen? 24
Klaus Funke, Radha D. Banhatti und Sabine Brunklaus, Institut für Physikalische Chemie, Westfälische Wilhelms-Universität Münster (52. Woche)

2 Chemische Zwerge – die Nanowelt

2.1 Hat der Teufel die Oberfläche erfunden? 29
Katharina Al-Shamery, Institut für Reine und Angewandte Chemie, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg (6. Woche)

2.2 Leuchtende Kriställchen – Synthese und Eigenschaften von Kristallen mit Durchmessern im Nanometerbereich 31
Markus Haase und Karsten Kömpe, Institut für Physikalische Chemie, Universität Hamburg (10. Woche)

2.3 Chemie mit Nanostrukturen 32
Hajo Freund, Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft, Berlin (14. Woche)

2.4 Atome sehen, mit Atomen spielen – das Rastertunnelmikroskop in der Elektrochemie 34
Dieter M. Kolb, Abteilung Elektrochemie, Universität Ulm (17. Woche)

2.5 Reaktive Erzeugung von Nanopartikeln in der Gasphase 36
Paul Roth, Institut für Verbrennung und Gasdynamik, Gerhard-Mercator-Universität Duisburg (22. Woche)

3 Auf molekularer Ebene – Struktur, Dynamik, Reaktion

3.1 Ultraschnell bis unmerklich langsam – molekulare Geschwindigkeiten bestimmen den Ablauf chemischer Reaktionen 41
Jürgen Troe, Institut für Physikalische Chemie, Georg-August-Universität Göttingen (3. Woche)

3.2 Laser und Chemie – Wie verlaufen chemische Reaktionen auf mikroskopischer Ebene? 43
Friedrich Temps, Institut für Physikalische Chemie, Christian-Albrechts-Universität Kiel (4. Woche)

3.3 Quantenchemie in Karlsruhe: Moleküle, Bits und Bites 44
Reinhart Ahlrichs, Institut für Physikalische Chemie, Universität Karlsruhe (5. Woche)

3.4 Momentaufnahmen vom Tanz der Moleküle in chemischen Reaktionen 45
Bernd Abel, Institut für Physikalische Chemie, Georg-August-Universität Göttingen (9. Woche)

3.5 Kleine Einführung in die Molekularsoziologie – die Wissenschaft vom molekularen Zusammenleben und von den zwischenmolekularen Beziehungen 47
Martin Suhm, Institut für Physikalische Chemie, Georg-August-Universität Göttingen (29. Woche)

3.6 Wie Moleküle reagieren – Computersimulationen chemischer Reaktionen 48
Hans-Joachim Werner, Institut für Theoretische Chemie, Universität Stuttgart (30. Woche)

3.7 Spitze Nadeln tasten, schieben und nähen – Oberflächenchemie mit dem Rastertunnelmikroskop 50
Alexander Birkner, Gregor Witte und Christof Wöll, Institut für Physikalische Chemie I, Ruhr-Universität Bochum (33. Woche)

3.8 Optische Experimente mit einzelnen Molekülen 51
Thomas Basché, Gerhard Hinze, Alf Mews und Wolfgang Erker, Institut für Physikalische Chemie, Johannes-Gutenberg-Universität Mainz (44. Woche)

4 Von Detektiven und Spionen – Hineinschauen in den (bio)chemischen Prozess

4.1 Zuschauen bei der chemischen Reaktion – Detektivarbeit mit kurzen Laserpulsen 57
Katharina Kohse-Höinghaus und Andreas Brockhinke, Physikalische Chemie I, Universität Bielefeld (2. Woche)

4.2 Raman-Spektroskopie: ein Schlüssel zur Lösung vieler physikalisch-chemischer und biophysikalischer Fragestellungen 59
Jürgen Popp, Physikalische Chemie II, Friedrich-Schiller-Universität Jena; Wolfgang Kiefer, Physikalische Chemie II, Universität Würzburg (8. Woche)

4.3 „Biomoleküle unter der Lupe“, Biophysikalische Chemie = Biologie + Physik + Chemie: ein Beitrag zum Verständnis komplexer biologischer Systeme 61
Roland Winter, Physikalische Chemie, Universität Dortmund (12. Woche)

4.4 Intermolekulare Wechselwirkungen mit „unsichtbarem“ Infrarotlaserlicht sichtbar gemacht 62
Erik Bründermann und Martina Havenith, Physikalische Chemie II, Ruhr-Universität Bochum (15. Woche)

4.5 Massenanalyse von Biomolekülen im Pikoliter-Maßstab 64
Bernd Brutschy, Institut für Physikalische und Theoretische Chemie, Johann-Wolfgang-Goethe-Universität Frankfurt am Main (18. Woche)

4.6 Spektroskopie isolierter Biomoleküle und ihrer Aggregate – was die Welt im Innersten zusammenhält 65
Karl Kleinermanns, Hans Bettermann, Markus Gerhards, Michael Schmitt und Rainer Weinkauf, Institut für Physikalische Chemie, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf (21. Woche)

4.7 Umweltschutz und Biotechnologie mit Laserlicht 67
Jürgen Wolfrum, Christof Schulz, Hans-Robert Volpp, Volker Ebert und Markus Sauer, Physikalisch-Chemisches Institut, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg (36. Woche)

4.8 Struktur und Dynamik ungeordneter Festkörper: Kernspins als Spione 69
Hellmut Eckert und Thorsten Torbrügge, Institut für Physikalische Chemie, Westfälische Wilhelms-Universität Münster (38. Woche)

4.9 „Die Beobachtung eines einzelnen Virus auf seinem Infektionsweg in eine lebende Zelle“ 71
Christoph Bräuchle, Department für Chemie und Biochemie, Ludwig-Maximilians-Universität München (50. Woche)

5 Wetter – Klima – Umwelt

5.1 Wetter, Wolken, Physikalische Chemie 75
Helmut Baumgärtel, Institut für Chemie – Physikalische und Theoretische Chemie, Freie Universität Berlin (11. Woche)

5.2 Von Eisteilchen und Wolken – Mehrphasenchemie in der Atmosphäre 77
Reinhard Zellner, Institut für Physikalische Chemie, Universität Duisburg-Essen (34. Woche)

5.3 Die wunderbare Welt des Wassers – von der Makrowelt zur Mikrowelt 78
Tanja Asthalter, Institut für Physikalische Chemie, Universität Stuttgart (43. Woche)

5.4 Die Umwelt im Labor 80
Eckart Rühl, Institut für Physikalische Chemie, Bayerische Julius-Maximilians-Universität Würzburg (46. Woche)

5.5 Umwelttoxikologie – ein Kooperationsprojekt zwischen Universität und Schulen 82
Heidi Foth, Institut für Umwelttoxikologie, Martin-Luther-Universität, Halle-Wittenberg (47. Woche),

6 Chemische Prozesstechnik: Verständnis, Simulation, Optimierung

6.1 Katalysatoren – Chemische Partnervermittlung im virtuellen Labor 87
Joachim Sauer, Institut für Chemie, Abteilung Quantenchemie, Humboldt-Universität Berlin (23. Woche)

6.2 Chemisch reaktive Strömungen – „Heiße“ Anwendungen der Chemie 89
Jürgen Warnatz, Interdisziplinäres Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen (IWR), Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg (26. Woche)

6.3 Anwendung von Brennstoffzellen 91
Ulrich Stimming, Physik-Department, Technische Universität München (41. Woche)

6.4 Umwandlung chemischer in physikalische Signale: Von Sensoren und Brennstoffzellen 93
Rotraut Merkle und Joachim Maier, Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart (51. Woche)

7 Berufsbilder: Physikalische Chemie in der Industrie

7.1 Pharmazeutische Industrie ist physikalische Chemie – Als Physikochemiker bei Boehringer Ingelheim 97
Jörg Schiewe, Boehringer Ingelheim Pharma GmbH & Co. KG, Ingelheim am Rhein (1. Woche)

7.2 1000 gehen auf ein Haar 98
Dieter Distler, BASF Aktiengesellschaft, Ludwigshafen (7. Woche)

7.3 Materialoberflächen für den technischen Einsatz 99
Karsten Reihs und Rolf Claessen, SuNyx GmbH, Köln (19. Woche)

7.4 Mannometer Nanometer: Die faszinierende Welt der Zwerge 100
Wolfgang Leuchtenberger, Degussa AG, Düsseldorf (24. Woche)

7.5 Kunststoffe in der mesoskopischen Welt 102
Edith Hellmann und Matthias Rehahn, Deutsches Kunststoff-Institut (DKI), Darmstadt
Karlheinz Nothnagel, Röhm GmbH & Co. KG, Darmstadt (28. Woche)

7.6 Mikroreaktoren in der chemischen Verfahrenstechnik 104
Wolfgang Grünbein, Clariant GmbH, Frankfurt am Main (37. Woche)

7.7 Die Hochtemperatur-Brennstoffzelle – Vom Funktionsprinzip zum Blockheizkraftwerk 105
Harald Landes, Siemens AG, Erlangen (40. Woche)

7.8 „Begegnung mit den Nanoteilchen“ 107
Lars Börger und Rüdiger Iden, BASF Aktiengesellschaft, Ludwigshafen (45. Woche)

7.9 Physik und Chemie an Grenzflächen – Oberflächliches tiefgehend betrachten 109
Daniel Rudhardt und Christoph Schild, Bayer Technology Services GmbH, Leverkusen (48. Woche)

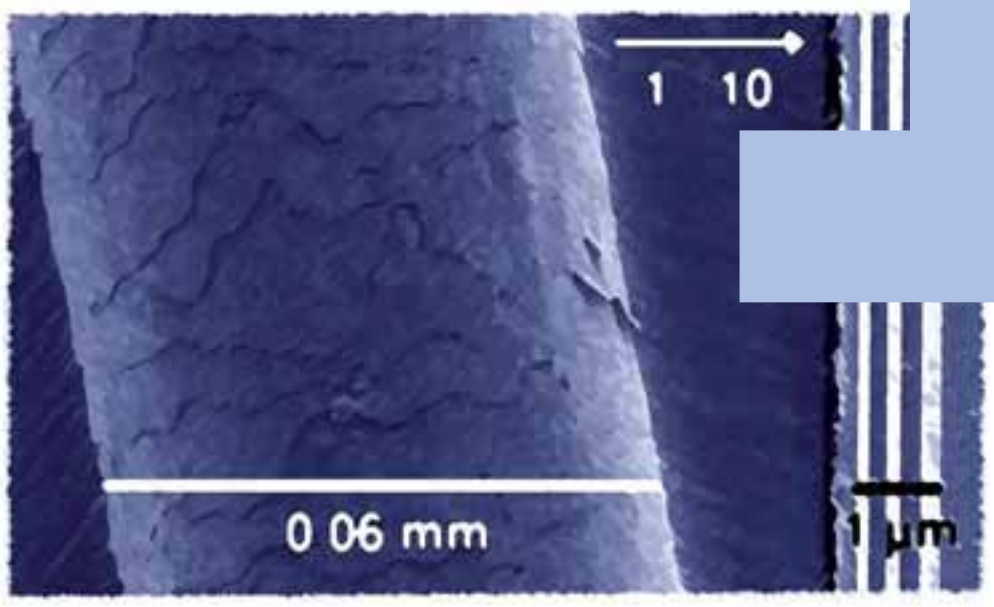
Anhang

Zahlen, Daten, Fakten rund um die Forschung 115

Anschriften 121

1

Von festen, flüssigen und sonstigen Stoffen



1 Von festen, flüssigen und sonstigen Stoffen

Die Physikalische Chemie – eines der großen Teilgebiete der Chemie – ist ein Grenzgänger. Denn sie befasst sich sowohl mit Chemie als auch mit Physik. Welche physikalischen Erscheinungen treten bei chemischen Reaktionen auf? Welchen Einfluss hat die Physik auf chemische Vorgänge? Das sind Fragen, die Physikochemiker bewegen. Sie wollen wissen, warum sich Stoffe umwandeln und beispielsweise Kristalle ihre Farbe ändern oder bestimmte Farbmoleküle Photoleiter sind. Oder was man mit dem vierten Aggregatzustand der Materie – den Plasmen – so alles anfangen kann. Bei amphiphilen Molekülen – also sowohl wasser- als auch fettlöslichen Molekülen – interessieren sie sich beispielsweise für deren überraschende Aggregationsformen. Und sie machen auch nicht vor so seltsam erscheinenden Phänomenen wie hüpfenden Ionen halt.

1.1 Können sich Kristalle „schwarz ärgern“? – Farbspiele mit Kristallen

16. Woche

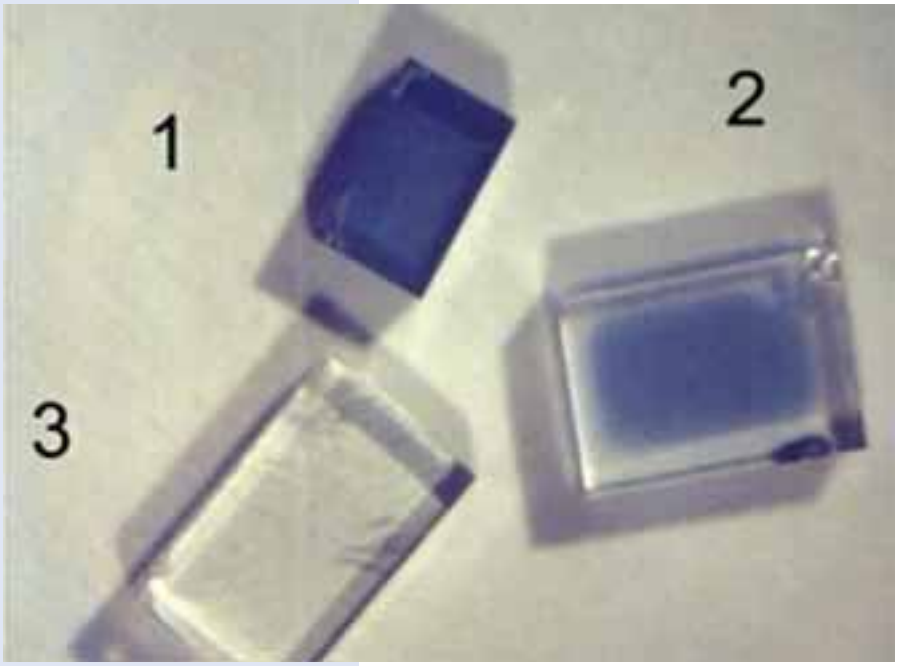
16. Woche *Alexander Börger, Marc Kreye, Marius Schrader und Klaus D. Becker • Institut für Physikalische und Theoretische Chemie, Technische Universität Braunschweig*

Die Farbe von Kristallen hat die Menschen seit jeher fasziniert und so sind Farbgebungen mit Ägyptisch-Blau ($BaCuSi_4O_{10}$), sowie mit Han-Blau ($BaCuSi_4O_{10}$) und Han-Purpur ($BaCuSi_2O_6$) bereits in den Frühkulturen der Menschheit nachzuweisen. Diese unbewusste Ausnutzung des Reaktionsvermögens fester Stoffe ist äußerst bewundernswert, da eine Vielzahl von Verbindungen aus der Kombination der Oxide von Ca(Ba), Cu und Si entstehen können. Sowohl bei den historischen als auch bei den nachfolgenden Beispielen der „sich ärgernden Kristalle“ wird die Farbigkeit durch Absorption hervorgerufen, also durch Abschwächung des einfallenden Lichts. Die Farben von Farbfiltern sind Beispiele für diese Art der Farbentstehung: Ein roter Farbfilter absorbiert alle Farben außer rot und ist somit nur für rotes Licht durchlässig. Ähnlich entsteht etwa das Grün von Blättern, die rotes und blaues Licht absorbieren und den grünen Anteil des einfallenden weißen Lichts reflektieren. Auch die Farben der meisten Mineralien und Schmucksteine entstehen durch Absorption.

In den „Farbspielen mit Kristallen“ wird die Reaktivität verschiedener fester Stoffe in kontrollierter Weise untersucht. Dabei geht es bei Granaten, Zirkonia und Kupfergläsern um Veränderungen im Festkörper, die durch den Sauerstoffgehalt der Gasphase hervorgerufen werden (Redox-Reaktionen). Ziel der Untersuchungen ist die Bestimmung der Reaktionsgeschwindigkeiten und die Aufklärung der Mechanismen, nach denen diese chemischen Umsetzungen ablaufen.

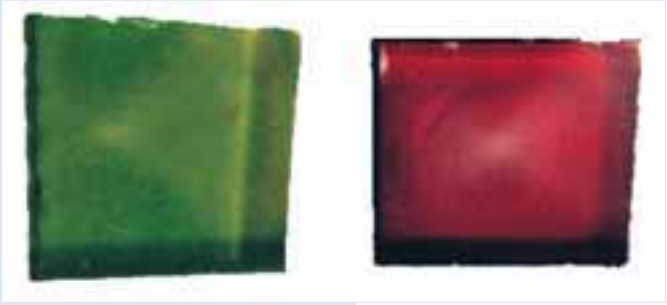
Oxidation und Reduktion von $Yb_3Al_5O_{12}$

Als Materialien für Laser spielen Kristalle, die in der Struktur des Minerals Granat kristallisieren, eine wichtige Rolle. Bei der aktuellen Generation von Hochleistungslasern ist besonders der Ytterbi-



Der blaue Ytterbium-Granat verliert unter oxidierenden Bedingungen bei hohen Temperaturen seine blaue Farbe. Während der Oxidation entstehen unterschiedliche Zonen: eine blaue reduzierte Zone (innen) und eine oxidierte transparente Zone (außen), die von außen in den Kristall wächst.

um-Aluminium-Granat ($Yb_3Al_5O_{12}$), von Interesse, der dreiwertige Ytterbium-Kationen enthält. Diese hochreinen Kristalle werden bei hohen Temperaturen um 2000 °Celsius direkt aus der Schmelze gezogen und sind dann überraschenderweise tiefblau gefärbt. Für die Laseranwendung müssen die Kristalle jedoch entfärbt werden. Dies gelingt durch Erhitzen an Luft bei hohen Temperaturen. Ziel unserer Untersuchungen war es, die Farbigkeit, die Kinetik sowie den Mechanismus dieses Oxidationsprozesses aufzuklären. Die Oxidation basiert auf der Diffusion von Elektronen und Ionen und zeichnet sich durch die Ausbildung einer scharfen Farbfront aus.



Ein Kupfer-Rubin-Glas vor und nach einer längeren thermischen Behandlung unter reduzierender Atmosphäre. Dabei wird Kupfer reduziert, die elementaren Kupferteilchen diffundieren durch die Glasmatrix und bilden winzige Kupfer-Cluster (kolloidales Kupfer).

Oxidation und Reduktion von Zirkonia, ZrO_2

ZrO_2 ist ein Sauerstoffionenleiter und ein technologisch wichtiges Material bei ganz unterschiedlichen High-Tech-Anwendungen keramischer Materialien. So wird ZrO_2 etwa als Sauerstoffsensor (Lambda-Sonde im Automobil) oder in Brennstoffzellen verwendet. Der Einbau von Fremdionen, wie etwa Yttrium-Kationen oder Stickstoff-Anionen, führt zu Veränderungen der Materialeigenschaften (Änderung der elektrischen Leitfähigkeit; verändertes Korrosionsverhalten gegen Wasserdampf) sowie der Farbe. Denn während hochreines ZrO_2 weiß ist, führt der Einbau von Stickstoff zu einer Schwarzfärbung des Kristalls. Die atomaren Hintergründe für diese Veränderungen sind weitgehend unbekannt. Im Zentrum unseres Interesses stehen die Kinetik und der Mechanismus des Einbaus sowie die Wanderung des Stickstoffs im Kristall. Die braune bis schwarze Verfärbung der Kristalle entsteht durch Absorption, die sich über den gesamten sichtbaren Bereich erstreckt und durch elektronische Gitterfehler hervorgerufen wird.

Kupfer-Rubin-Glas

Kleine Metallpartikel, die in einem Glas verteilt sind, können ebenfalls intensive Farben hervorrufen. Das bestbekannte Beispiel hierfür sind Gold-Rubin-Gläser, die seit dem 17. Jahrhundert hergestellt werden. Dazu wird Gold als Ion in der Schmelze gelöst und durch schnelles Abschrecken im Glas konserviert. Das Entstehen und das Wachstum der Metallteilchen beruht auf der Diffusion der Goldatome oder -ionen. Beide Prozesse bestimmen die Geschwindigkeit der Reaktion, also die Umsetzung der gelösten Edelmetallionen zu winzigen Metallteilchen im Nanometerbereich.

Die Farbe des Gold-Rubin-Glases entsteht durch ein Absorptionsband bei etwa 530 Nanometern. Ganz ähnlich ent-

steht die intensive rote Farbe des Kupfer-Rubin-Glases durch Absorption bei 570 Nanometern. Diese wird durch die Kugelform der Teilchen und durch besondere Absorptionseigenschaften der Elektronen in den Edelmetallen hervorgerufen, die auch für ihre hohe elektrische Leitfähigkeit verantwortlich sind.

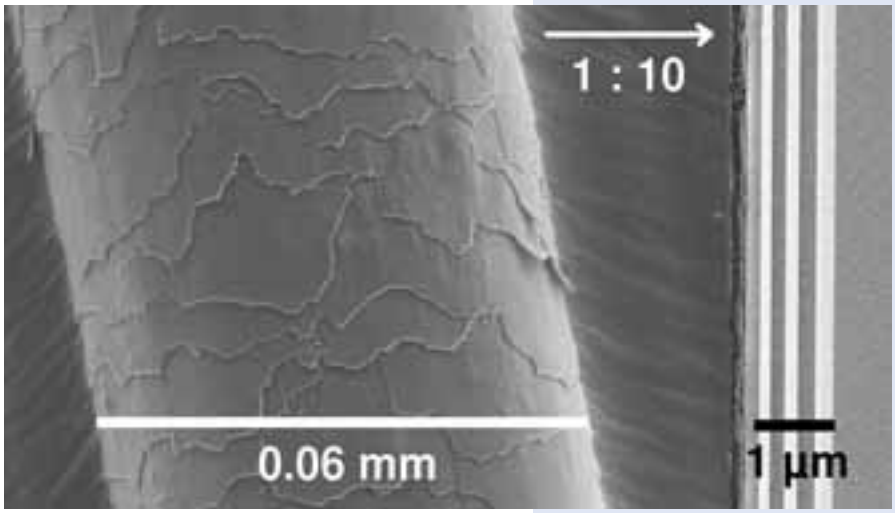
1.2 Plasmen: Wenn Elektronen zu heiß werden – der vierte Aggregatzustand

20. Woche *Jürgen Janek, Marcus Rohnke, Carsten Korte und Holger Reinshagen • Physikalisch-Chemisches Institut, Justus-Liebig-Universität Gießen*

Plasmen (von griechisch, lateinisch: „Geformtes, Gebilde“) sind ionisierte Gase. Sie besitzen elektrische Leitfähigkeit und faszinieren aufgrund ihrer charakteristischen Abstrahlung von Licht. Da alle Stoffe bei sehr hohen Temperaturen in den Plasmazustand übergehen, wird häufig vom „vierten Aggregatzustand der Materie“ gesprochen. Plasmen werden sowohl in der Physik (Plasmaphysik) wie auch in der Chemie (Plasmachemie) aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften untersucht und spielen eine wichtige Rolle in der Material-, Oberflächen- und Lichttechnologie.

Sowohl natürlich vorkommende als auch künstlich erzeugte Plasmen sind aus unserem Leben nicht wegzudenken. Beiden Arten von Plasmen begegnen wir tagtäglich. Ein natürliches Plasma, das jeder von uns kennt und auf das wir keinesfalls verzichten können, ist die Sonne. Aber nicht nur im Weltall, sondern auch auf unserer Erde trifft man auf natürliche Plasmen wie Gewitterblitze oder die berühmte Aurora Borealis (Nordlicht). Während das „Sonnenplasma“ für ein Leben auf der Erde zwingend notwendig ist und das Nordlicht ein beeindruckendes Naturschauspiel darstellt, sind künstlich erzeugte Plasmen für unsere hoch technisierte Welt von immenser Bedeutung.

Plasmen werden beispielsweise bei der Herstellung von Computerchips oder der Vergütung von Brillengläsern eingesetzt. Sie verstecken sich oft in Anwendungen, bei denen wir nicht sofort an ein Plasma denken, wie etwa in Leuchtstoffröhren. Ein besonders anspruchsvolles physikalisches Arbeitsgebiet ist die Kernfusionsforschung, in der besonders energiereiche „heiße“ Plasmen benötigt werden. In der Langfassung – zu finden auf beigefügter CD-ROM – können Sie erfahren, was ein Plasma ist und welche Eigenschaften verschiedene Arten von Plasmen haben. Darüber hinaus werden exemplarisch verschiedene Plasma-



Links: menschliches Haar; rechts: Schichtpaket aus Aluminiumoxid und Zirconiumdioxid, hergestellt mit Hilfe von Laserplasmen.

Radiofrequenz-Plasma aus einem Gemisch von Sauerstoff und Stickstoff.

anwendungen vorgestellt. Ausgehend von der Fragestellung „Was ist ein Blitz?“ wird etwa erklärt, wie ein Plasmabildschirm funktioniert. Es wird gezeigt, wie sich Diamanten mit Hilfe von Plasmen herstellen lassen und wie mit Plasmen giftige Gase zersetzt werden können. Darüber hinaus gibt es ein kleines Lexikon, in dem Begriffe rund um das Plasma erläutert werden, sowie ein einfaches Experiment zur Zündung eines Plasmas in einer Haushaltsmikrowelle. Für den darüber hinaus interessierten Leser werden im Abschnitt „Elektrochemie mit Plasmen“ die Forschungsprojekte unserer eigenen Arbeitsgruppe vorgestellt.

31. Woche

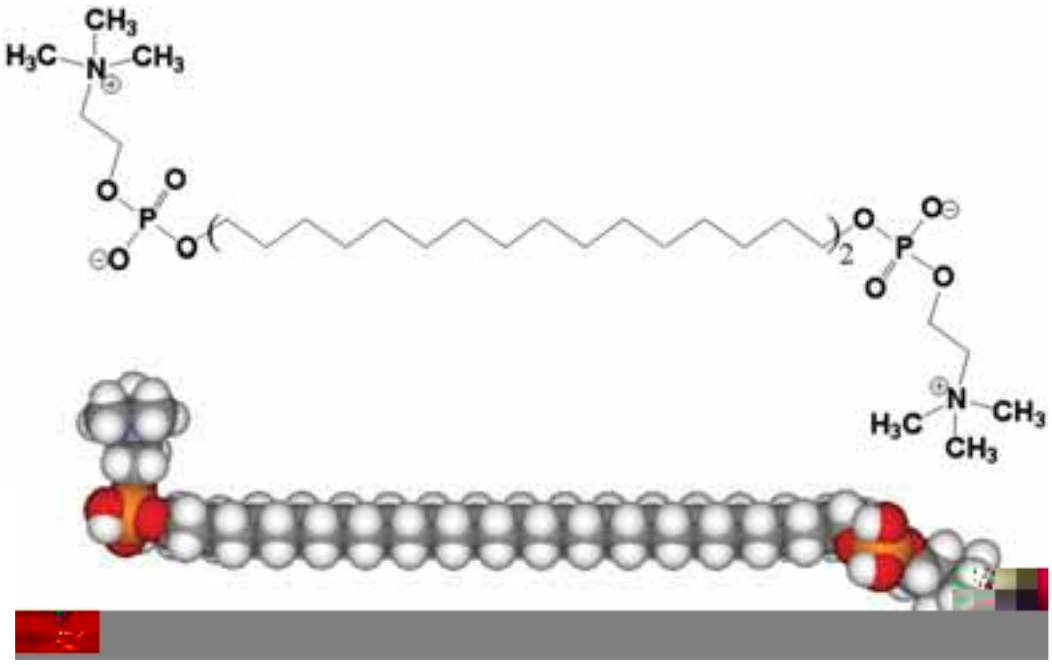
1.3 Assoziationskolloide oder Der Widerstreit der Gefühle bei amphiphilen Molekülen

31. Woche *Alfred Blume und Karen Köhler • Institut für Physikalische Chemie, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg*

Amphiphile Moleküle begegnen uns täglich in Form von Seifen oder anderen waschaktiven Substanzen. Diese Moleküle verbinden zwei Eigenschaften miteinander, nämlich das Bestreben sich gern in Wasser und zum anderen in Öl zu lösen – zwei konträre und eigentlich unvereinbare Eigenschaften. Amphiphilen Molekülen gelingt dies dennoch, indem bei ihnen eine gut wasserlösliche polare Gruppe mit einem apolaren öllöslichen Molekülteil verbunden ist. Der apolare Teil ist häufig eine Kohlenwasserstoffkette, wie sie in Ölen auch vorkommt. Amphiphile Moleküle reichern sich an der Grenzfläche zwischen Luft und Wasser an und erniedrigen stark die Oberflächenspannung des Wassers. Im Wasser selber bilden sie ab bestimmten Konzentrationen kleine Aggregate, so genannte Mizellen. In diesen Mizellen können öllösliche Substanzen aufgenommen werden. Amphiphile Moleküle können auch kleine Schmutzpartikel mit einer Molekülschicht überziehen und so in Wasser suspendieren. Auf diesem Effekt beruht ihre Verwendung als waschaktive Substanzen. Schließlich können diese Substanzen auch noch Öl in Wasser „solubilisieren“, also als kleine Öltröpfchen suspendieren, wobei die Oberfläche der Öltröpfchen mit einer monomolekularen Schicht der amphiphilen Moleküle bedeckt ist. Dieser Vorgang wird Emulgierung genannt, es entsteht eine Öl-in-Wasser Emulsion. Auch das umgekehrte, eine Wasser-in-Öl Emulsion ist herstellbar, in der kleine Wassertröpfchen in Öl suspendiert sind. Derartige Prozesse kennen wir sowohl aus der Küche (zum Beispiel bei der Herstellung von Sauce Hollandaise) als auch aus der Kosmetik und Medizin (Herstellung von Pasten und Salben).

Amphiphile Moleküle mit zwei Kohlenwasserstoffketten können bimolekulare Schichten aufbauen, die zwei wässrige Räume voneinander abzutrennen vermögen. Diese Lipiddoppelschichten sind das Grundgerüst für den Aufbau der Zellmembranen von Bakterien, aber auch der von höheren Organismen, wie Pflanzen und Tieren. Bei letzteren wird das Zellinnere von in sich geschlossenen Membransystemen aufgeteilt, so dass verschiedene biochemische Prozesse im Inneren einer Zelle geordnet ablaufen können. Schon seit mehr als 25 Jahren wird intensiv über die Verwendung von Liposomen als Arzneistoffträger geforscht. Hierbei möchte man sich zum Beispiel die relativ

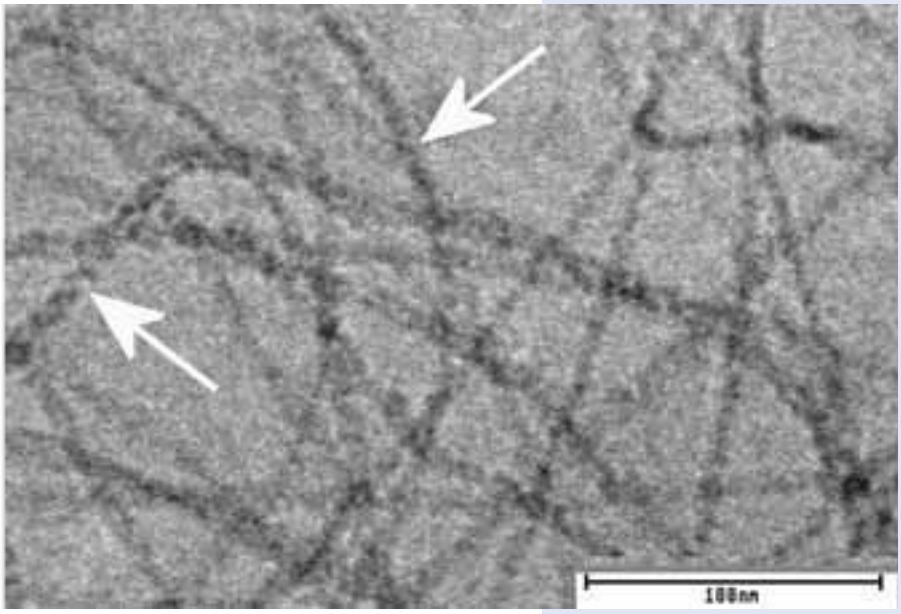
schlechte Durchlässigkeit von Lipiddoppelschichten für wasserlösliche Stoffe zu Nutze machen. Man schließt dazu wasserlösliche Stoffe in Liposomen ein und hofft, dass sie dadurch kontrollierter an denjenigen Ort im Körper transportiert werden, an dem sie gebraucht werden. Gebräuchlicher sind Liposomen in der Kosmetik, wo sie in vielfältiger Weise in Cremes und Lotionen verwendet werden.



Chemische Struktur eines Bolaphospholipids (oben) und Kalottenmodell (unten).

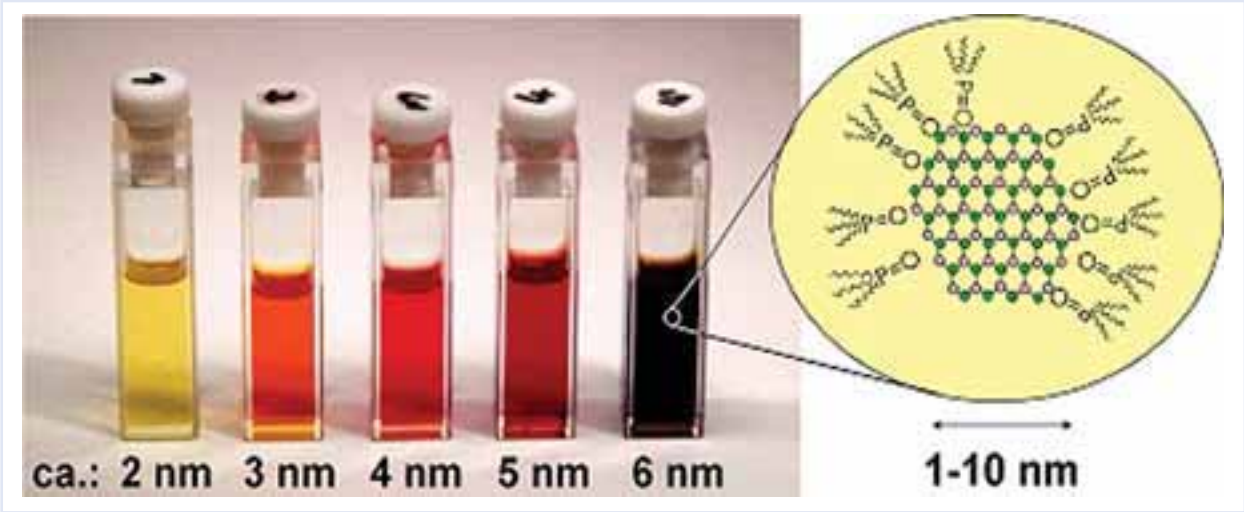
Bolaamphiphile bzw. -lipide sind Moleküle, bei denen zwei polare wasserlösliche Gruppen mit einer oder zwei unpolaren Kohlenwasserstoffkette verbunden sind. Sie kommen zum Beispiel in den Zellmembranen von so genannten Archaebakterien vor, die bei hohen Temperaturen in vulkanischen Seen leben und daher besonders stabile Membranen besitzen müssen.

Bolalipide können überraschend andere Aggregationsformen ausbilden als die oben erwähnten. Insbesondere können sich auch neuartige Überstrukturen bilden. Bei der Untersuchung von Bolaphospholipiden mit zwei großen polaren Gruppen stellte sich heraus, dass sich schon bei sehr niedrigen Konzentrationen von 1 mg pro Milliliter Wasser (0,1 Gewichtsprozent) ein klares hochviskoses Gel (Hydrogel) bilden kann. Mit Hilfe von elektronenmikroskopischen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass im Hydrogel schraubenförmige Filamente von circa fünf bis sechs Milliardstel Meter Dicke (5 bis 6 Nanometer) die wässrige Lösung durchziehen. Die Dicke der Fibrillen ent-



Links: Hydrogel einer auf dem Kopf stehenden Lösung des Bolaphospholipids mit 0,1 Gewichtsprozent. Rechts: Elektronenmikroskopische Aufnahme der Nanofasern im Hydrogel mit helixartiger Struktur (Negativkontrastierung).

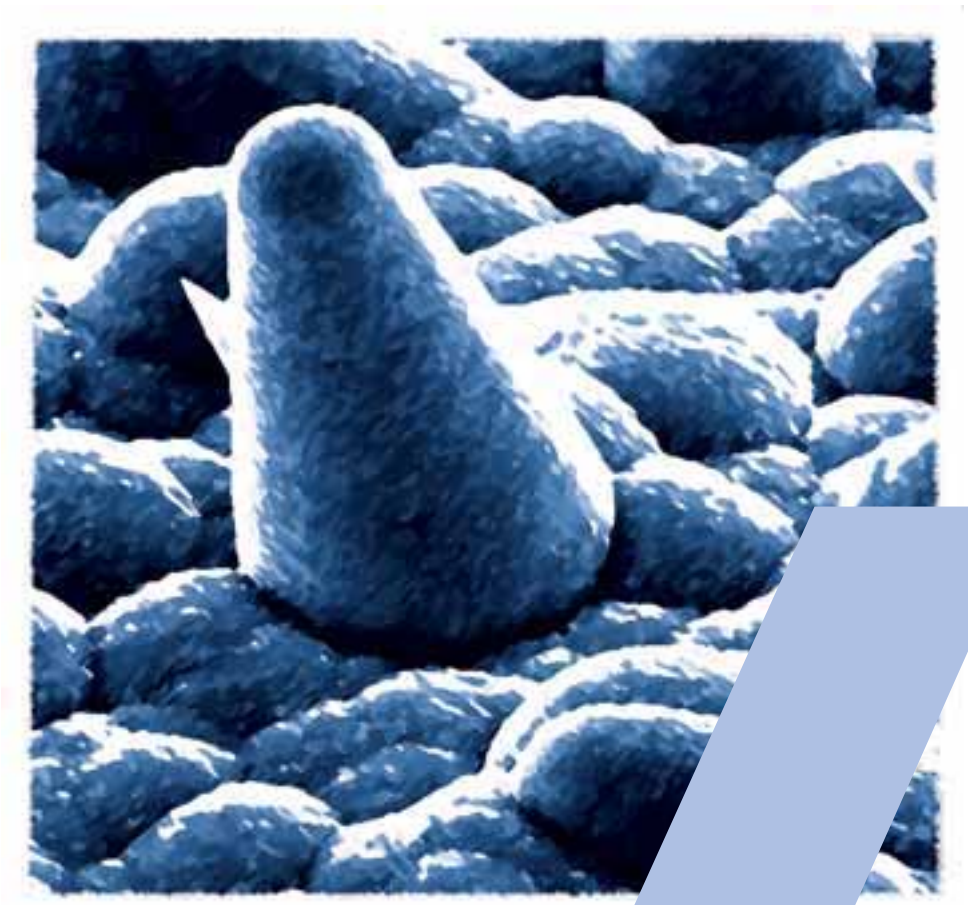
(1 nm = 1 millionstel mm). Die „Teilchen“ sind an der Oberfläche mit molekularen Liganden belegt und können in verschiedenen Lösungsmitteln erzeugt werden. Obwohl die Teilchen weitgehend monodispers präpariert werden können, gibt es zwischen einzelnen Teilchen Variationen in Größe, Form und Anzahl der Defekte. Wir sind nun daran interessiert, strukturelle Merkmale mit den für die Anwendung wichtigen optischen Eigenschaften in Verbindung zu bringen. Dazu werden identische Teilchen mit verschiedenen mikroskopischen Verfahren untersucht. So gelingt es, optische Charakteristika (Fluoreszenzspektrum, Orientierung des Übergangsdipols) eines „Teilchens“ mit seinen aus einer hochaufgelösten elektronenmikroskopischen Aufnahme zugänglichen strukturellen Parametern (Größe, Form, Kristallinität) zu korrelieren.



Die Farbe von in Toluol gelösten Nanokristallen aus Cadmium-Selenid (CdSe) lässt sich durch Größenvariation ändern. Verschiedenfarbige Nanokristalle könnten daher technische Anwendung in der medizinischen Diagnostik, als Leuchtzentren in Leuchtdioden oder als Lasermaterialien finden.

Dynamik in amorphen Stoffen

Die molekulare Dynamik in unterkühlten und glasartigen Stoffen bestimmt zum großen Teil deren Herstellungs- und Bearbeitungseigenschaften. Bis heute ist unklar, wie homogen die Dynamik in einer amorphen Probe ist: Verhalten sich alle Moleküle gleich oder können sie sich je nach Ort unterschiedlich schnell bewegen? Wenn das Material dynamisch sehr heterogen wäre, könnten etwa Alterungsprozesse schneller ablaufen als der Mittelwert der Dynamik erwarten ließe. Mit der konfokalen Fluoreszenzmikroskopie ist es möglich, einzelne Farbstoffmoleküle zu identifizieren und ihre Rotationsdynamik zu verfolgen.



4

Von Detektiven und Spionen – Hineinschauen in den (bio)chemischen Prozess

4 Von Detektiven und Spionen – Hineinschauen in den (bio)chemischen Prozess

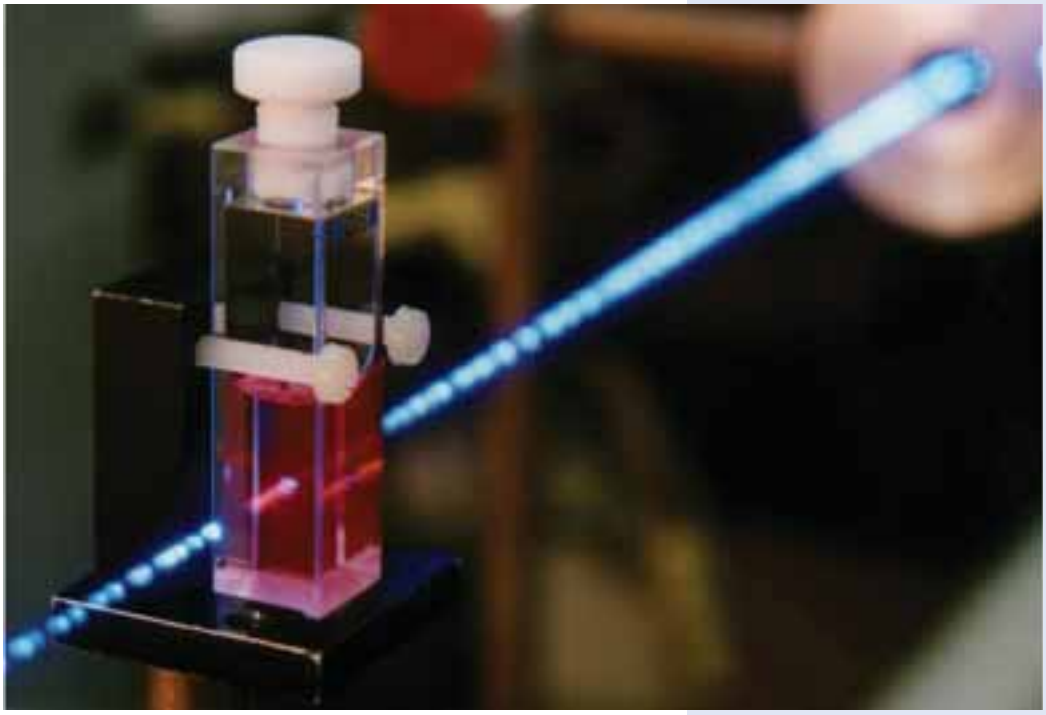
Was passiert genau, wenn Biomoleküle miteinander reagieren? Beispielsweise wenn ein Virus etwa in unseren Körper eindringt? Und wie kann man überhaupt ein einzelnes Molekül, ein einzelnes Atom sehen? Hochkomplizierte Methoden, wie sie die Physikochemiker beherrschen und immer weiter verfeinern, geben hierüber Auskunft. Magnetische Kernresonanz-Spektroskopie, lineare und nichtlineare laserspektroskopische Techniken, rotationsauflösende laserinduzierte Fluoreszenzspektroskopie, laserinduzierte Desorption von Ionen oder Raman-Spektroskopie sind nur einige Beispiele. Sie alle helfen mit, die Natur von Bindungen in Molekülen, Wechselwirkungen zwischen Molekülen und die Veränderungen bei chemischen Reaktionen besser zu verstehen.

4.1 Zuschauen bei der chemischen Reaktion – Detektivarbeit mit kurzen Laserpulsen

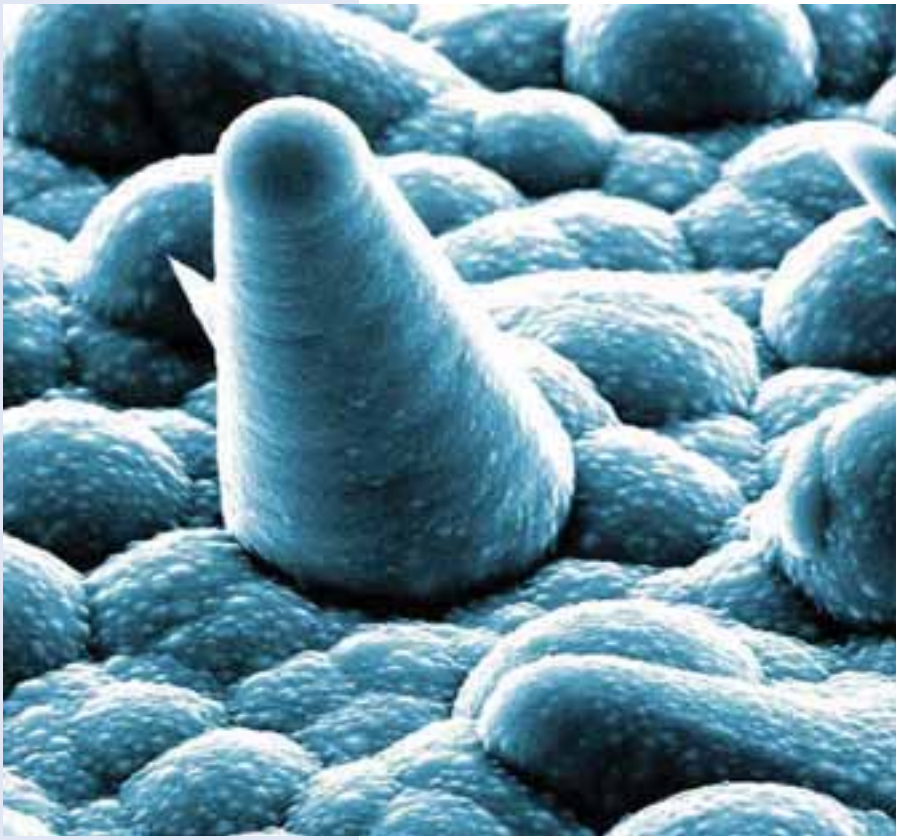
2. Woche

2. Woche *Katharina Kohse-Höinghaus und Andreas Brockhinke • Physikalische Chemie I, Universität Bielefeld*

Viele chemische Prozesse geschehen unmerklich für den menschlichen Betrachter, weil sie entweder zu schnell oder zu langsam ablaufen. Zwar ist der Mensch in der Lage, einen Zeitverlauf von Sekundenbruchteilen bis zu mehreren Tagen zu verfolgen. Sind Vorgänge jedoch wesentlich schneller oder langsamer, so entziehen sie sich unserer direkten Beobachtung. Die Zeitskala chemischer Veränderungen umfasst etliche Größenordnungen und in den extremen Bereichen versagt die menschliche Wahrnehmung. So ist etwa der Diamant, ein Symbol für Beständigkeit, in Wirklichkeit instabil: Er verwandelt sich ganz langsam in Graphit. Das Ausmaß dieser Umwandlung ist in einer menschlichen Lebensspanne allerdings unbedeutend. Am anderen Ende des zeitlichen Kontinuums finden sich sehr schnelle chemische Prozesse. In außerordentlich rascher Abfolge erfahren einzelne Atome, Moleküle oder Molekülverbände chemische Veränderungen: Stöße mit Nachbarmolekülen und Wechselwirkungen mit der unmittelbaren Umgebung führen zu Energieaustausch, Drehung um Bindungsachsen, Vibrieren des



Mit Farbstoffen markierte Proteine werden mit kurzen Laserpulsen analysiert – die Lichtemission enthält charakteristische Information über die Proteinumgebung.
Der Laserstrahl ist als Kette blauer Lichtpunkte zu erkennen.



Turm aus Silizium. Solche kegelförmigen Strukturen entstehen bei der chemischen Abscheidung von Silizium aus der Gasphase an bestimmten Fehlstellen im Trägermaterial (farbig unterlegte elektronenmikroskopische Aufnahme).

gesamten Molekülgerüstes oder zur Bewegung einzelner Baugruppen und letztlich auch zum Ausbilden neuer chemischer Verbindungen.

Um schnelle chemische Vorgänge „in Echtzeit“ zu verfolgen, wenden wir die laserinduzierte Fluoreszenzspektroskopie – kurz: LIF – an, mit Laserpulsen im Pikosekundenbereich. Eine Pikosekunde ist der billionste Teil einer Sekunde (1 ps = 10^{-12} s). Jeder Laserpuls entspricht dabei der Verschlusszeit bei der Fotografie, und so erhält man mit diesem Verfahren Momentaufnahmen des Reaktionsablaufs. Da nur „passendes“ Licht von einem bestimmten Molekül aufgenommen („absorbiert“) wird, und es danach wiederum nur Licht charakteristischer Frequenzen (die Fluoreszenz) abstrahlt, kann man verschiedene Moleküle auch in sehr komplexen Reaktionssystemen unterscheiden.

Die Laser-Spektroskopie mit Pikosekunden-Pulsen ist besonders interessant für den Nachweis von Umlagerungen in biochemisch wichtigen Molekülen, wie DNA, Peptiden oder Proteinen.

Mit spektroskopischen Methoden lässt sich feststellen, ob Biomoleküle an einer spezifischen Stelle miteinander wechselwirken, und ob räumliche Veränderungen in der Gegend dieser „aktiven“ Zentren zu einem veränderten Reaktionsverhalten führen. Ein Beispiel ist die Wechselwirkung eines Wirkstoffes (oder Medikaments) mit einem Zielprotein. Nur dann, wenn sich beide Stoffe an der richtigen Stelle auf Abstände einiger Nanometer nahe kommen, kann die entsprechende Wechselwirkung stattfinden. Mit Fluoreszenzfarbstoffen markierte Bestandteile des Biomoleküls dienen dabei als molekulare Sonden für die Laseranalyse. Die untersuchten Fragestellungen reichen vom Studium der Reaktion pflanzlicher Proteine auf Stressfaktoren bis zur Identifizierung embryonaler Zellen im Blutplasma schwangerer Frauen zur Früherkennung möglicher Krankheitsrisiken des Kindes.

Komplexe Reaktionssysteme finden sich jedoch nicht nur in der Biochemie. In unserem Fall sind das zum Beispiel auch Verbrennungsprozesse, bei denen wir kurzlebige Zwischenprodukte nachweisen, die etwa für die Schadstoffbildung interessant sind. Nicht nur das erwähnte LIF-Verfahren und weitere Lasertechniken kommen hierbei zum Einsatz, sondern auch verschiedene Arten der Massenspektrometrie. In Kombination erlauben diese Analysenmethoden, sich detaillierte Einblicke in die sehr verschlungenen Reaktionswege vom Brennstoff-Luft-Ge-

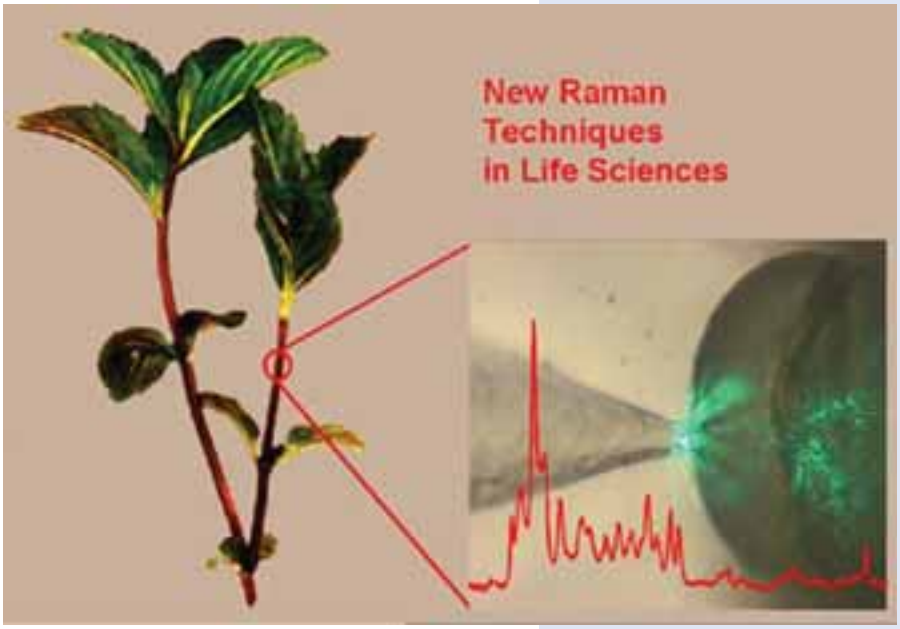
misch bis hin zu hochmolekularen Rußvorläufern zu verschaffen und so die Grundlage für Strategien zur Schadstoffminderung zu schaffen und zu erweitern.

Andere Reaktionssysteme, in denen der Nachweis einzelner Zwischenprodukte Auskunft über den Reaktionsablauf geben kann, sind solche zur Materialabscheidung aus der Gasphase. Mit so genannten CVD-Verfahren (CVD = Chemical Vapour Deposition) werden in einer geeigneten Reaktionsumgebung auf vorbehandelte Unterlagen („Substrate“) dünne Schichten abgeschieden, die besondere Eigenschaften haben, also beispielsweise besonders verschleißfest oder extrem leitfähig sind. Die Anwendungen reichen von der Herstellung höchstintegrierter Bauelemente über effiziente Katalysatoren und kostengünstige Solarzellen bis zu hochtemperaturfesten Turbinenschaufeln für zukünftige Kraftwerke.

4.2 Raman-Spektroskopie: ein Schlüssel zur Lösung vieler physikalisch-chemischer und biophysikalischer Fragestellungen

8. Woche *Jürgen Popp • Institut für Physikalische Chemie, Friedrich-Schiller-Universität Jena;*
Wolfgang Kiefer • Institut für Physikalische Chemie, Universität Würzburg

Den überwiegenden Teil unserer heutigen Kenntnisse über die Struktur der Atome oder Moleküle verdanken wir laserspektroskopischen Untersuchungen. Detaillierte Erkenntnisse direkt auf molekularer Ebene können beispielsweise mit der Raman-Spektroskopie gewonnen werden. Die Raman-Spektroskopie liefert



Mit Hilfe der Mikro-Raman-Spektroskopie können biologische Moleküle direkt in Pflanzen lokalisiert und identifiziert werden.

Informationen über den strukturellen Aufbau organischer, anorganischer und biologischer Moleküle und erlaubt damit unter anderem die Bearbeitung biologisch-medizinischer Fragestellungen auf Molekülebene.

Der Raman-Effekt wurde 1928 von Raman und Krishnan in Indien entdeckt und liefert Informationen über Schwingungs- und Rotationszustände von Molekülen. Er ist die Konsequenz einer Wechselwirkung von elektromagnetischer Strahlung mit der Elektronenhülle der Moleküle. Zur Anregung wird die Probe mit einem Laser bestrahlt. Während der größte Teil (99,99 Prozent) des Laserlichtes die Probe durchstrahlt, wird ein kleiner Anteil an den Molekülen in alle Raumrichtungen gestreut. Diese so genannte elastische Lichtstreuung der Lichtquanten des Lasers an den Molekülen bezeichnet man als Rayleigh-Streuung. Sie hat die gleiche Wellenlänge wie das Laserlicht. Ein extrem geringer Anteil der Lichtquanten wird inelastisch an den Molekülen gestreut: Sie besitzen nach der Wechselwirkung eine andere Frequenz als die eingestrahlte. Diese inelastische Streuung be-

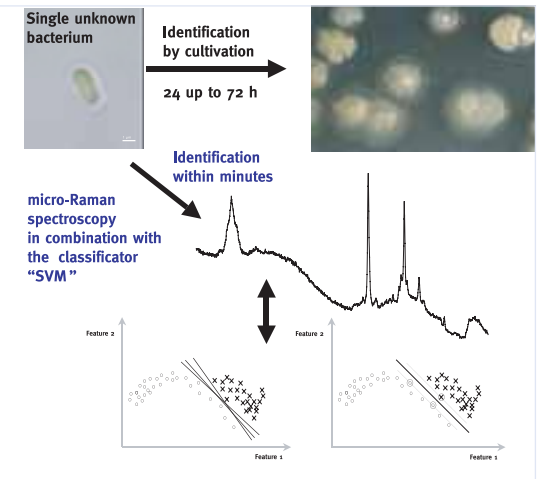
8. Woche

zeichnet man als Raman-Streuung. Sie resultiert aus der Tatsache, dass sich die Elektronenhülle eines Moleküls deformieren kann, während die Kerne des Moleküls gegeneinander schwingen. Der Frequenzunterschied zwischen den inelastisch gestreuten Lichtquanten und den eingestrahlten Lichtquanten enthält somit Informationen über Schwingungen der Moleküle.

Durch Kombination eines Raman-Spektrometers mit einem Lichtmikroskop (Mikro-Raman-Spektroskopie), ist eine axiale und laterale Auflösung bis in den Bereich von unter einem Mikrometer realisierbar, wodurch sich zwei oder dreidimensionale Raman-Bilder aufzeichnen lassen, was zu vielen Anwendungsbereichen der Raman-Spektroskopie führt.

Biologie und Medizin

Der Einsatz In-vivo-Raman-spektroskopischer Untersuchungen von Geweben und Zellen in der medizinischen, pharmazeutischen und biologischen Diagnostik gewinnt zunehmend an Bedeutung. Die Aufgabe von In-vivo-Methoden besteht darin, Informationen über Zellinhaltsstoffe in der lebenden Zelle zu liefern, ohne diese zu zerstören. Mit Hilfe der Mikro-Raman-Spektroskopie können Raman-Spektren von einzelnen Zellen, Zellorganellen oder ausgewählten Gewebebereichen aufgenommen werden.



Mit Hilfe der Mikro-Raman-Spektroskopie kann man Mikroorganismen wie Hefen oder Bakterien schnell und vor Ort ohne weitere Kultivierung identifizieren.

Da sich mit der Raman-Spektroskopie auch krankheitsbedingte Veränderungen innerhalb von Gewebeproben beobachten lassen, findet die Raman-Spektroskopie vermehrt Einsatz zur minimalinvasiven Diagnostik von Tumor- und Krebserkrankungen. Ein weiteres Einsatzgebiet ist die Untersuchung der Wirkmechanismen von Arzneistoffen direkt auf molekularer Ebene.

Mineralogie und Planetologie

Für das Verständnis der Entwicklung von Planeten ist eine genaue Untersuchung des Oberflächenmaterials und seiner mineralischen Komponenten eine wesentliche Voraussetzung. Die In-situ-Raman-Spektroskopie kann präzise Informationen über die mineralogische Zusammensetzung der Oberfläche der terrestrischen Planeten liefern. Qualitative und quantitative Informationen über die räumliche Verteilung und Zusammensetzung der Mineralkomponenten in der Probe können erhalten werden. Ferner lassen sich kleinste organische und anorganische Stoffmengen Raman-spektroskopisch identifizieren, was für das Gebiet der Exo-Biologie von Bedeutung ist.

Umwelt und Gesundheit

Mikropartikel, also kleine Teilchen mit Durchmessern im Bereich von Submikrometern bis zu Millimetern, spielen eine zentrale Rolle im täglichen Leben. Eine elegante Methode für ein detailliertes Studium von chemischen oder physikalischen Abläufen in einem einzelnen Mikrotröpfchen ist die optische Levitation oder optische Pinzette, bei welcher der

Strahlungsdruck eines Lasers ausgenutzt wird, um das Mikroteilchen frei im Raum schweben zu lassen. Das Laserlicht der optischen Pinzette dient hierbei gleichzeitig als Strahlungsquelle für Lichtstreuexperimente und als Instrument für die optische Levitation. Aus den Daten der elastischen Lichtstreuung (Mie-Streuung) können sehr genau der Radius sowie der Brechungsindex des Mikrotröpfchens und aus den Raman-Spektren dessen chemische Zusammensetzung bestimmt werden.

Biomoleküle unter der Lupe.

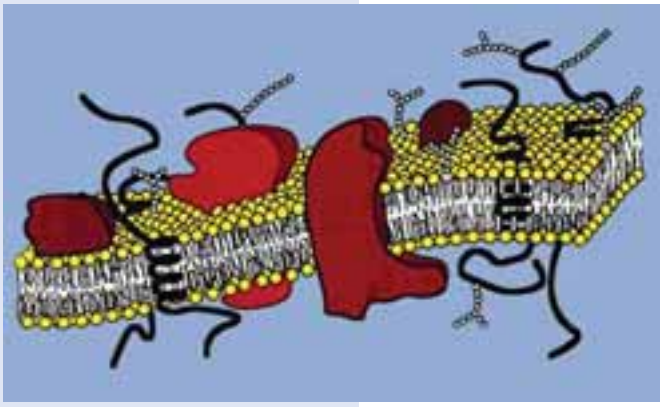
4.3 „Biomoleküle unter der Lupe“, Biophysikalische Chemie = Biologie + Physik + Chemie: ein Beitrag zum Verständnis komplexer biologischer Systeme

12. Woche *Roland Winter* • *Physikalische Chemie, Universität Dortmund*

Während Chemie, Physik und Biologie sich im letzten Jahrhundert weitgehend auseinander gelebt haben, ist seit einigen Jahren eine umgekehrte Tendenz erkennbar. Dies ist umso wichtiger, als es in der jetzigen Postgenom-Ära darum geht, Genaktivität und Funktion der Proteine und anderer Biomoleküle in einer Zelle zu verstehen. Das molekulare Verständnis der Lebensvorgänge rückt immer mehr in den Vordergrund naturwissenschaftlicher Forschungsarbeiten. Biophysikalische Chemie und Biophysik haben daher in den letzten Jahrzehnten an Bedeutung gewonnen. Ihr Erfolg ist insbesondere auf Fortschritte im Bereich der physikalisch-chemischen Untersuchungsmethoden und der Entwicklung neuer theoretischer Ansätze zum Verständnis der Selbstorganisation und Funktion biologischer Materie zurückzuführen, die es heute erlauben, selbst relativ komplexe biochemische Systeme hinsichtlich ihrer strukturellen und dynamischen Eigenschaften analysieren zu können.

Hier soll ein kleiner Einblick in die biophysikalisch-chemische Arbeitsweise gegeben werden (Einführung in die Prinzipien ausgewählter Methoden, repräsentative Anwendungsbeispiele; Detailinformationen zu den genannten Punkten finden sich auf beiliegender CD-ROM):

- Fluoreszenzspektroskopie als Methode, Proteinen bei der Aggregation zuzuschauen
- Rasterkraftmikroskopie an Lipidmembranen und anderen biomolekularen Systemen
- Fluoreszenzmikroskopie – zur direkten Visualisierung biomolekularer Systeme
- Biofilme auf Materialoberflächen
- Sekundärstrukturbestimmung von Proteinen mittels Infrarot-Spektroskopie
- Atomkerne als Spione – die NMR-Spektroskopie zur Proteinstrukturermittlung
- Kleinwinkelstreuung – über die Größe und Form von Biomolekülen
- Computersimulation biomolekularer Systeme



Das tragende Element einer biologischen Membran ist eine aus verschiedenen Phospholipiden aufgebaute Doppelschicht, in die Steroide, wie etwa Cholesterol, und als funktionelle Einheiten Proteine eingelagert sind. Aufgrund der Komplexität natürlicher Membranen finden physikalisch-chemische Untersuchungen zur Struktur und Dynamik von Membranen notwendigerweise an Modellsystemen statt, die nur aus wenigen Komponenten bestehen.

„What is life?" So lautete der Titel des berühmten Buches von Erwin Schrödinger von 1944. Es war ein erster Versuch, einige Wunder der Biologie im Rahmen der Gesetze der Physik, insbesondere der Statistischen Mechanik, zu verstehen. Etwa 20 Jahre später (1963) schrieb Richard P. Feynman in seinen berühmten Lectures on Physics: „Certainly no subject or field is making more progress on so many fronts at the present moment than biology, and if we were to name the most powerful assumption of all, which leads one on and on in an attempt to understand life, it is that all things are made of atoms, and that everything that living things do can be understood in terms of the jigglings and wigglings of atoms". Mit faszinierenden neuen physikalisch-chemischen Techniken und neuen theoretischen Ansätzen sowie mit Hilfe effektiver werdender Computer-Simulationsmethoden rücken wir heute dem Ziel näher, immer mehr biologische Teilsysteme quantitativ auf molekularer Ebene verstehen zu können.

Biophysikalische Chemie an der Universität Dortmund

Ziel unserer eigenen Arbeiten ist es, durch Untersuchungen an biologischen Modellsystemen, wie Modellbiomembranen und einfachen Proteinen, ein tieferes Verständnis ihrer molekularen Eigenschaften und damit auch der Funktion der komplexeren natürlichen Systeme zu gewinnen. An Modellbiomembranen interessiert uns die Aufklärung der Struktur, Dynamik und des Phasenverhaltens von Lipiden und Membranen, die theoretische Beschreibung der Ursachen ihrer supramolekularen Organisation sowie der Einfluss von Zusatzkomponenten, wie Cholesterol, Pharmaka, Polypeptiden und Proteinen, auf die Eigenschaften der Membransysteme.

Neben den Grundlagenaspekten werden auch anwendungsbezogene Fragestellungen bearbeitet, wie etwa die Verkapselung pharmakologisch aktiver Substanzen. Unsere Arbeiten an Proteinen widmen sich der Korrelation zwischen ihrer Struktur und Stabilität, der Kinetik der Proteinfaltung, aber auch der Missfaltung und Aggregation von Proteinen. Die Kenntnis dieser Eigenschaften ist notwendig, um Proteine mit bestimmten Eigenschaften gezielt synthetisieren zu können, und sie ist Voraussetzung für das Design von Wirkstoffen gegen Krankheiten, die beispielsweise – wie Alzheimer – auf der Missfaltung von Proteinen beruhen. Ein besonderes Augenmerk unserer Untersuchungen richtet sich auf Hochdruckeffekte in der molekularen Biophysik. Das Studium des Einflusses hoher Drücke auf Biomoleküle hat auch biologische und biotechnologische Bedeutung, etwa für das Verständnis der Physiologie von Tiefseeorganismen oder die Haltbarmachung von Nahrungsmitteln durch Anwendung hoher Drücke.

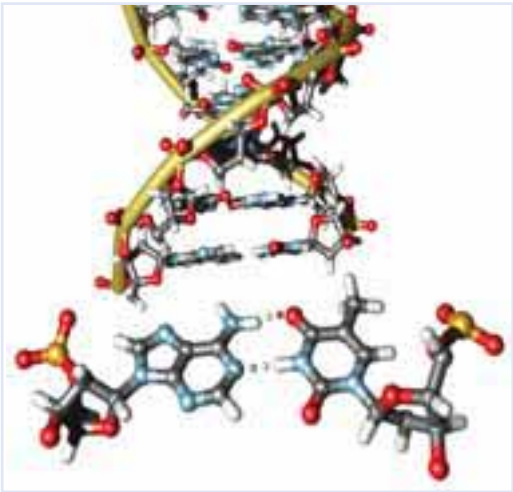
15. Woche

4.4 Intermolekulare Wechselwirkungen mit „unsichtbarem" Infrarotlaserlicht sichtbar gemacht

15. Woche *Erik Bründermann und Martina Havenith • Physikalische Chemie II, Ruhr-Universität Bochum*

Was sind „Intermolekulare Wechselwirkungen“?

Die intermolekulare Wechselwirkung bewirkt viele Phänomene des Alltags: die Stabilität von Seifenblasen, die Bildung von Wassertropfen, dass Geckos an der Decke laufen können, die Form von Eiskristallen und vieles mehr. Diese Wechselwirkung hält Moleküle zusammen ohne eigentliche „chemische“ Bindung. Sie wirkt intermolekular, also „zwischen“ den Molekülen. Ein Spezialfall der intermolekularen Wechselwirkung ist die Wasserstoffbrückenbindung. Sie ist stark gerichtet und erlaubt daher die Bildung von Strukturen wie der DNA.



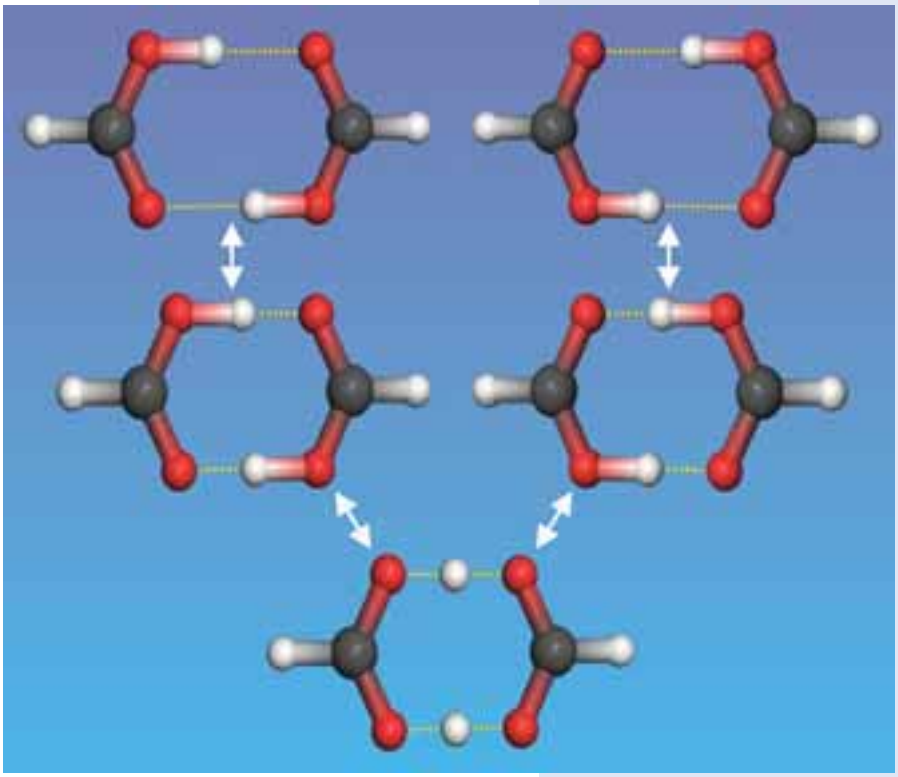
Wasserstoffbrückenbindungen sind entscheidend beispielsweise für die Struktur der DNA.

Wo das Chemie-Lehrbuch irrt oder „Das Rätsel des Ammoniak-Dimers“

Ammoniak kann Protonendonor und Protonenakzeptor sein. Das Ammoniak-Dimer galt lange als Lehrbuchbeispiel für die Wasserstoffbrückenbindung. Wenn wir der so genannten „chemischen Intuition“ folgen, würden wir annehmen, dass das Ammoniak-Dimer eine lineare Wasserstoff-Brückenbindung ausbildet. In alten Modellen wird Stickstoff eine negative Partialladung zugeordnet und Wasserstoff eine positive. Beide sollten sich wie gegensätzlich gepolte Pole zweier Magnete linear ausrichten. Auch alle genauen theoretischen Berechnungen sagten eine lineare H-Brücke voraus. Unsere Experimente ergaben, dass sich beim Ammoniak-Dimer keine lineare H-Brücke ausbildet. Offensichtlich wurde in vorherigen theoretischen Berechnungen die gegenseitige Abstoßung des freien Elektronenpaares an der dreizähligen Drehachse des Ammoniak-Monomers unterschätzt.

„Wie schnell tunnelt ein Proton?“

Im Ameisensäure-Dampf bilden sich neben Monomeren auch Dimere aus. Das Ameisensäure-Dimer ist ein Prototyp für eine doppelte Wasserstoffbrückenbindung wie sie in der DNA-Doppelhelix vorkommt. Selbst dieses relativ kleine Modellsystem zeigt, dass eine Bindung nicht starr, sondern sehr dynamisch ist. Durch einen Effekt der Quantentheorie, der so



Bei Dimeren der Ameisensäure wechseln die Protonen aufgrund der Tunnelwahrscheinlichkeit blitzschnell (in sechs Nanosekunden) ihre Plätze.

genannten Tunnelwahrscheinlichkeit, ist es möglich, dass ein Wasserstoffatom oder ein Proton – wenn wir nur den Kern betrachten – in der Wasserstoffbrückenbindung den Platz wechselt. Gleichzeitig tunnelt auch das andere Proton. Aufgrund von neuen Messungen ist es uns erstmals gelungen, die Zeit zu messen, die Protonen für den Wechsel von der einen zur anderen Seite benötigen. Der Protonentransfer benötigt nur sechs Nanosekunden (0,000000006 Sekunden).

Solche relativ kleinen Molekülsysteme können bestehende Lehrbuchmeinungen korrigieren und neue Impulse für die Verbesserung theoretischer Modelle liefern. Diese können dann mit einer höheren Genauigkeit auf größere Molekülsysteme wie Proteinstrukturen angewendet werden. Für zukünftige Forschergenerationen bleibt also noch viel zu tun.

„Die Suche nach den Fingerabdrücken der Moleküle“ und Moderne Infrarot-Laserspektroskopie

Wie können wir Molekülstrukturen entdecken? Jedes Molekül kann bei charakteristischen Frequenzen (oder Farben) Licht aufnehmen oder abgeben. Diese Übergänge sind diskret und führen zu scharfen Linien, wie es in der Quantentheorie beschrieben wird. Da das Linienmuster in Anzahl, Form und Intensität für jedes Element charakteristisch ist, ähnlich wie ein Fingerabdruck für den Menschen, hat sich der Begriff des „spektralen Fingerabdrucks“ eingebürgert.

Die Schwingungen in einem Molekül sind charakteristisch für die gebundenen Elemente. Mit Hilfe moderner Lasertechnik kann der resultierende infrarote Fingerabdruck aufgezeichnet werden. Damit können kleinste Stoffmengen (1 Teilchen in 10^9 anderen Teilchen) – also buchstäblich die Stecknadel im Heuhaufen – nachgewiesen werden. Aus dem Fingerabdruck kann die Struktur erschlossen werden. In der modernen hochauflösenden Spektroskopie ist die Lichtquelle ein intensiver Infrarot-Laser, der eine scharfe Frequenz („infrarote Farbe“) emittiert. Diese einzigartigen Hightech-Infrarot-Laser wurden in Zusammenarbeit mit unseren Studenten im Eigenbau entwickelt.

Vom Molekül zur Flüssigkeit, zur Zelle, zum Menschen

Ebenso wie Moleküle in Gasen können wir Moleküle in Flüssigkeiten und Festkörpern identifizieren. Durch Rastern eines fokussierten Laserstrahls können mikro- und nanoskopische Aufnahmen hergestellt werden. Diese zeigen dann in einer „molekularen Landkarte“ die Verteilung der Moleküle, zum Beispiel den Wassergehalt von lebenden Zellen. Ist der Wassergehalt nicht normal, kann dies zu einer verstärkten Replikation von Viren führen. Die Entwicklung eines solchen chemischen Nanoskops führen wir zusammen mit Studenten der Biochemie und Fakultäten der Medizin interdisziplinär durch.

18. Woche

4.5 Massenanalyse von Biomolekülen im Pikoliter-Maßstab

18. Woche *Bernd Brutschy* • *Institut für Physikalische und Theoretische Chemie, Johann-Wolfgang-Goethe-Universität Frankfurt am Main*

Massenspektrometrie erlaubt die schnelle und empfindliche Massenbestimmung von Molekülen und die Aufklärung ihrer Struktur. Dazu müssen die Moleküle geladen sein und sich in der Gasphase be-

finden. Beide Forderungen sind mit großen Makromolekülen nicht einfach zu realisieren.

Der Beitrag behandelt ein in unserer Arbeitsgruppe entwickeltes neues Verfahren zur Massenspektrometrie von Biomolekülen und ihren nichtkovalent-gebundenen Komplexen. Es beruht auf der Laserdesorption von Ionen aus der Lösung. Dazu wird die Flüssigkeit entweder als Mikroflüssigkeitsstrahl (beam) oder in jüngster Zeit als Mikrotropfen (bead) ins Vakuum eingebracht. Mit einem gepulsten Infrarotlaser werden die Schwingungen der Lösungsmittelmoleküle angeregt. Oberhalb einer Schwellenintensität kommt es zur laserinduzierten Explosion der Flüssigkeit und zur Freisetzung von in Lösung präformierten Ionen.

Der Mechanismus ist sehr wahrscheinlich eine unvollständige Ionenrekombination beim Übergang der solvatisierten Ionen von der Flüssig- in die Gasphase. Das als LILBID (laser-induced liquid beam/bead ion desorption) bezeichnete Verfahren hat gegenüber den mit dem Nobelpreis ausgezeichneten MS-Methoden MALDI (matrix assisted laser desorption/ionization) und ESI (electrospray ionization) einige Vorteile, befindet sich aber noch in der Entwicklung.

Bislang konnten zahlreiche Biomoleküle sehr sanft, also fast fragmentationsfrei aus wässriger Lösung nachgewiesen werden. Beispiele sind kleine Glycoside wie das Antibiotikum Neomycin oder große Peptidkomplexe wie Hämoglobin. Auch der Nachweis von doppelsträngiger DNA mit spezifisch angelagertem Antibiotikum ist möglich. Weitere Beispiele sind der HIV-Regulationskomplex Tat-TAR

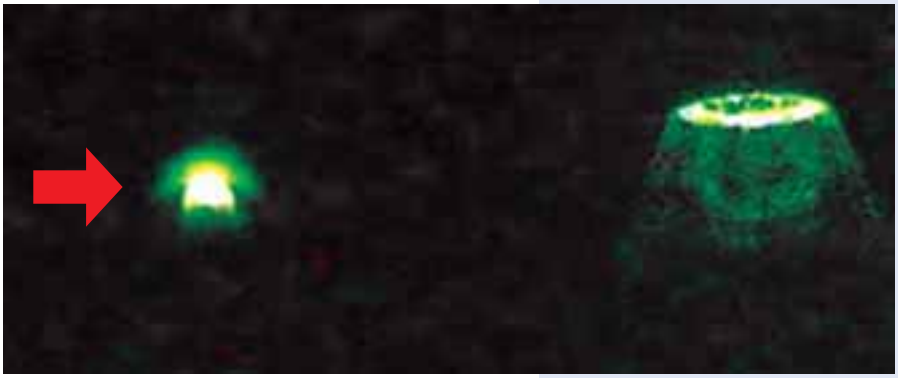


Bild eines Wassertropfens 100 Nanosekunden (links) und 1000 Nanosekunden (rechts) nach dem Desorptions-Laserpuls.

oder die auf molekularer Erkennung beruhende Bindung zwischen dem „Letzte-Rettung-Antibiotikum“ Vancomycin und den Peptiderkennungssequenzen von Staphylokokken (Bakterien). Das Verfahren ist so empfindlich, dass bei mikromolaren Analytkonzentrationen meist ein Lösungströpfchen von 50 Pikoliter Volumen ausreicht, um ein Massenspektrum aufzunehmen.

Potentielle Anwendungen von LILBID liegen im Bereich der Hochdurchsatzanalytik, wie sie beispielsweise in der Arzneimittelentwicklung eingesetzt wird.

4.6 Spektroskopie isolierter Biomoleküle und ihrer Aggregate – was die Welt im Innersten zusammenhält

21. Woche

21. Woche *Karl Kleinermanns, Hans Bettermann, Markus Gerhards, Michael Schmitt und Rainer Weinkauf*

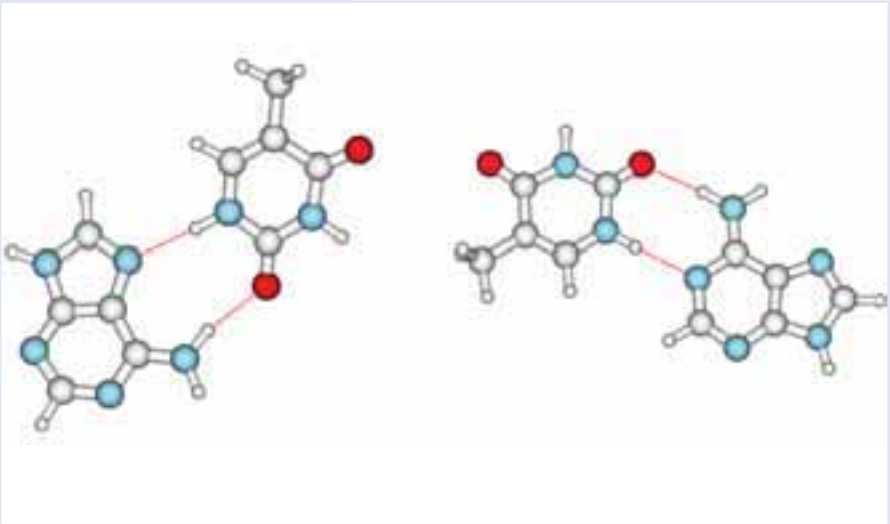
• *Institut für Physikalische Chemie, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf*

Am Lehrstuhl für Molekülspektroskopie und Nanosysteme beschäftigen wir uns vornehmlich mit der Frage, wie Moleküle mit biologischer Relevanz ihre Eigenschaften modifizieren, wenn sie Aggregate oder molekulare Komplexe bilden. Ziel ist es, die Eigenschaften wichtiger Bausteine unseres Lebens wie die Netzwerkstruktur des Wassers, die Bildung der

Paarstrukturen in der DNS, die Faltung von Peptiden oder den Schutz der Chlorophyllmoleküle in den lichtsammelnden Komplexen vor photooxidativen Angriffen auf der Ebene molekularer Strukturen detailliert zu verstehen.

Die Strukturen der genannten Systeme werden größtenteils durch Brücken von Wasserstoffatomen zwischen zwei elektronegativen Elementen aufgebaut oder durch zwischenmolekulare Kräfte gebildet, die durch die wechselseitige Beeinflussung molekularer π-Systeme entstehen.

Um die spezifischen molekularen Details zu erkennen, werden die experimentellen Untersuchungen vorwiegend in der Gasphase bei ultratiefen Temperaturen, in ultraverdünnten Lösungen oder als monomolekulare Schichten auf inerten Trägeroberflächen durchgeführt. Die molekularen Systeme werden dabei durch laserspektroskopische Methoden in Verbindung mit Massenspektroskopie und Rastertunnelmikroskopie untersucht.



Berechnete Strukturen des Adenin-Thymin-Clusters.

Die laserspektroskopische Untersuchung von DNS-Basenpaaren, die unbeeinflusst von molekularen Umgebungseinflüssen aggregierten, gelang durch Präparation der Basenpaare in einem Überschalldüsenstrahl. Aus dem Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit quantenchemischen Rechnungen ließen sich genaue Aussagen über die Struktur des Adenin-Thymin-Clusters machen. Dabei zeigte sich, dass in freien Adenin-Thymin-Clustern weder die Watson-Crick noch die Hoogsteen Strukturen vorliegen, sondern eine noch stabilere Anordnung.

Von Porphyrinen und speziell Chlorophyllen ist bekannt, dass sie in polaren Lösungsmitteln ausgedehnte Assoziate bilden. Über die Struktur der Assoziate war bis dato nur wenig bekannt. Rastertunnelmikroskopische Messungen an Graphitoberflächen lieferten erstmals ein direktes Bild selbstorganisierter Bakteriochlorophylle und synthetischer Chlorine. Es konnte gezeigt werden, dass bestimmte funktionelle Gruppen des Chlorophylls von essentieller Bedeutung für die Aggregation sind (AG Kleinermanns).

Porphyrine zeigen auch in Lösungen eine ausgeprägte Tendenz zur Aggregation, die sich auch in hoch verdünnten Lösungen mit Hilfe der Fluoreszenzspektroskopie beobachten lässt. So konnten in 10^{-19} M Lösungen des Tetratolylporphyrin dimere Aggregate nachgewiesen werden. (AG Bettermann).

Intermolekulare Wasserstoffbrückenbindungen in isolierten Peptiden lassen sich detailliert durch laserspektroskopische Experimente in der Gasphase vermessen. Speziell wurde die ß-Faltblattstruktur untersucht, die eine der bedeutendsten Sekundärstrukturen der Peptide ist. Daneben wurden optimale Templatmoleküle gesucht, die sich an Peptide in der geo-

metrischen Ausrichtung einer ß-Faltblattanordnung anlagern mit dem Ziel, die fortschreitende Ausbildung von pathogenen ß-Faltblattstrukturen zu inhibieren. Dieser Mechanismus wird für die Creutzfeldt-Jakob Krankheit oder BSE (Prionenkrankheiten) angenommen (AG Gerhards).

Details über die unmittelbare Veränderung von Molekülgeometrien in Molekülaggregaten im Vergleich zu denen der freien Moleküle sowie die Bestimmung intermolekularer Bindungslängen lassen sich mit Hilfe der rotationsauflösenden laserinduzierten Fluoreszenzspektroskopie erhalten. Hierbei können Molekülgeometrien nicht nur im elektronischen Grundzustand sondern auch in elektronisch angeregten Zuständen bestimmt werden (AG Schmitt).

Schließlich können in Makromolekülen verschiedene Bereiche eine überschüssige Ladung aufnehmen. Proteine und DNS sind beispielsweise jeweils aus ähnlichen Einzelbausteinen aufgebaut und besitzen deshalb mehrere iso- oder nahezu isoenergetische Ladungspositionen. Der Ladungstransport zwischen diesen Positionen kann als schrittweiser Prozess über Zwischenpositionen längs der Kette beschrieben werden. Bislang wurden die nichtflüchtigen Moleküle durch eine Laserdesorption in die Gasphase gebracht. Der Vorteil von Untersuchungen an Anionen liegt in der Größenselektion der Moleküle und Cluster vor den spektroskopischen Untersuchungen und im Zugang zu Triplett und ladungsgetrennten Zuständen. Diese sind aus dem neutralen Grundzustand der Moleküle oft nicht direkt erreichbar und deshalb in vielen Systemen unbekannt (AG Weinkauf)

4.7 Umweltschutz und Biotechnologie mit Laserlicht

36. Woche *Jürgen Wolfrum, Christof Schulz, Hans-Robert Volpp, Volker Ebert und Markus Sauer* • *Physikalisch-Chemisches Institut, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg*

Es gibt wenige Dinge, ohne die man sich die Existenz des Menschen nicht vorstellen könnte. Zu ihnen zählt zweifellos das Feuer. Derzeit werden jährlich fossile Energievorräte verbraucht, die sich in einer Million Jahren gebildet haben. Die hierbei entstehenden Schadstoffe führen zu den bekannten unerwünschten Veränderungen in der Atmosphäre („Sommersmog“) und Biosphäre („Waldsterben“). Trotz aller Bemühungen um alternative Energiequellen beruht zurzeit immer noch etwa 85 Prozent der Weltenergieversorgung auf der Nutzung von Verbrennungsprozessen. Die Entwicklung umweltfreundlicher und effizienter neuer Verbrennungsverfahren kann in Zukunft jedoch kaum noch wie bisher auf überwiegend empirische Weise durch „trial and error“ rasch genug vorangebracht werden. Es ist vielmehr ein radikal neuer

Die Feuerforschung kann besonders in Heidelberg auf eine lange Geschichte zurückblicken, die möglicherweise bis zu den Tagen des „homo heidelbergensis“ von Mauer zurückreicht und in der Mitte des vorletzten Jahrhunderts durch die Entdeckung der Spektralanalyse im Rahmen der Zusammenarbeit zwischen dem Chemiker Robert Wilhelm Bunsen und dem Physiker Gustav Kirchhoff in Heidelberg einen entscheidenden Impuls bekommen hat.

Ansatz notwendig. Dieser besteht darin, Verbrennungsvorgänge nicht mehr summarisch zu beschreiben, sondern aus ihren mikroskopischen chemischen und physikalischen Prozessen zusammenzusetzen und daraus die sichtbaren Wirkungen abzuleiten.

Die Entwicklung leistungsfähiger Laserlichtquellen in einem weiten Wellenlängenbereich hat auf dem Gebiet der berührungsfreien optischen Diagnostik zu wesentlichen Fortschritten geführt. Durch Einsatz linearer und nichtlinearer laserspektroskopischer Techniken wie laserinduzierter Fluoreszenz (LIF), kohärenter anti-Stokes-Raman-Spektroskopie (CARS), Raman-, Rayleigh- und Mie-Streuung sowie abstimmbarer Infrarotlaser lassen sich wichtige Parameter in chemischen und biologischen Prozessen mit hoher zeitlicher Auflösung sowohl punktweise wie auch in mehreren Dimensionen simultan erfassen.

Anwendungsgebiete dieser Messtechniken sind weit gefächert: So ist die Laserdiagnostik zum Beispiel eine bewährte Methode zur Analyse von Verbrennungsprozessen – sei es bei Kraftwerken, Automobilmotoren oder Flugzeugtriebwerken. Durch Einstrahlung von intensivem Laserlicht können in Verbrennungsprozessen Temperaturen, Konzentrationen und Geschwindigkeiten berührungslos gemessen werden. Neue Technologien erlauben inzwischen, flächenhafte, oder sogar dreidimensionale Informationen dieser Größen während des Verbrennungsvorganges zu gewinnen. Zur Lösung technischer Fragestellungen bezüglich Schadstoffproduktion, Verbrennungsablauf, Sprayausbreitung und Bildung der Kraftstoff/Luft-Mischung werden laseroptische Verfahren entwickelt, die direkte Messungen beispielsweise in modernen seriennahen Motoren ermöglichen.

Auch zur Erforschung von Oberflächenreaktionen werden Lasertechniken eingesetzt. Katalysatoroberflächen spielen eine wichtige Rolle für die Effektivität vieler alltäglicher und großtechnischer Prozesse. Neue nichtlineare laserspektroskopische Verfahren sowie die Rastertunnelmikroskopie ermöglichen eine quantitative Untersuchung von Oberflächenreaktionen unter realistischen Katalysebedingungen auf komplexen Oberflächen.

Neue, vielversprechende, auch industriell einsetzbare Möglichkeiten bieten auch die am Institut entwickelten absorptionsspektroskopischen Verfahren auf Basis von Nah-Infrarot (NIR) Diodenlasern. Mit diesen vom CD-Spieler oder der glasfasergestützten Datenübertragung bekannten Lasern lassen sich erstmals auch in Großkraftwerken Messungen durchführen, die deren Gesamteffizienz, Schadstofffreisetzung und Standzeit optimieren. NIR-Diodenlaser eignen aber auch für den empfindlichen Nachweis von Spurengasen. Dies konnte sowohl im Rahmen der Entwicklung eines tieftemperaturtauglichen (bis –100 °Celsius) Verfahrens zur Bestimmung von Wasserdampf in Aerosolen als auch eines besonders leichten und kompakten Spektrometers für den simultanen Nachweis von Wasser und Methan auf Stratosphärenballons gezeigt werden. Beide Methoden ermöglichen damit neue Erkenntnisse bei der Untersuchung der Chemie der Atmosphäre und insbesondere bei der Entstehung des Ozonloches.

Last but not least ist die Entwicklung neuer hochsensitiver diagnostischer Ver-

fahren zur Früherkennung von bakteriellen und viralen Infektionen, sowie zur Verlaufskontrolle von malignen Erkrankungen ein wichtiges Forschungsgebiet unseres Institutes. Zur Aufklärung der Struktur/Funktions-Zusammenhänge so genannter „Biomolekularer Maschinen“ werden neuartige Detektionsverfahren entwickelt, die eine genaue Aussage über die Anzahl der vorhandenen Moleküle und deren Abstände mit einer Auflösung von nur wenigen Nanometern ermöglichen sollen.

Vorbereitungen für den Start des ballongestützen in-situ-Laserspektrometers für den simultanen Nachweis von Wasser und Methan in der Stratosphäre (bis 35 km).

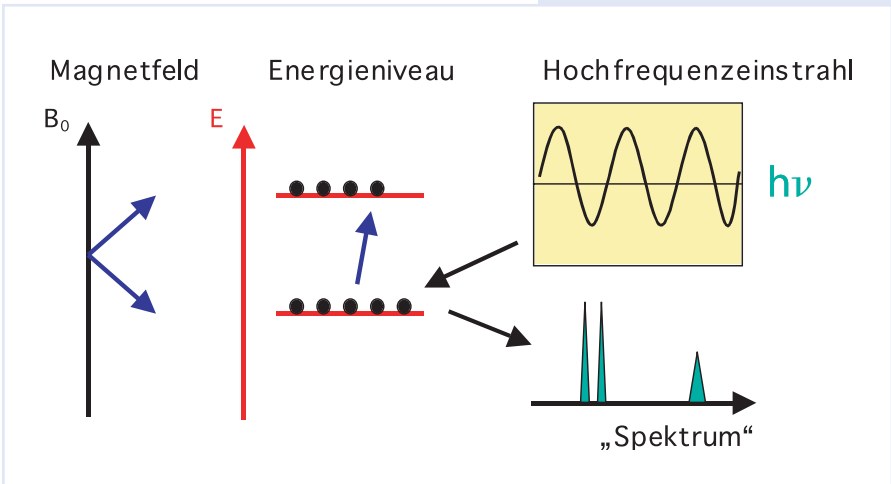
4.8 Struktur und Dynamik ungeordneter Festkörper: Kernspins als Spione

38. Woche *Hellmut Eckert und Thorsten Torbrügge • Institut für Physikalische Chemie, Westfälische Wilhelms-Universität Münster*

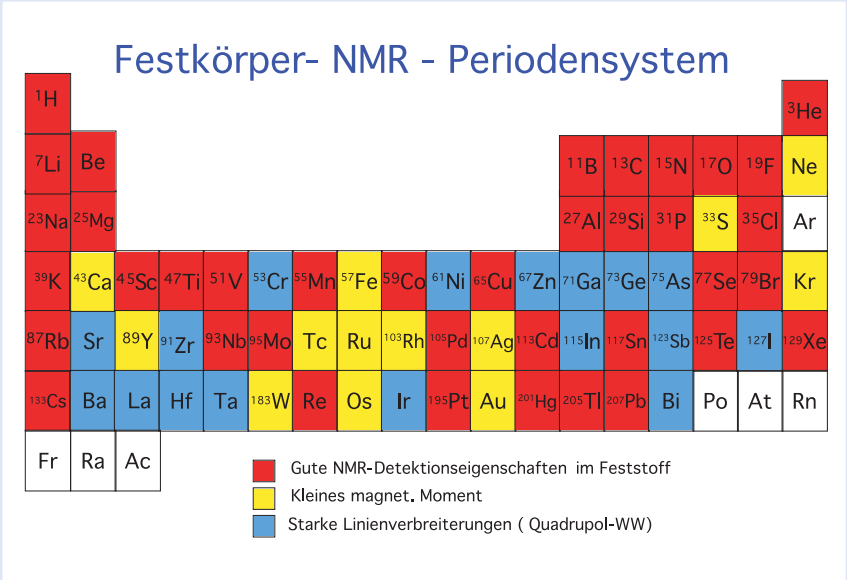
Zahlreiche materialwissenschaftlich interessante Festkörper haben vielfältige strukturelle und dynamische Fehlordnungen, die sich mittels Röntgenbeugung nur unvollständig charakterisieren lassen. Dann ist man auf spektroskopische Methoden angewiesen, die die Nahordnungen der beteiligten Atome abbilden können. Ein besonders leistungsfähiges Werkzeug hierzu ist die magnetische Kernresonanz-Spektroskopie (NMR = „nuclear magnetic resonance“). Wir beschreiben hier die Grundidee und eine einfache Anwendung aus unserer Forschung.

NMR basiert auf den magnetischen Momenten der Atomkerne, die in einem angelegten Magnetfeld nur ganz bestimmte Orientierungen einnehmen können. Im einfachsten Fall gibt es exakt zwei Einstellrichtungen, die unterschiedliche Energieinhalte besitzen. Durch Bestrahlung der Probe mit Radiowellen (UKW-Bereich) können wir Übergänge zwischen diesen Zuständen erzeugen, wenn ihre Energiedifferenz der Energie der eingestrahlten Radiowelle entspricht. Die Frequenz, bei welcher die Probe dann Strahlung absorbiert, die so genannte Resonanzfrequenz, hängt sowohl von der Stärke des angelegten Magnetfelds als auch von dem magnetischen Moment des gewählten Untersuchungskerns ab.

Von ganz entscheidender Bedeutung für strukturelle Untersuchungen ist, dass die Resonanzfrequenz maßgeblich von der



Grundprinzip der NMR-Spektroskopie.

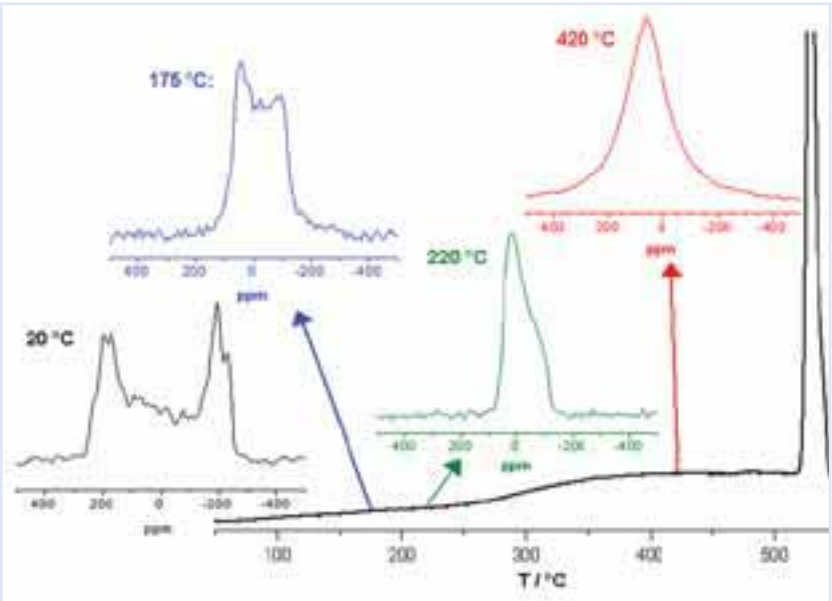


Überblick über die generelle Eignung möglicher Messkerne für die NMR-Spektroskopie im Festkörper. Jede Kernsorte besitzt ihren eigenen Resonanzfrequenzbereich und bezüglich der erhältlichen Informationen ihr eigenes „persönliches Profil".

orientiert ist. Verzichtet man auf das magic-angle-spinning, sind die Spektren generell durch anisotrope Wechselwirkungen im Festkörper asymmetrisch verbreitert. Die temperaturabhängige Spektrenform kann dann wertvolle Zusatzinformationen über atomare oder molekulare Bewegungsvorgänge im Millisekundenbereich liefern. Für jeden speziellen Bewegungsmechanismus kann dieser Effekt berechnet und mit experimentellen Daten verglichen werden.

chemischen Bindung beeinflusst wird. Gibt es also in einem Material für eine bestimmte Kernsorte zwei verschiedene chemische Bindungssituationen, beobachtet man entsprechend zwei unterscheidbare spektroskopische Signale, deren Intensitätsverhältnis zudem die relativen Häufigkeiten widerspiegelt. Eine optimale spektroskopische Auflösung der Signale wird mittels der magic-angle-spinning-Technik erzielt, bei welcher die gepulverte Probe sehr schnell (typisch sind 10000 Umdrehungen pro Sekunde) um eine Achse gedreht wird, die im Winkel von 54.7 Grad zur Magnetfeldrichtung

Die experimentellen Spektren sagen uns somit bei jeder Temperatur, in welcher Weise und auch wie schnell sich die Atome in unserem Stoff bewegen. Für Ag_3PO_4 haben wir aus unseren Messungen Hinweise darauf, dass die Diffusion der Ag^+-Ionen durch die Reorientierungsdynamik der Phosphattetraeder synergetisch unterstützt wird. Dieses Verhalten ist in der Literatur unter dem Begriff „Drehtürmechanismus" bekannt.



Differentialkalorimetrie (temperaturabhängige Auftragung der Molwärme) von kristallinem Silberphosphat Ag_3PO_4. Bei ca. 300 °Celsius wird ein Anstieg (Phasenübergang 2. Ordnung) und bei 525 °Celsius eine Diskontinuität der Molwärme (Phasenübergang 1. Ordnung) beobachtet. Unterhalb Raumtemperatur ist die Bewegung sehr langsam, und man beobachtet ein sehr breites Signal (schwarze Kurve). Oberhalb etwa 100 °Celsius reduziert sich die Linienbreite signifikant (blaue Kurve), und die bei 220 °Celsius beobachtete Spektrenform (grüne Kurve) zeigt an, dass das Phosphation eine Sprungrotation ausführt, bei der alle vier O-Atome untereinander statistisch die Plätze tauschen. Bei noch höheren Temperaturen wird ein Phasenübergang zweiter Ordnung beobachtet (Stufe um 300 °Celsius). Hier geht die Dynamik der O-Atome in eine freie Rotationsdiffusion über (rote Kurve). Diese symmetrische Linienform ändert sich auch oberhalb des bei 525 °Celsius beobachteten Phasenübergangs erster Ordnung nicht mehr.

4.9 „Die Beobachtung eines einzelnen Virus auf seinem Infektionsweg in eine lebende Zelle“

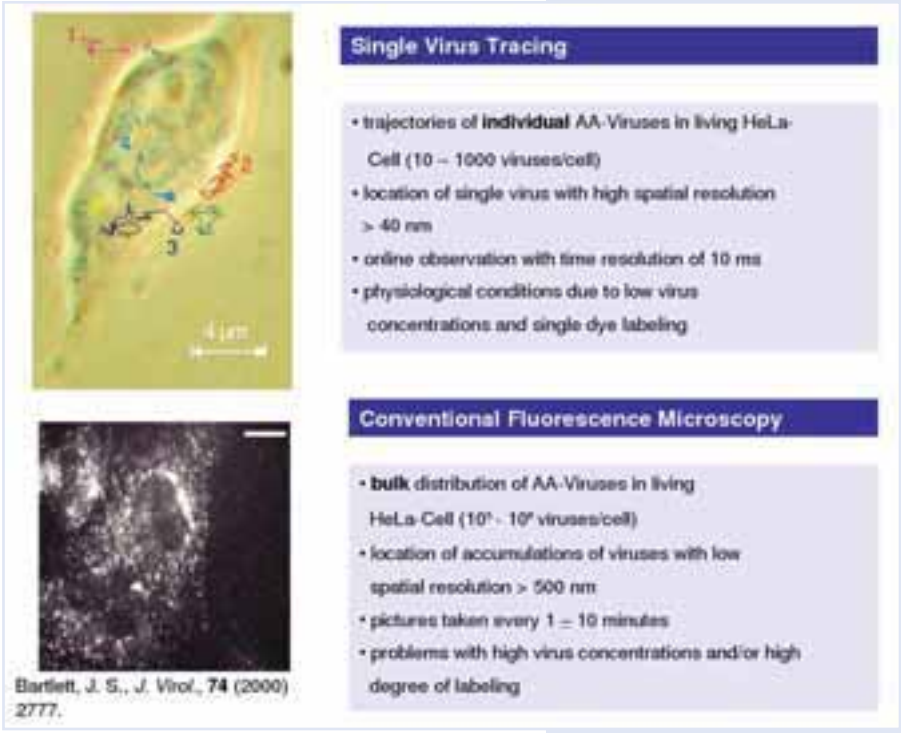
50. Woche *Christoph Bräuchle • Department für Chemie und Biochemie, Ludwig-Maximilians-Universität München*

In jüngster Zeit eröffnen die Fortschritte im interdisziplinären Forschungsfeld von Physik, Chemie und Biologie zunehmend neue Möglichkeiten zur Untersuchung von Prozessen in der lebenden Zelle (Life Cell Imaging).

Mit der neuen Technik „Single Virus Tracing“ (SVT) haben wir ein neues, bildgebendes Verfahren entwickelt, das die Visualisierung einzelner Viren auf ihrem Infektionsweg in eine lebende Zelle erlaubt. Das Virus wird mit nur einem fluoreszierenden Farbstoffmolekül markiert, um Störungen der Virus/Zell-Wechselwirkung weitgehend auszuschließen und unter rein physiologischen Bedingungen arbeiten zu können. Das fluoreszierende Farbstoffmolekül wirkt wie eine molekulare Lampe und zeigt uns den Weg des Virus in die lebende Zelle hinein. Mit einer hohen räumlichen Auflösung von 40 Nanometern und einer großen zeitlichen Auflösung von 10 Millisekunden kann das Fluoreszenzsignal des Labels über hochsensitive Einzelmolekülmikroskopie verfolgt werden. Damit können die einzelnen Stadien einer Virusinfektion im Detail beobachtet werden, zum Beispiel das Zuwandern des einzelnen Virus auf die Zellmembran, die Bindung an den Rezeptor auf der Zelloberfläche, das Durchdringen der Zellmembran, die Diffusion des im Endosom verpackten Virus sowie die Freisetzung des Virus in das Zytoplasma der Zelle. Auch der Transport der Viren mit Hilfe von Motorproteinen zum Zellkern und letztlich die Niederlegung der DNA im Zellkern kann im Einzelnen studiert werden.

All diese Vorgänge werden in einem Film aufgenommen, bei dem jedes Bild mit hoher Genauigkeit den Ort des Virus und den Zeitpunkt des Geschehens festhält. Die Methode eröffnet damit sozusagen den Zugang zum „Drehbuch“ einer Virusinfektion. Das Verfahren, zu dem es keine vergleichbare Alternative gibt, hat ein hohes Anwendungspotential in den Bereichen Medizin, Pharmazie und Biochemie, sowohl bei der Bekämpfung von Virusinfektionen als auch bei der Entwicklung von Viren als Genfähren im Bereich der Gentherapie.

Es entspringt dem Zusammenwirken von physikalisch-chemischen und biochemischen Ansätzen auf der Nanometerskala.



Bahnen einzelner Viren auf ihrem Weg zum Zellkern:
(1) Virus diffundiert zur Zelle,
(2) Virus im mehrfachen Kontakt mit der Zellmembran,
(3) Virus durchdringt die Zellmembran und diffundiert im Cytoplasma,
(4) Virus durchdringt die Kernmembran und diffundiert im Nucleoplasma.

Wetter – Klima – Umwelt

5

5 Wetter – Klima – Umwelt

Wolken – mehr oder weniger weiße Gebilde am Himmel – nehmen wir zumeist eher mit dem Gefühl als mit dem Verstand wahr. Flugzeuge hinterlassen Wolkenbahnen am Himmel, Schäfchenwolken künden von Sommertagen, Gewitterwolken von ersehnter Abkühlung und dunkle Wolken am Horizont von nahenden Unwettern. Wolken mit den Augen eines Physikochemikers betrachtet sind aber viel mehr. Ihre Entstehung zu verstehen ist einer der Bausteine, wenn wir unser Klima und seine möglichen Veränderungen verstehen wollen. Welchen Einfluss haben Fremdstoffe in der Atmosphäre? Und wieso verhält sich Wasser manchmal total verrückt? Kann man unsere Umwelt überhaupt im Labor nachbauen und wenn ja wie? Physikochemiker tragen zu den Antworten auf diese Fragen einen wichtigen Teil bei.

5.1 Wetter, Wolken, Physikalische Chemie

11. Woche

11. Woche *Helmut Baumgärtel • Institut für Chemie – Physikalische und Theoretische Chemie, Freie Universität Berlin*

Wolken sind eine sehr alltägliche Erscheinung, über die wenig nachgedacht wird. Sie erscheinen in unterschiedlicher Form und Farbe, je nach der Höhe in der sie sich befinden und wie dick sie sind. Und sie haben keine feste Gestalt, auch wenn sie uns manchmal als langlebig erscheinen. Wolken sagen etwas aus über den Zustand der Atmosphäre am Ort an dem sie sich befinden. Wie kommen Wolken zustande und was bewirken sie?

Wasser – gasförmig, flüssig und fest

Wasser kommt gasförmig, flüssig und fest vor: als Wasserdampf, flüssiges Wasser und als Eis. Dies sind drei verschiedene Aggregatzustände von Wasser. In welchem Aggregatzustand Wasser auftritt, hängt von der Temperatur ab und dem Druck unter dem es steht. Auf Meereshöhe steht alles unter dem Luftdruck von etwa 1 Atmosphäre (1 atm = 1 ,01325 bar = 1013,25 hPa).

Es ist geläufig, dass bei diesem Druck Eis bei o °Celsius schmilzt und flüssiges Wasser bei 100 °Celsius siedet. Mit zunehmender Höhe nimmt der Luftdruck merklich ab.

Die Abnahme des Luftdrucks mit zunehmender Höhe

Höhe (m)	0	1000	2000	4000	6000	8000	10000
Druck (mbar)	1013	897	795	624	490	384	301

Wegen des niedrigeren Luftdrucks ist in der Höhe auch der Dampfdruck des siedenden Wassers geringer und damit verbunden die Siedetemperatur des Wassers.

Dampfdruck von Wasser bei verschiedenen Temperaturen

T (°Celsius)	-10	0	10	20	30	50	70	80	100
Druck (mbar)	3	6	12	23	42	123	311	473	1013

Bei ganz bestimmten Werten von Druck und Temperatur können zwei Aggregatzustände von Wasser gleichzeitig existieren. Sie stehen in einem Gleichgewicht miteinander: Man spricht dann von Phasengleichgewichten.

Damit in einem Gefäß Eis schmilzt oder Wasser verdampft, muss man Wärme zuführen. Umgekehrt wird bei der Kondensation von Wasserdampf oder beim Gefrieren von Wasser Wärme frei. Bereits bei Temperaturen wesentlich unter 100° Celsius verdunstet Wasser zu Wasserdampf. Weil alle Gase untereinander mischbar sind, mischt sich der Wasserdampf auch mit der überstehenden Luft – die Luft wird feucht.

Wenn die aufsteigende Luft sehr feucht und die Erwärmung am Boden sehr stark ist, dann entwickeln sich gewaltige Aufwinde, die zur Bildung von beeindruckenden Wolkenbergen führen. In solch sommerlichen Gewitterwolken werden nicht nur gewaltige Mengen an Wasser transportiert sondern auch sehr große Energiemengen, die bei der Kondensation des Wasserdampfs in der Höhe wieder freigesetzt werden.

Im täglichen Leben misst man die Feuchte der Luft mit Hygrometern, welche die relative Feuchte in Prozent angeben. 100 Prozent relative Feuchte bedeutet Sättigung. Die zur Sättigung der Luft notwendige Menge Wasserdampf hängt stark von der Lufttemperatur ab. Bei nasskaltem Novemberwetter befinden sich nur etwa fünf Gramm Wasserdampf in einem Kubikmeter Luft, während es nach einem sommerlichen Gewitter bis zu 15 Gramm sein können. Bei einer Temperatur von minus 50 °Celsius, wie sie in der oberen Troposphäre herrscht, ist die Luft dagegen praktisch vollkommen trocken.

Wolken – entstehen, vergehen, bestehen

Die Kondensation von zusätzlich eingebrachtem Wasserdampf zu kleinen Tröpfchen führt zur Wolkenbildung. Die meisten Wolken sind Indikatoren für aufwärts gerichtete Luftströme. Aufwärts strebende, mit Wasserdampf noch nicht gesättigte Luft kühlt sich ab, wobei die relative Feuchte ansteigt. Bei der so genannten Taupunkttemperatur ist die Luft mit Wasserdampf gesättigt. Bei weiterer Abkühlung ist die Luft dann mit Wasserdampf übersättigt, es bilden sich Wolken. Wenn die kleinen Wassertröpfchen durch weitere Aufnahme von Wasser wachsen, kommt es schließlich zum Regnen.

Der Kreislauf des Wassers

Das Wasser ist auf der Erde ständig in Bewegung. Es wird als Wolken und feuchte Luft in der Atmosphäre transportiert, fällt als Niederschlag zu Boden, fließt in Flüssen und Meeresströmungen. Man hat abgeschätzt, dass die gesamte Wassermenge der Erde etwa 1350 Millionen Kubikkilometer beträgt, davon befinden sich 97 Prozent in den Ozeanen. Täglich verdampft aus den Ozeanen die 18fache Wassermenge des Bodensees. Obwohl gewaltige Wassermengen verdampfen, befinden sich zu jedem Zeitpunkt nur ein Zehntausendstel Prozent der gesamten Wassermenge der Erde in der Atmosphäre. Der ständige Kreislauf des Wassers reguliert das Klima und macht Leben auf der Erde erst möglich. Durch Verdunstung wird die Erdoberfläche gekühlt und für die Vegetation ausreichend Niederschlag bereitgestellt. Um den Kreislauf des Wassers in Betrieb zu halten, wird sehr viel Energie benötigt. Sie kommt ausschließlich von der Sonne.

Physikalische Chemie

Die Modelle, die zum Verständnis der physikalischen und chemischen Prozesse in der Atmosphäre entwickelt wurden und in verfeinerter Form immer noch entwickelt werden, basieren auf den Ergebnissen von physikalisch-chemischer Grundlagenforschung, die über viele Jahrzehnte in zahlreichen Laboratorien durchgeführt wurde. Sie liefert die notwendigen Daten, die in die oben skizzierten Überlegungen und die daraus folgenden Schlüsse zur Klimaänderung einfließen.

Kondensstreifen von Düsenflugzeugen, die sich bei Temperaturen von minus 50 bis minus 90 °Celsius bilden, beeinflussen den Strahlungshaushalt und die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre.

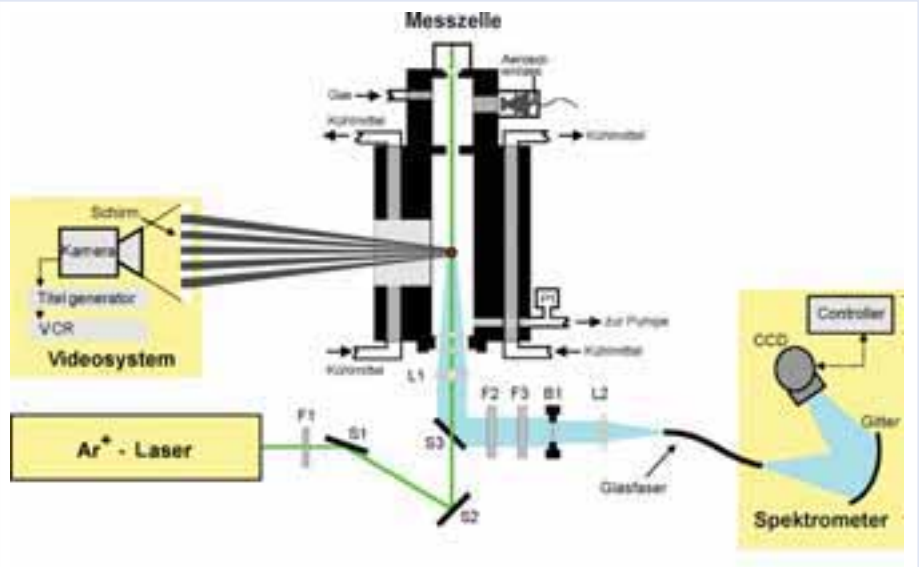
5.2 Von Eisteilchen und Wolken – Mehrphasenchemie in der Atmosphäre

34. Woche *Reinhard Zellner* •
Institut für Physikalische Chemie, Universität Duisburg-Essen

Unter den Wolken am Himmel gibt es einige „Spezialitäten“, die für die Atmosphäre von großer Bedeutung und für die Physikalische Chemie von herausforderndem Interesse sind. Dazu gehören die Kondensstreifen von Düsenflugzeugen, die Zirruswolken und die so genannten polaren Stratosphärenwolken (polar stratospheric clouds, PSC). Gemeinsam ist diesen Spezialitäten, dass sie im extrem kalten Bereich der Atmosphäre (T= -50 °Celsius bis -90 °Celsius) gebildet werden. Bei diesen Temperaturen existiert Wasser nur noch in Form von Dampf und Eis. Es kann aber mit Säuren wie Schwefelsäure (H_2SO_4) und Salpetersäure (HNO_3) auch flüssige und feste Hydrate bilden, die bereits oberhalb des Frostpunktes stabil sind.

Solche Wolken sind sowohl wegen ihrer Beteiligung am Strahlungshaushalt der Atmosphäre (Klimawirksamkeit) als auch wegen ihrer Beeinflussung der chemischen Zusammensetzung von Bedeutung. Denn atmosphärische Oberflächen können Reaktionen auslösen, die in der reinen Gasphase nicht möglich, aber dennoch schnell genug sind, um die Spurengaszusammensetzungen zu verändern. Das vielleicht bekannteste Beispiel ist der durch PSCs verursachte Abbau des Ozons in jedem Winter über den Polen. Physikochemiker interessieren sich für solche Systeme aus mindestens zwei Gründen:

- Sie möchten beschreiben, welche Partikelphasen mit welcher Zusammensetzung bei verschiedenen Temperaturen existieren. Dies erfordert Kenntnisse zur Thermodynamik von kalten Mischphasen und zur Mikrophysik der Bildung von Partikeln.
- Sie möchten verstehen, wie Gase mit solchen Partikeln in Wechselwirkung treten und welche chemischen Reaktionen mit welcher Geschwindigkeit dabei ablaufen.



Schema der experimentellen Anordnung zur optischen Levitation von Mikroteilchen mit simultaner Analyse von Größe (Mie-Streuung) sowie Zusammensetzung und Phase (Raman-Streuung).

5.3 Die wunderbare Welt des Wassers – von der Makrowelt zur Mikrowelt

43. Woche *Tanja Asthalter* • *Institut für Physikalische Chemie, Universität Stuttgart*

Wasser ist allgegenwärtig: Es bedeckt zwei Drittel der Erdoberfläche und ist in allen lebenden Organismen ein wichtiger, wenn nicht gar der wichtigste Bestandteil. So verwundert es wenig, dass die Menschen von der Antike bis zur Neuzeit versucht haben, das Wesen des Wassers zu verstehen. Nach der heute allgemein anerkannten Definition ist Wasser kein Element, sondern eine Verbindung aus Wasserstoff und Sauerstoff im Verhältnis zwei zu eins, die bei 0 °Celsius schmilzt und bei 100 °Celsius siedet.

Wasser ist eine „normale“ Flüssigkeit

Wasser ist eine Flüssigkeit und zeigt als solche Eigenschaften, die allen Flüssigkeiten gemeinsam sind. So werden fast alle Flüssigkeiten bei tiefer Temperatur fest und bei hoher Temperatur gasförmig. Fügt man Wasser andere Stoffe zu, so nimmt sein Schmelzpunkt ab (Gefrierpunktserniedrigung). Dies nutzen wir zum Beispiel im Winter beim Streuen von Streusalz oder indem wir Glyzerin als Frostschutz im Autokühler zugeben. Auch Fische und Insekten bilden solche Stoffe im Winter aus ihrem Stoffwechsel, um ihre Körperflüssigkeiten vor dem Gefrieren zu schützen: Der Antarktisdorsch lebt bei Wassertemperaturen unter 0 °Celsius; Laufkäfer und andere Insekten enthalten im Winter große Mengen Glyzerin.

Wasser wandert durch Membranen in Salz oder Zuckerlösungen hinein (Osmo-

Methodisch können atmosphärische Partikel unter anderem in so genannten Ausschwebungsexperimenten untersucht werden. Wir haben dazu eine Anordnung entwickelt, in der Mikroteilchen optisch, also durch Photonendruck, in der Schwebe gehalten werden und damit vom Kontakt mit der Wand isoliert werden. Diese Methode ermöglicht es, Zusammensetzung, Phase und Größe von Mikroteilchen unter dem Einfluss von umströmenden Spurengasen simultan zu beobachten.

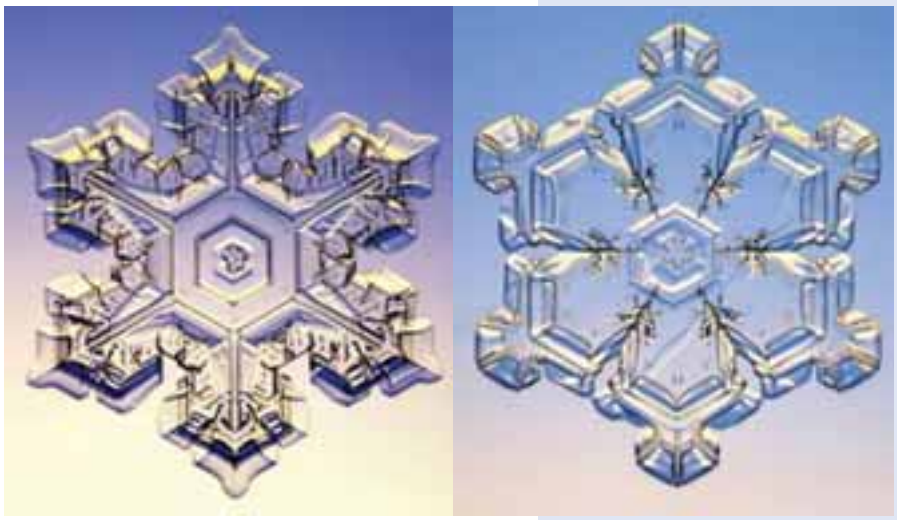
Wir haben diese Methode entwickelt zum Studium des Gefrierverhaltens von unterkühlten H_2SO_4/H_2O-(PSC)-Mikrotröpfchen. Derzeit arbeiten wir unter anderem über den Einfluss von organischen Verbindungen auf das Feuchtewachstum (Deliqueszenz) von konzentrierten Salzlösungen sowie über den Einfluss von Aerosolen auf das Gefrierverhalten von unterkühlten Tropfen, die Eiswolken bilden.

se). Diese Osmose sorgt für den Zelldruck in tierischem und pflanzlichem Gewebe. Osmose kann durch Anlegen eines Drucks umgekehrt werden (Umkehrosmose). Dies nutzt man zum Entsalzen von Meerwasser, und Anlagen zur Umkehrosmose gehören zur Standardausrüstung von Hobbyseglern auf hoher See.

Wasser kann „total verrückt“ sein

Wasser zeigt aber auch Eigenschaften, die andere Flüssigkeiten, wie etwa Alkohole oder Öle, nicht haben: Verglichen mit Substanzen ähnlichen chemischen Aufbaus oder ähnlicher Molmasse schmilzt und siedet Wasser bei sehr hoher Temperatur, denn das Molekül hat einen elektrischen Plus- und Minuspol – ein dünner Wasserstrahl wird durch einen geriebenen Glasstab seitlich abgelenkt. Eis schwimmt auf Wasser, da Wasser bei 4 °Celsius seine größte Dichte hat. Eis kann unter Druck zum Schmelzen gebracht werden: Deshalb schneidet ein Draht, den man mit Gewichten beschwert, einen Eisklotz!

Warum ist Wasser so „verrückt“? Die Ursachen liegen in seiner molekularen Struktur: Jedes Wassermolekül hat zwei „Hände“ (Wasserstoff-Atome) und zwei „Füße“ (freie Elektronenpaare): Verbinden sich viele Moleküle, so ergreift jede Hand genau einen Fuß – und fertig ist ein komplexes dreidimensionales Netzwerk, das durch die so genannten „Wasserstoffbrücken” zusammengehalten wird. In Eis bilden die Moleküle ein sehr lockeres Netzwerk – in der Flüssigkeit bricht dieses Netzwerk teilweise auf. Genau in diese Lücken passen weitere Moleküle hinein, und als Ergebnis nimmt die Dichte beim Schmelzen von Eis zu Wasser zunächst einmal zu!

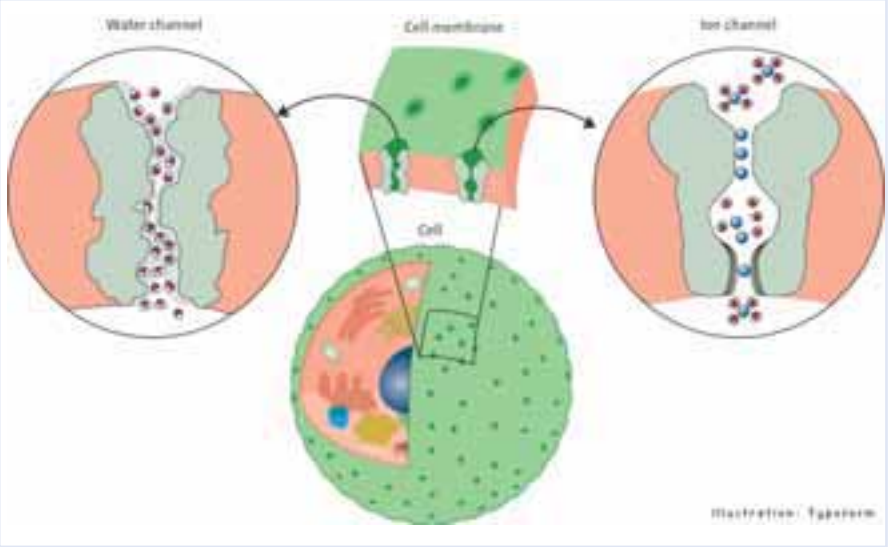


Schneeflocken – also Eiskristalle – haben eine sechszählige Symmetrie (Quelle: The Rasmussen & Libbrecht Collection, http://www.its.caltech.edu/~atomic/snowcrystals/photos/photos.htm).

In Wasser und Eis sitzt der Wasserstoff nicht fest am Platz, sondern die Wasserstoff-Atome können zwischen den beiden nächstgelegenen Sauerstoff-Atomen hin- und herhüpfen. Wenn ein Sauerstoff drei Wasserstoff-Partner hat und der nächste nur einen, dann haben wir ein Ionenpaar – das Wasser „dissoziiert“. Der pH-Wert liefert ein Maß dafür, wie viele Sauerstoffe einen Wasserstoff „zuviel“ haben: je kleiner seine Zahl, desto saurer die Lösung. Neutrales Wasser hat einen pH von 7, Zitronensaft und Coca-Cola einen pH von 3.

In Eis ist viel Platz für andere Moleküle – zum Beispiel für Methan, den Hauptbestandteil des Erdgases. So genannte Gashydrate bilden einen großen Teil der weltweit verfügbaren Kohlenstoffressourcen! In den Weltmeeren lagern riesige Mengen an Methanhydrat, aber ihr Abbau birgt auch einige Risiken. Denn gelangt das Methan in die Atmosphäre, so verstärkt es den Treibhauseffekt. Zudem lagert Methanhydrat zum Beispiel vor den Küsten Norwegens, die beim Abbau massiv ins Rutschen kommen könnten. Für Wasser wurde im Jahr 2003 der Nobelpreis für Chemie verliehen – genauer gesagt, für die Entdeckung, welche Stoffe

Wasser durch die Zelle transportieren und wie dies funktioniert.



Der Mensch besteht aus vielen Milliarden Zellen, die untereinander Stoffe und Informationen austauschen. Dieser Austausch erfolgt durch verschiedene Kanäle in den Zellmembranen, insbesondere durch Wasser- (links) und Ionenkanäle (rechts). (Quelle: Die ZEIT 42/ 2003)

Wasser ist wichtig und darf nicht vergeudet werden, denn auf der Erde bewegt es sich in einem ewigen Kreislauf. Allerdings ist nur ein halbes Prozent des weltweiten Wassers Süßwasser – und dieses Reservoir wird zur Zeit schneller entleert, als die Natur es wieder auffüllen kann. Hinzu kommt das nicht ganz neue Problem der Wasserverschmutzung. Schon Mitte des 19. Jahrhunderts setzte eine Diskussion über die Verschmutzung der Flüsse ein. Berühmt wurde Michael Faradays Leserbrief an „The Times“ vom 8. Juli 1855 (siehe: http://dbhs.wvusd.k12.ca.us /webdocs/Chem-History/Faraday-Letter.html). Doch angesichts einer ständig wachsenden Weltbevölkerung ist dieses Problem heute drängender denn je.

Rund 70 Prozent des weltweiten Wasserverbrauchs entfallen heutzutage auf die Landwirtschaft, 20 Prozent auf die Industrie und nur 10 Prozent auf die privaten Haushalte. Reinigung von verschmutztem Wasser durch Destillation oder Umkehrosmose ist zwar möglich. Allerdings halten die Wassermoleküle so gut zusammen, dass vor allem die Destillation sehr viel Energie benötigt. Und wollte man den gesamten Trinkwasserbedarf der Menschheit über Umkehrosmose decken, würden die Wasserpreise explodieren. Eine Linksammlung zum Weiterlesen findet sich auf beiliegender CD.

5.4 Die Umwelt im Labor

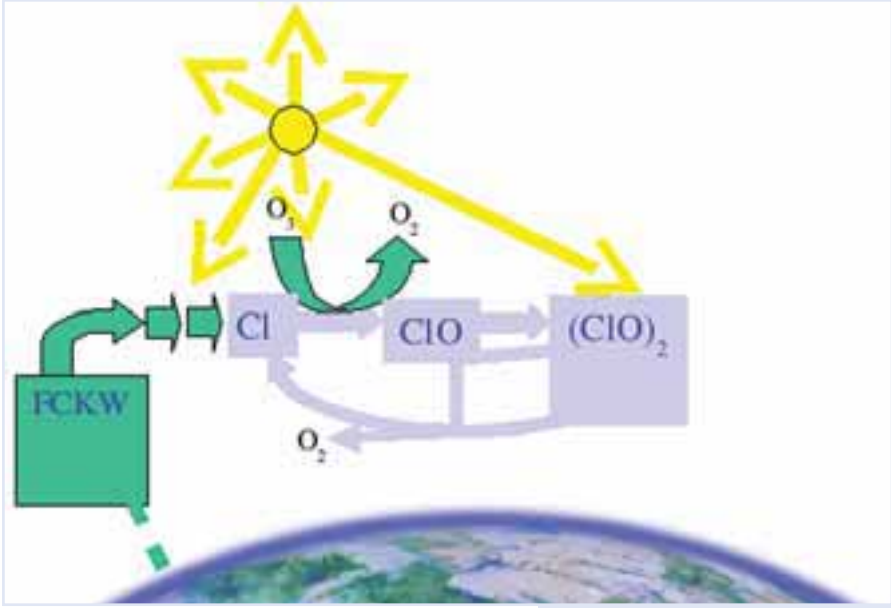
46. Woche *Eckart Rühl • Institut für Physikalische Chemie, Bayerische Julius-Maximilians-Universität Würzburg*

Die Umwelt ist ständigen Veränderungen unterworfen. Dies ist aus den Geowissenschaften (zum Beispiel aus der Meteorologie) bekannt und gilt nicht nur für die vergangenen Jahre, sondern auch für sehr viel größere Zeiträume, die lange vor der systematischen Beobachtung der Umwelt liegen. Die Lage der Polkappen verändert sich langsam, ebenso wie das Klima und die Strömungsmuster der Ozeane und der Atmosphäre. Diese Veränderungen sind eigentlich natürlichen Ursprungs.

Veränderungen der Umwelt kommen aber auch durch den Menschen zustande. Diese anthropogen bedingten Veränderungen der Umwelt können durch das direkte Einwirken, wie etwa die Freisetzung von Schadstoffen in die Umwelt, zustande kommen. Darüber hinaus gibt es aber auch indirekte Einwirkungen des Menschen. Hier bleibt die direkte Einwirkung zunächst ohne Folgen für die Umwelt. Nachfolgend – also ohne weiteres Zutun des Menschen – kommt es jedoch sehr wohl zu Veränderungen der Umwelt. Ein Beispiel hierfür ist der saure Regen, der durch die Emission von Schadstoffen, wie Schwefeldioxid, SO_2, nach chemischen Umsetzungen in der Atmosphäre zustande kommt und zu einer Versaue-

rung von Böden sowie zu Waldschäden („Waldsterben“) führen kann.

Veränderungen der Umwelt können lokale, regionale oder gar globale Ausmaße annehmen. Am schwierigsten ist es, globale Veränderungen unserer Umwelt zu diagnostizieren, die durch Menschen hervorgerufen werden. Das Problem besteht vor allem darin, dass diese Veränderungen nicht unbedingt schlagartig einsetzen. Damit sind sie nur schwer von der natürlichen Variabilität der Umwelt zu unterscheiden.

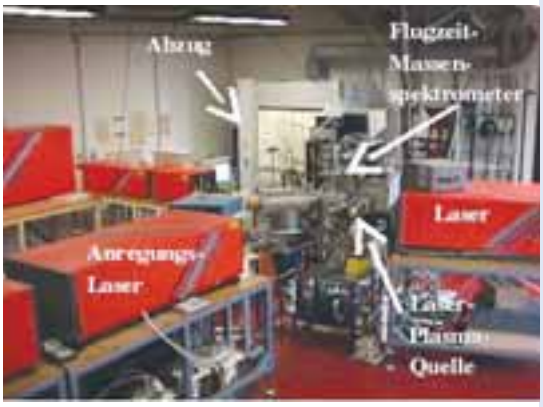


Vereinfachte Darstellung des photochemischen Ozonabbaus in der Stratosphäre.

Aus der reinen Beobachtung der Umwelt (Feldmessung) werden aber noch nicht die Gründe und Mechanismen deutlich, die zu den Veränderungen führen. Sie muss man aber kennen, denn nur dann können wirksame und sinnvolle Maßnahmen zur Vermeidung von Schäden der Umwelt durch Menschen ergriffen werden. Hier setzt das Arbeitsfeld der Physikalischen Chemie an. Das vielfältige Zusammenwirken chemischer und physikalischer Umweltprozesse, die sich nicht einfach voneinander trennen lassen, werden mit Methoden der Physikalischen Chemie untersucht.

Das grundlegende Verständnis für Veränderungen der Umwelt erhält man meist aus Laborexperimenten, in denen die Umwelt gezielt und vereinfacht untersucht wird. Dabei werden die Bedingungen der Umwelt aber nicht einfach nur kopiert. Es geht vor allem darum, gezielt einzelne Prozesse studieren zu können. So gibt es beispielsweise globale Veränderungen der Umwelt wie das Ozonloch, die mit chemischen Prozessen zusammenhängen. Diese Prozesse sind oftmals nicht eindeutig in Feldmessungen nachzuweisen, da sich zahlreiche chemische Reaktionen und meteorologische Prozesse überlagern.

Hier helfen Laborexperimente, in denen die sich überlagernden Einflüsse und Störungen der realen Umwelt ausgeschlossen werden. Die Resultate aus Laborstudien werden dann für Modellrechnungen zur Simulation der Umwelt genutzt, um Voraussagen für künftige Entwicklungen zu treffen. Beispielsweise kann man sagen, bei welchen Bedingungen der Umwelt es zum Abbau des Ozons in der Atmosphäre kommt. Ebenso lässt sich mit Methoden der Physikalischen Chemie die Effizienz von chemischen Reaktionen, die in der kondensierten Phase ablaufen, bestimmen. Hierzu gehören



Blick in ein Labor zur Untersuchung von Photolyseprozessen atmosphärischer Spurengase. Solche Untersuchungen tragen dazu bei, den Mechanismus zur Entstehung des Ozonloches aufzuklären.

Prozesse, die an Aerosolen und Wolkentröpfchen ablaufen.

Eine genaue und zuverlässige Beschreibung der Umwelt kann jedoch keinesfalls nur von einem Fach allein durchgeführt werden. Es bedarf vielmehr einer engen, interdisziplinären Zusammenarbeit von verschiedenen Fachgebieten, von denen die Physikalische Chemie eines ist.

47. Woche

5.5 Umwelttoxikologie – ein Kooperationsprojekt zwischen Universität und Schulen

47. Woche *Heidi Foth • Institut für Umwelttoxikologie, Martin-Luther-Universität, Halle-Wittenberg*

Aus einem 1996 zunächst nur für EDV-Testzwecke begonnenen Kontakt zwischen dem Institut für Umwelttoxikologie und einem Schüler der 7. Klasse (Gymnasialstufe) wurde seit 1997 das Gemeinschaftsprojekt UTOXIS aufgebaut. An drei Schulen aus Sachsen-Anhalt, Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen wurde eine Internetarbeit begonnen und thematisch eigenständige Homepages zu Umweltfragen entwickelt („Schadstoffwirkung auf den Wald“, „Luftschadstoffe und Gesundheit“ sowie „Abfall“).

Das Universitätsinstitut konnte für zwei der Schulpartner die EDV-Basisausstattung zur Verfügung stellen und sollte danach vor allem als wissenschaftlicher Tutor fungieren und übergeordnete Zusammenhänge bezüglich der Fragen zur Umwelt aufzeigen. Die Schülerarbeitsgemeinschaften haben mit Unterstützung durch UTOXIS an ihren Schulen die ersten internetfähigen Computer installiert und über dieses Medium Kontakt gehalten.

Zusätzlich zum positiven Engagement der Schüler, sich das neue Medium zu erobern, wurden folgende generellen Ziele der Arbeitsgemeinschaft vereinbart:

- Aufbau und Pflege einer Homepage mit Fachkundeunterricht-geeigneter Information zu Themen der eigenen Wahl,
- Teilnahme bei Internetpräsentationen sowie
- Erstellung von Projektarbeiten für Schülerwettbewerbe.

Womit lässt sich Feuer löschen? Schüler erforschen ein „Feuerlöschgas“.

In der Regel waren Zukunftsfragen und Fragen zur Situation und Sicherung von Lebensbedingungen (Umwelt) für die Schüler am interessantesten. Relativ bald wurde erkennbar, dass Schülerarbeitsgemeinschaften besonders

Schülerinnen entdecken das Geheimnis des Silberspiegels.

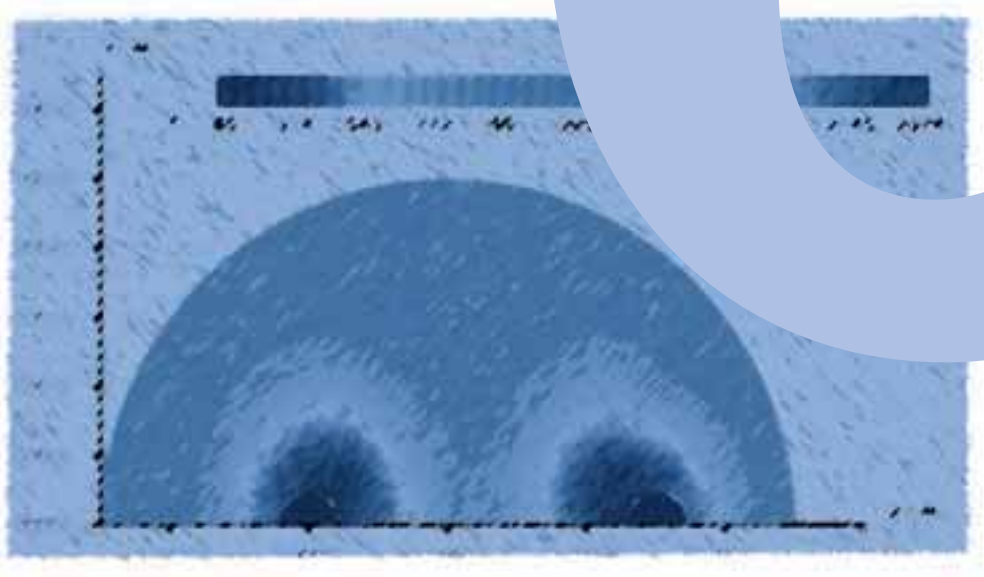
dann Aktivität entfalteten, wenn sie ihre eigenen Sachfragen anstelle vorgegebener Fragen verfolgen konnten. Und wenn sie in diesem Prozess gezielt durch ihre schulischen und außerschulischen Betreuer unterstützt wurden. Beispiele möglicher Unterstützung sind: Beratung bei Arbeitsschritten, Hinweise auf Informationsmöglichkeiten, Einbeziehung weiterer Kontaktpersonen sowie Unterstützung bei der Gestaltung von Arbeitsmöglichkeiten.

Die herausragenden Attraktivitäten waren für die Schülerarbeitsgemeinschaften die mehrtägigen Arbeitsaufenthalte im Institut für Umwelttoxikologie, die für sie ein- bis zweimal pro Jahr an der Martin-Luther-Universität organisiert werden konnten. Dabei wurden die Kontakte zwischen den Schulen gefestigt, neue Ideen entwickelt und die Arbeiten öffentlich präsentiert. Als Nebeneffekt konnten die Schüler im Fundus wenig genutzter Glas- und Laborkleingeräte selbstständig stöbern und Interessantes mitnehmen sowie im Forschungslabor Eindrücke sammeln und Fragen stellen. Die Gäste aus der Partnerschule in Rheinland-Pfalz haben diesen Erlebnisraum immer sehr intensiv genutzt.

Bei fast jedem Institutsbesuch wurden gemeinsam von Schülern, Lehrern und Hochschullehrern vielfältige Anregungen und Ideen für experimentelle Projekte entwickelt, die an der Schule durchgeführt werden können. Natürlich ist es dafür notwendig, dass die Projektgemeinschaft auch über die Distanz hinweg Kontakt hält, um inhaltliche Fragen zu klären und Arbeitsmaterialien zu besorgen. Inzwischen ist am Gymnasium Weierhof am Donnersberg, Bolanden, Rheinland-Pfalz, eine überaus aktive Schülerarbeitsgemeinschaft „Jugend forscht“ entstanden, in der insgesamt etwa 60 Schüler der Klassen 5 bis 13 naturwissenschaftliche Themen bearbeiten und ihre individuellen Projekte zum Teil über Jahre hinweg sehr erfolgreich weiter entwickeln.

6

Chemische Prozesstechnik: Verständnis, Simulation, Optimierung



6 Chemische Prozesstechnik: Verständnis, Simulation, Optimierung

Katalysatoren sind heutzutage weder aus chemischen Produktionsanlagen noch aus unseren Autos wegzudenken. Sie sorgen dafür, dass chemische Reaktionen so ablaufen, wie wir das gerne hätten. Also etwa in Kraftwerken eine möglichst schadstofffreie Verbrennung. Nur – wie machen das die Katalysatoren eigentlich? So ganz genau weiß man das immer noch nicht – besonders dann nicht, wenn man sich auf die Ebene einzelner Moleküle und Atome begibt. Hier müssen Physikochemiker zum Beispiel tragfähige Modelle für reale Reaktionsbedingungen entwickeln, wenn sie im Endeffekt der Wirkung von Katalysatoren wirklich auf den Grund gehen wollen. Mit derartigem Wissen können sie dann Katalysatoren weiter optimieren oder neue entwickeln. Eine weitere aktuelle Technik der Zukunft sind Brennstoffzellen, die vielleicht in nicht allzu ferner Zukunft die Energieversorgung unserer Häuser oder Autos sichern werden. Sie so weiter zu entwickeln, dass sie auch wirtschaftlich genutzt werden können, gehört mit zu den Aufgaben der Physikalischen Chemie.

6.1 Katalysatoren – Chemische Partnervermittlung im virtuellen Labor

23. Woche

23. Woche *Joachim Sauer • Institut für Chemie, Abteilung Quantenchemie, Humboldt-Universität Berlin*

Katalysatoren sind Substanzen, die Molekülen helfen, miteinander zu reagieren und so neue Verbindungen einzugehen. Warum ist diese Partnervermittlung wichtig? Ohne Katalysatoren würden wichtige Reaktionen so langsam ablaufen, dass die gewünschten Verbindungen praktisch nicht entstehen. Die meisten Prozesse in der chemischen Industrie sind katalytische Prozesse und wären ohne Katalysatoren nicht möglich.

Das beginnt bei den Mineraldüngern, die überhaupt erst die Grundlage sind, dass die wachsende Weltbevölkerung ernährt werden kann und der Hunger in Teilen der Welt besiegt ist. Und jeder Liter Benzin, den wir in unser Fahrzeug füllen, hatte auf seinem Weg vom Ölfeld in den Tank – also vom Rohöl zum Produkt Vergaserkraftstoff – Kontakt mit mindestens einem Katalysator. Moderne Polymerwerkstoffe, der Gummi der Autoreifen und synthetische Fasern sind ebenfalls das Produkt katalytischer Prozesse.

Die meisten kennen den Begriff des Katalysators als Abgaskatalysator im Auto. Hier sorgt der Katalysator dafür, dass schädliche Verbindungen wie

Modell für den Vanadiumoxid-Katalysator: Ein Siliziumatom ist durch eine Vanadiumoxid-Gruppe ersetzt.

Die Simulationen der Struktur und Reaktivität von Katalysatoren sind sehr aufwändig. Oft werden zur Aufklärung der chemischen Partnervermittlung die modernsten Supercomputer Deutschlands eingesetzt, wie der Berliner Teil der IBM p690 turbo, Cray T3E. (Quelle: Bernd Kallies, Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin)

Stickstoffmonoxid, NO, in unschädliche Verbindungen wie Stickstoff und Sauerstoff umgewandelt werden.

Der Katalysator in der Großindustrie

Aus den Gasen Stickstoff, N_2, und Wasserstoff, H_2, kann man Ammoniak, NH_3, herstellen – die Grundsubstanz mineralischer Dünger. Im Ammoniak sind drei H-Atome direkt an das N-Atom gebunden. Damit NH_3-Moleküle entstehen können, müssen die N-N-Bindung im N_2 und die H-H-Bindung im H_2 gespalten werden. Dazu ist viel Energie nötig, die allerdings zum größten Teil wieder frei wird, wenn die N-H-Bindungen im Ammoniak geknüpft werden. Es ist also eine sehr hohe Energiebarriere zu überwinden, um von den Ausgangsstoffen zu den gewünschten Produkten zu gelangen. Je höher diese Barriere ist, umso länger dauert es, sie zu überwinden. Der Katalysator ist der Stoff, der diese Barriere für eine spezielle Reaktion herabsetzt und dabei nicht verbraucht wird.

Was passiert im Inneren?

Die selektive Oxidation organischer Verbindungen hat in der industriellen Chemie einen hohen Stellenwert, da auf diesem Weg eine Reihe von wichtigen Grundchemikalien hergestellt werden können. Für die Durchführung der Reaktionen werden oftmals Katalysatoren in Form von Feststoffen verwendet, die dann während der Reaktion mit Gasen in Wechselwirkung treten. Es gibt zwei Gründe für die Benutzung von Katalysatoren: Zum einen bewirkt der Katalysator eine Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit, zum anderen erhält man andere Produkte als bei der direkten Oxidation der Gase mit Sauerstoff. Bei Oxidationsreaktionen tritt häufig das Problem auf, dass das Reaktionsprodukt leichter mit Sauerstoff reagiert als die Ausgangsverbindung. Daher würde ohne einen Katalysator nicht die gewünschte Verbindung entstehen, sondern die Ausgangsverbindung zu Kohlendioxid umgewandelt.

Wir beschäftigen uns unter anderem mit der Synthese von Formaldehyd aus Methanol. Methanol ist ein Beispiel für ein preisgünstiges petrochemisches Produkt. Formaldehyd ist eine höherwertige Grundchemikalie, die etwa in der Kunststoffherstellung verwendet wird. Die Wirkungsweise von Vanadiumoxid-Katalysatoren für die Methanoloxidation ist Gegenstand der aktuellen Forschung. Das Vanadiumoxid wird hierzu oftmals auf die Oberfläche eines ansonsten unreaktiven Trägers aufgebracht. Der Träger kann beispielsweise Siliziumoxid sein. Da Computerberechnungen der Eigenschaften solcher Oberflächenmodelle sehr aufwendig sind, werden oftmals kleinere Modelle für die Simulationen eingesetzt.

Die Reaktion des Katalysators mit Methanol beginnt mit einer Reaktion des Methanolmoleküls mit dem Vanadiumoxid-Zentrum. Hierbei wird eine Methoxygruppe ($-OCH_3$) am Vanadium gebildet und eine der Bindungen des Vanadiums zur

Oberfläche gebrochen. An der Oberfläche entsteht eine OH-Gruppe. Während der Reaktion wird ein Wasserstoffatom der Methoxygruppe auf das Sauerstoffatom des Vanadiumoxids übertragen. Die Reaktion durchläuft hierbei einen so genannten Übergangszustand. Die Energiedifferenz zwischen Übergangszustand und Ausgangsverbindung liefert eine Information über die Reaktionsgeschwindigkeit, einem wichtigen Parameter bei der Betrachtung der Kinetik chemischer Reaktionen. Nachdem das Modell den Übergangszustand passiert hat, bildet sich eine V-OH-Gruppe und ein Formaldehyd-Molekül CH_2O, das noch schwach an das Vanadiumatom gebunden ist, sich jedoch in den folgenden Reaktionsschritten von der Oberfläche löst. Der Katalysator wird regeneriert, indem eine Oxidation mit gasförmigem Sauerstoff stattfindet, während gleichzeitig Wasser gebildet wird. Die im Modell erhaltenen Aussagen über die Wirkungsweise von Katalysatoren werden anschließend mit experimentellen Ergebnissen verglichen.

6.2 Chemisch reaktive Strömungen – „Heiße“ Anwendungen der Chemie

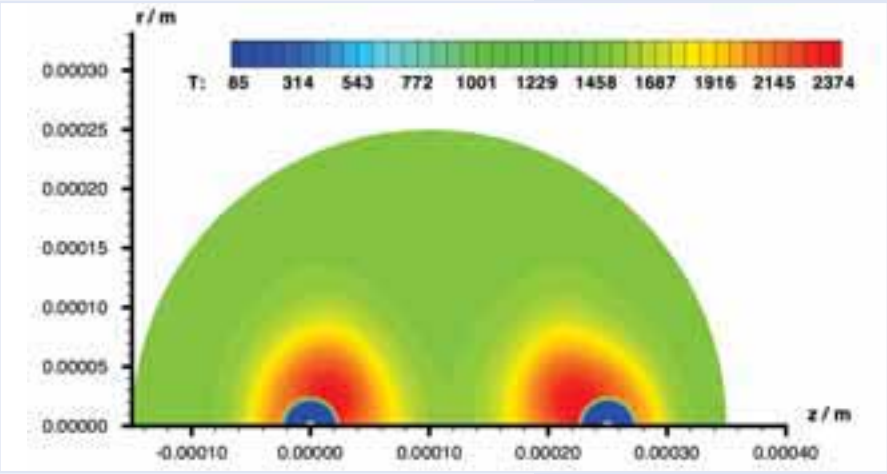
26. Woche *Jürgen Warnatz • Interdisziplinäres Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen (IWR), Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg*

Verbrennungsprozesse in Motoren, Turbinen und Feuerungen oder Öfen, die Vorgänge während der Katalyse in einem industriellen chemischen Reaktor oder einer Auto-Abgasanlage, der Wiedereintrittsvorgang eines Raumfahrzeuges in die Erdatmosphäre oder die Prozesse bei der Herstellung von synthetischem Diamant durch chemische Gasphasen-Deposition – diese und noch viele andere Vorgänge beinhalten chemisch reaktive Strömungen.

Die Beschreibung solcher chemisch reaktiven Strömungen verlangt einerseits detaillierte Kenntnisse der ablaufenden Reaktionen, wobei die auftretenden Reaktionsmechanismen Tausende von Reaktionen von Hunderten von Stoffen enthalten können. Andererseits muss man sich – besonders in turbulenten Strömungen – mit Details des Strömungsfeldes auseinandersetzen, um zu einer quantitativen Beschreibung der betrachteten Vorgänge zu kommen.

Die daraus resultierende enorme Komplexität erfordert die Benutzung von Supercomputern und von Methoden, wie sie das Wissenschaftliche Rechnen bereitstellt. Der zu betrachtende Prozess muss zuerst in die Sprache der Mathematik umgesetzt werden („Modellierung“). Danach werden diese Gleichungen mit zu entwickelnden Methoden gelöst („Simulation“) und in einer weiteren Stufe wird nach den günstigsten Lösungen gesucht („Optimierung“). Die Flut der Ergebnisse kann schließlich nur durch geeignete graphische Methoden verständlich gemacht werden („Visualisierung“).

26. Woche

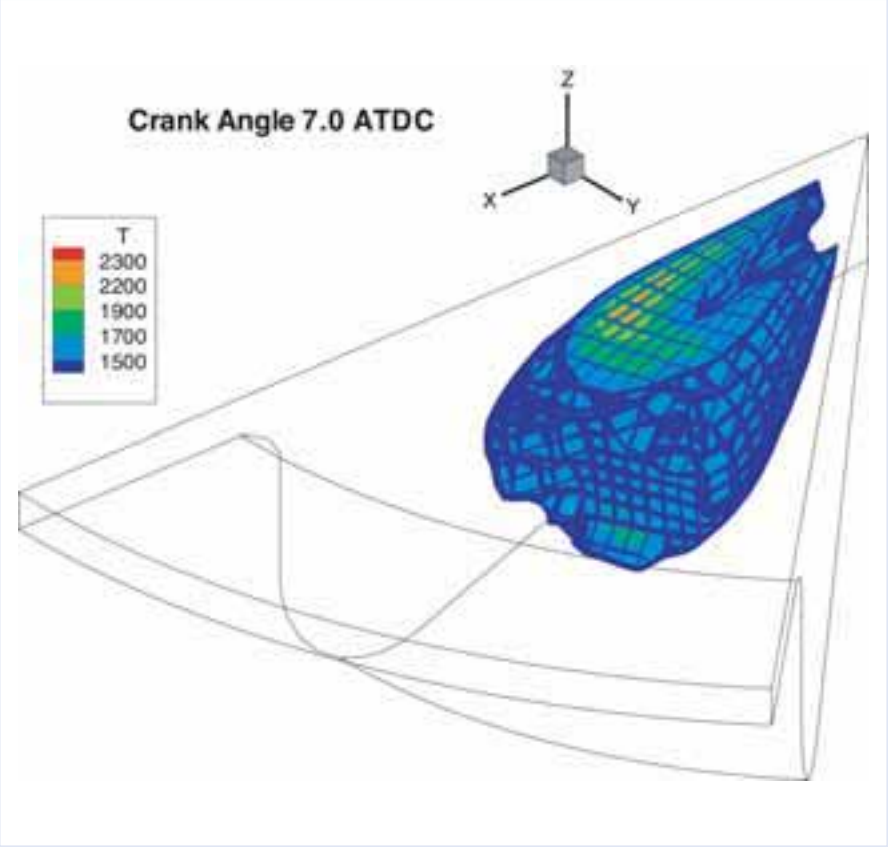


Zündung und Verbrennung zweier benachbarter Brennstofftropfen.

Abgesehen von ihrer wissenschaftlichen Attraktivität bietet die Beschäftigung mit chemisch reaktiven Strömungen Lösungsmöglichkeiten in Bezug auf viele drängende Fragen, wie:

- Schadstoffbildung und Effizienz von Verbrennungsprozessen, von denen etwa 90 Prozent der Energieversorgung der Menschheit abhängen.
- Wirkungsgrad von Katalysatoren in der chemischen Industrie und bei der Abgasreinigung. In diesem Bereich werden weltweit etwa 500 Milliarden Euro jährlich umgesetzt.
- Herstellung neuer Materialien und neue Verfahren zur Herstellung von Mikroprozessoren in Gasphasen-Depositionsprozessen.

Reaktive Strömungen werden dabei durch die so genannten Navier-Stokes-Gleichungen beschrieben. Diese sehen zwar recht komplex aus (Systeme von gekoppelten partiellen Differentialgleichungen), sind jedoch konzeptionell sehr einfach, nämlich Bilanzen für die Erhaltungsgrößen Masse, Impuls, Energie und Massen der Teilchen im betrachteten Gemisch. Dabei werden katalytische Reaktionen auf Oberflächen durch geeignete Randbedingungen berücksichtigt.
Die Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen verlangt (außer einer möglichst schnellen Lösungsmethode) die Bereitstellung thermodynamischer Größen (Enthalpien, Wärmekapazitäten), Transportkoeffizienten (Wärmeleitung, Diffusionskoeffizient, Viskosität) und – wohl das schwierigste Problem – Reaktionsgeschwindigkeiten.



Beispiel für die Simulation eines turbulenten Verbrennungsvorganges: Ausbreitung einer Flammenfront in einem Dieselmotor.

Derzeit behandeln wir folgende Themen mit den Werkzeugen Modellierung und Simulation (Auswahl):

- Die Tröpfchen- und Sprayverbrennung im Hinblick auf ihre Anwendung in Gasturbinenbrennkammern, Raketenbrennkammern, in Industriefeuerungen und bei der motorischen Verbrennung. Die zu beschreibenden Prozesse beinhalten den Strahlzerfall und -aufbruch, die Atomisierung, die Aufheizung und Verdampfung der Flüssigkeit sowie die anschließende Zündung und Verbrennung in der Gasphase.
- Bei der Autoabgaskatalyse können Stickoxide mit Katalysatoren, die durch Zusatz einer Speicherkomponente in der Lage sind Stickoxide anzulagern, effizient entfernt werden. Durch kurzzeitiges Umschalten der Motorbetriebsbedingungen wird diese Speicherkomponente regeneriert und kann somit wieder Schadstoffe aufnehmen. Werden diese Konditionen zyklisch durchlaufen, ist effiziente Schadstoffminimierung auch über lange Zeiträume möglich.

- Ein alternativer Weg zur Abgasnachbehandlung ist die plasmainduzierte Abgasreinigung. Grundidee des Verfahrens: Abgas wird in einen Reaktor geleitet, in dem ein nicht-thermisches Plasma durch Stöße mit hochenergetischen Elektronen Radikale erzeugt und so chemische Prozesse auslöst, die bevorzugt die Stickoxide und unverbrannte Kohlenwasserstoffe angreifen.

6.3 Anwendung von Brennstoffzellen

41. Woche *Ulrich Stimming* • *Physik-Department, Technische Universität München*

41. Woche

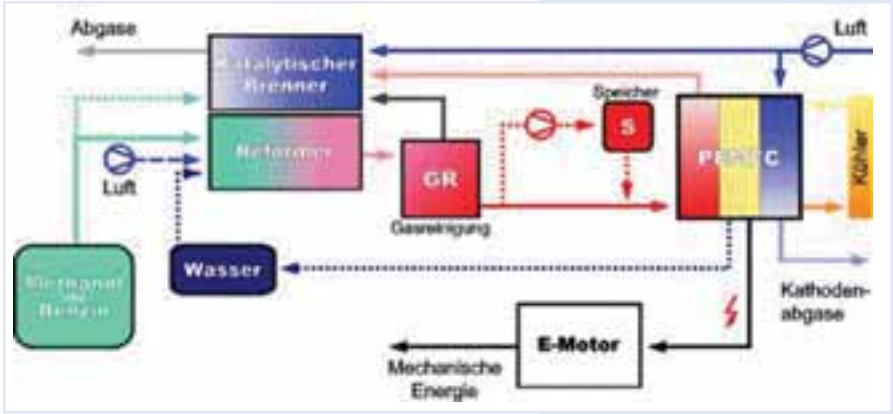
Der Einsatz von Brennstoffzellen im mobilen Bereich

Der zunehmende Bedarf an Mobilität führt zu immer höherer Verkehrsbelastung und damit zu einer Zunahme der Emissionen im Straßenverkehr. Elektrofahrzeuge haben zwar am Fahrzeug selbst keine Emissionen, besitzen aber eine relativ geringe Reichweite bei langen Ladezeiten. Brennstoffzellen im Automobil können elektrischen Strom sehr effizient direkt aus chemisch gespeicherter Energie gewinnen.

Wird Wasserstoff als Energieträger verwendet, so ist das Auto sogar emissionsfrei, da lediglich Wasser produziert wird. Wasserstoff besitzt allerdings eine geringe Speicherdichte. Nimmt man als Träger von Wasserstoff flüssige Treibstoffe wie Benzin, Diesel oder Methanol, die eine bis zu zehnfach höhere spezifische Energie haben, so lassen sich Reichweiten wie mit Verbrennungsmotoren erzielen. Sowohl Methanol als auch die höheren Kohlenwasserstoffe lassen sich im Fahrzeug in einem der Brennstoffzelle vorgeschalteten Prozess, der so genannten Reformierung, katalytisch im Wesentlichen in Wasserstoff und Kohlendioxid zerlegen. Das dabei auch auftretende Kohlenmonoxid ist ein ausgesprochenes Katalysatorgift, das den Wirkungsgrad der Brennstoffzelle verringert. In beiden Fällen muss daher der Anteil von Kohlenmonoxid im erzeugten Synthesegas in einer Gasnachbehandlung auf ein für die Brennstoffzelle akzeptables Maß reduziert werden.

Brennstoffzellen für den Einsatz in portablen Kleingeräten

Der Einsatz von Brennstoffzellen in portablen Kleinsystemen ist auch bei Leistungen von etwa zehn Watt vorstellbar. Die



PKW-Brennstoffzellensystem.

Stromversorgung für tragbare Geräte wie Notebooks, Camcorder und Handys könnte beispielsweise durch Miniaturbrennstoffzellen realisiert werden und dadurch einen Bereich der Batterietechnik revolutionieren. Denn im Gegensatz zu Batterien sind Brennstoffzellen eher leicht, haben eine hohe spezifische Leistungsdichte und erlauben einen kontinuierlichen Langzeitbetrieb. Allerdings benötigen sie einen Speicher für den Energieträger, dessen Größe die maximale Betriebsdauer bestimmt. Um eine wirkliche Alternati-

ve darzustellen, müssen die Kleinbrennstoffzellen einfach, kostengünstig und zuverlässig sein. Ansätze, die zurzeit erprobt werden, sind „luftatmende“ Brennstoffzellen, die mit Wasserstoff aus Metallhydrid-Speichern betrieben werden. Der Wasserstoffvorrat kann mit Hilfe eines Miniaturelektrolyseurs an der Steckdose regeneriert werden.

Brennstoffzellen in stationärer Anwendung

In Brennstoffzellen können kohlenstoffhaltige Brennstoffe elektrochemisch umgesetzt werden, wodurch chemische Energie mit hohem energetischen Wirkungsgrad und minimaler Schadstoff-Emission in Elektrizität umgewandelt werden kann. Deshalb werden sie in der stationären Elektrizitätsproduktion mit dem Schwerpunkt dezentraler Energieversorgung angewandt.

Die Brennstoffzellen, die für den Einsatz in Kraftwerken diskutiert werden, arbeiten hauptsächlich bei Temperaturen über 100 °Celsius. Durch Integration der Zelle in ein umfangreicheres System kann die Abwärme ebenfalls genutzt werden. Phosphorsäure-Brennstoffzellen eignen sich zur dezentralen Strom- und Wärmeerzeugung und werden heute weltweit in Anlagen mit elektrischen Leistungen von 100 kW bis 10 MW betrieben. Die Abwärme kann in Form von 60 bis 80 °Celsius heißem Wasser abgekoppelt werden, wodurch man einen Gesamtsystemwirkungsgrad von bis zu 80 Prozent erhält. Für die gleichzeitige Erzeugung von Wärme und elektrischem Strom sind die so genannten Hochtemperaturbrennstoffzellen von großer Bedeutung. Aufgrund der hohen Betriebstemperatur von 600 bis 1000 °Celsius wird hier die interne Erdgasreformierung ermöglicht. Außerdem kann die Restabwärme genutzt werden. Solche Kombinationskraftwerke erreichen ebenfalls einen Gesamtwirkungsgrad von 70 bis 80 Prozent.

Ein großer Vorteil von Brennstoffzellen gegenüber den Verbrennungsanlagen ist der eigentliche Reaktionsmechanismus, der die Stromversorgung gewährleistet: Wird reiner Wasserstoff verwendet, der mit Sauerstoff reagiert, so entsteht nur Wasser. Die Emission von Schwefel- oder Stickoxiden ist somit in Kombinationskraftwerken im Vergleich zu den konventionellen Kraftwerken mindestens um eine Größenordnung niedriger.

Brennstoffzellen können die Energieversorgung von Ein- und Mehrfamilienhäusern gewährleisten.

Brennstoffzellen für die Hausenergieversorgung

Brennstoffzellen können gleichzeitig elektrische und thermische Energie mit einem hohen Wirkungsgrad produzieren. In Verbindung mit Erdgas als Energieträger sind zudem die entstehenden Schadstoffemissionen äußerst gering. Deshalb eignen sie sich hervorragend für die Ener-

gieversorgung von Ein- und Mehrfamilienhäusern.

Die Vorteile kleiner stationärer Brennstoffzellen gegenüber konventionellen Energieerzeugungssystemen sind unter anderem:

- schnelles Ansprechverhalten auf Energieanforderungen seitens des Energieabnehmers
- Energie wird direkt am Ort des Verbrauchers erzeugt, Transportverluste entfallen
- hohe Flexibilität bezüglich der verschiedenen Betriebszustände Tag/Nacht und Winter/Sommer steigert den Wirkungsgrad.

Maßgeblich für eine rationelle und effiziente Energieverwendung im Sektor Haushalt ist sowohl die verstärkte Benutzung sparsamer Elektrogeräte und die breite Einführung von Häusern in der Niedrigenergiebauweise als auch die Entwicklung neuer Energieversorgungssysteme.

6.4 Umwandlung chemischer in physikalische Signale: Von Sensoren und Brennstoffzellen

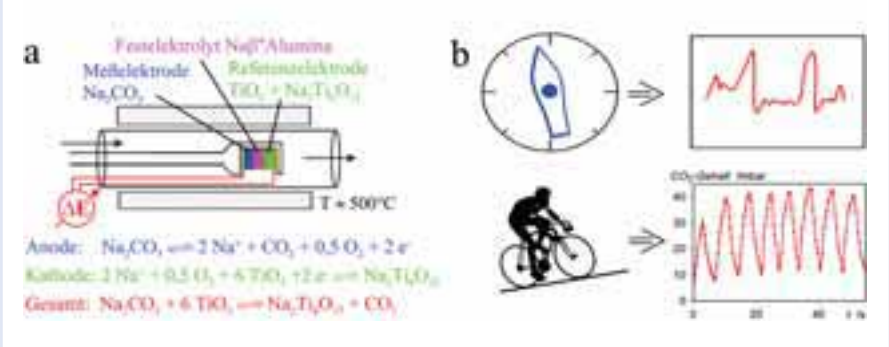
51. Woche *Rotraut Merkle und Joachim Maier • Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart*

Entgegen einem weit verbreiteten Vorurteil sind kristalline Festkörper nicht notwendigerweise inerte Gebilde, die lediglich über ihre Oberfläche mit der Nachbarschaft kommunizieren. Zwar ist in der Tat wenigstens eine Komponente des Festkörpers rigide und zum Platzwechsel kaum zu bewegen, doch finden sich eine Reihe von Materialien, bei denen Kationen oder Anionen – zusätzlich zu den Elektronen – eine erhebliche Mobilität aufweisen. In solchen Fällen gestatten ionische Ladungsträger in gezielter Weise die Umwandlung chemischer in physikalische Signale.

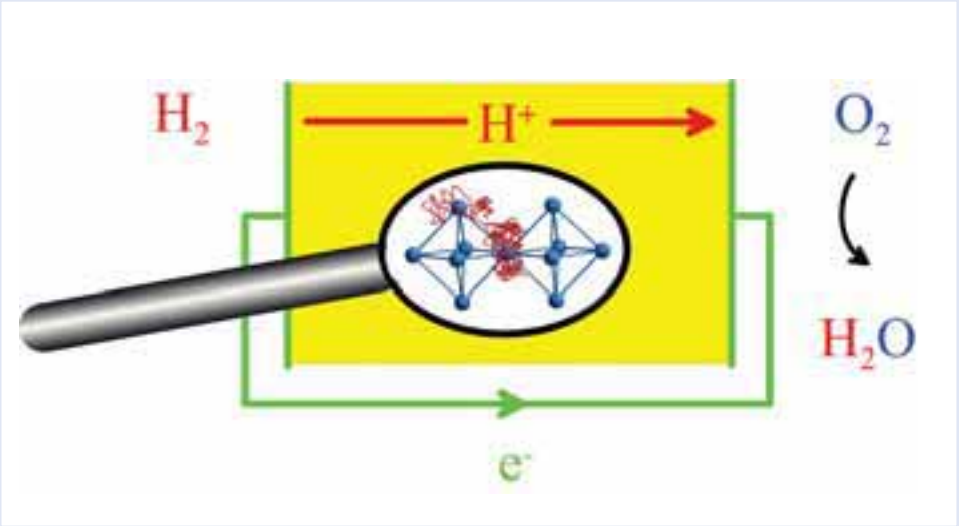
Die gleichzeitige Verfügbarkeit von ionischen und elektronischen Ladungsträgern erlaubt die stöchiometrische Variation der Zusammensetzung, während die reinen Ionenleiter als Festelektrolyte die Konstruktion festkörperelektrochemischer Zellen ermöglichen. In Batterien wird so die gespeicherte chemische Energie in elektrische Energie umgewandelt. Brennstoffzellen, bei denen die Brenngase ständig nachgeliefert werden können, ermöglichen eine kontinuierliche Stromerzeugung. Mit einem ähnlichen Aufbau kann die Konzentration solcher Gase durch Spannungsmessung bei offenem äußerem Stromkreis ermittelt werden (elektrochemische Sensoren).

Chemische Sensoren – Umwandlung chemischer in physikalische Information

Die „Chemie“ der Umgebung lässt sich außer über Leitfähigkeit oder Farbe auch über jede andere mit ihr eindeutig in Beziehung stehende Messgröße ablesen. Eine wichtige derartige Messgröße ist die



a) Aufbau des potentiometrischen CO_2-Sensors mit offener Referenzelektrode.
b) Umwandlung eines chemischen Signals (CO_2-Ausstoß des Radfahrers) in ein physikalisches Signal (Spannung) am Beispiel des CO_2-Sensors.



Brennstoffzelle mit protonenleitendem Elektrolytmaterial. Unter der Lupe: Bewegung eines Protons (rot) um die Sauerstoff-Ionen (blau) eines Perowskit-Protonenleiters.

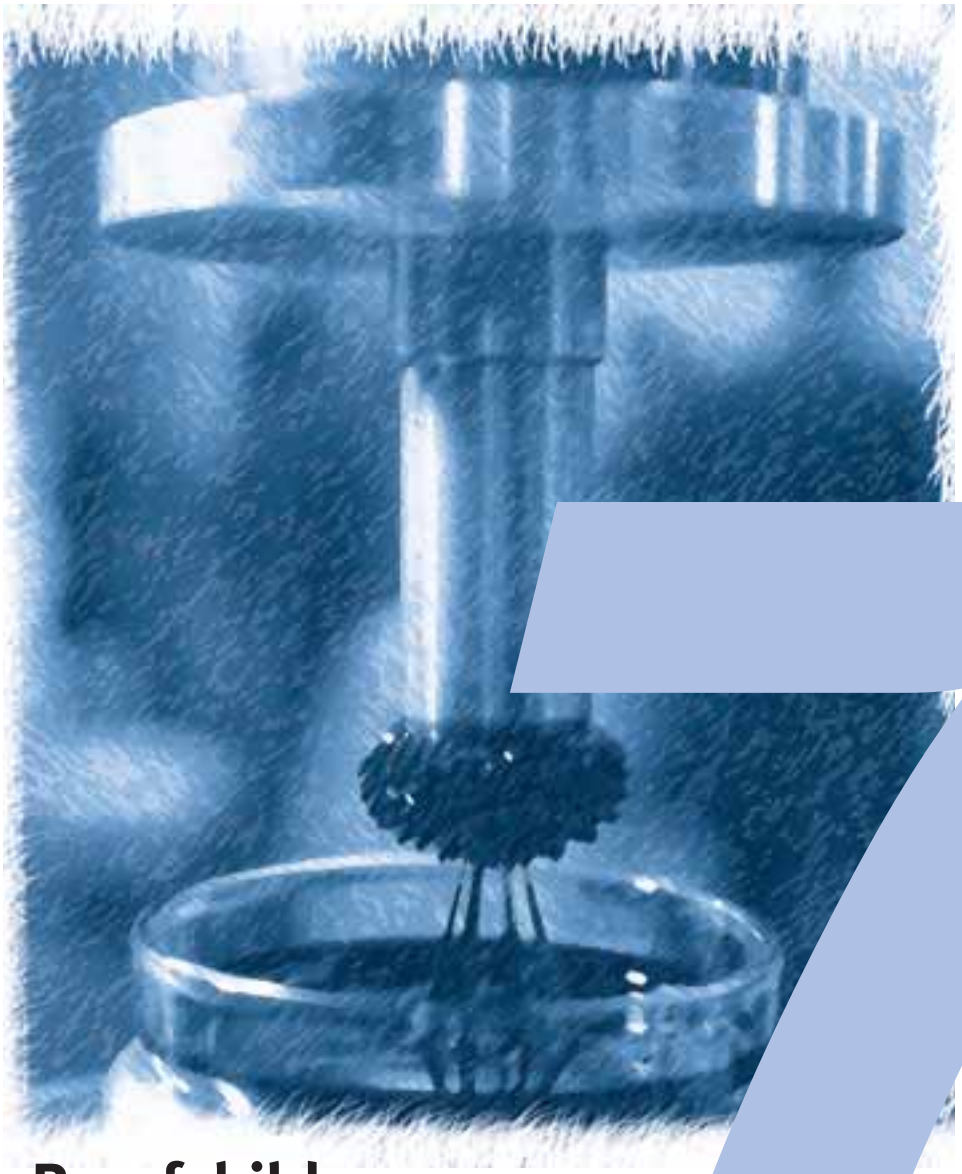
Brennstoffzellen – Umwandlung chemischer in elektrische Energie

In Brennstoffzellen wird chemische Energie über räumlich getrennte Elektrodenreaktionen direkt in elektrische Energie umgewandelt. Brennstoffzellen mit keramischen Sauerstoffionenleitern als Elektrolyt benötigen jedoch so hohe Betriebstemperaturen, dass sich daraus erhebliche Materialprobleme ergeben. Eine mögliche Alternative dazu sind keramische Protonenleiter, die die notwendige Leitfähigkeit bei wesentlich niedrigeren Temperaturen erreichen. Dotierte Erdalkali-Titanate, -Zirkonate und -Cerate mit Perowskitstruktur können durch Einbau von Wasser leichtbewegliche protonische Defekte bilden. Dabei besetzt der „OH-Teil“ eines Wassermoleküls eine Sauerstoffleerstelle, und der „H-Teil“ bildet mit einem regulären Sauerstoffion ein weiteres Hydroxidteilchen. Die Bewegung der an Sauerstoffionen gebundenen Protonen durch das Perowskitgitter kann durch Molekulardynamik-Simulationen genauer untersucht werden.

Spannung einer geeignet konzipierten elektrochemischen Zelle. Dort ist dann das Gas Bestandteil der elektrochemisch geführten Reaktion. Vielen bekannt ist die Lambdasonde, die den Sauerstoffgehalt im Automobilabgas über den festen Ionenleiter Zirkondioxid (Yttrium-dotiert) misst, damit die Benzinzufuhr entsprechend gesteuert werden kann.

In unserem Arbeitskreis wurde ein selektiver potentiometrischer CO_2-Sensor entwickelt, dessen Referenzelektrode inert gegen CO_2 ist, und die deswegen ebenfalls dem Messgas ausgesetzt werden kann. Damit entfällt nicht nur die aufwendige Abdichtung der Referenzelektrode. Da dann an beiden Elektroden derselbe Sauerstoffpartialdruck herrscht, wird auch die gemessene Spannung unabhängig vom Sauerstoffgehalt des Messgases. Weil der Sensor sich lokal im Gleichgewicht befindet, weist er eine hervorragende Langzeitstabilität auf und benötigt keine Kalibrierung. Die Ansprechzeit ist so kurz, dass einzelne Atemzüge verfolgt werden können.

Nachdem sich das Proton einige Zeit um ein Sauerstoffion bewegt hat, erfolgt der „Protonensprung“. Die Häufigkeit solcher Sprünge, die wesentlich die Protonenleitfähigkeit des Materials bestimmen, hängt von der Struktur des Perowskits (Gitterkonstante, Symmetrie), aber auch von seiner chemischen Zusammensetzung und dem verwendeten Dotierion ab. Neben einer hohen Protonenleitfähigkeit muss ein geeignetes Elektrolytmaterial viele weitere Anforderungen wie thermische Stabilität oder chemische Beständigkeit gegenüber CO_2 erfüllen.



7

Berufsbilder: Physikalische Chemie in der Industrie

7 Berufsbilder: Physikalische Chemie in der Industrie

Wer sind eigentlich die Menschen hinter der Forschung in der Industrie? Und welche Rolle spielen dabei die Physikochemiker und die Physikalische Chemie an sich? Beispiele hierzu zeigen, wie breit das Einsatzgebiet der Forscher und ihrer Wissenschaft in der Industrie ist. Reicht es doch von der Polymertechnik über die Entwicklung neuer Inhalationsgeräte, Mikroreaktoren oder Brennstoffzellen bis hin zu nanostrukturierten Oberflächen und Beschichtungen. Fazit: Überall dort wo Chemie gemacht wird, ist auch die Physikalische Chemie gefragt.

7.1 Pharmazeutische Industrie ist physikalische Chemie – Als Physikochemiker bei Boehringer Ingelheim

1. Woche *Jörg Schiewe • Boehringer Ingelheim Pharma GmbH & Co. KG, Ingelheim am Rhein*

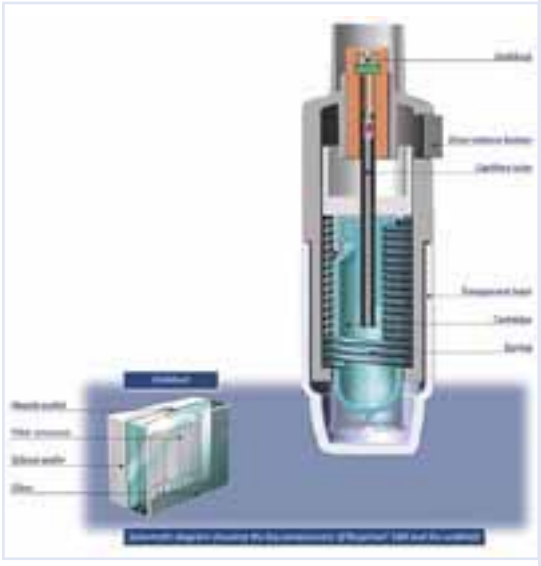
Physikalische Chemie wird von Menschen gemacht, zum Beispiel von Physikochemikern, die in vielen Bereichen der chemischen Forschung tätig sind – so auch in der Pharmaindustrie. Als Spezialist beschäftige ich mich mit physikalisch-chemischen Methoden der Pharmazie.

Als Leiter des Labors „Technische Evaluierung“ arbeite ich intensiv an der Frage, wie inhalative Arzneistoffe optimal über die Lunge verabreicht werden können. Dazu untersuche und bewerte ich technische Leistungsmerkmale von neuen Inhalationsgeräten, die von externen Firmen angeboten werden oder auf eigenen Ideen beruhen. Ziel ist es, ein Gerätedesign zu finden, das bei einfacher Anwendung durch den Patienten – zuverlässig ein Aerosol erzeugt, welches tief in die Lunge eingeatmet werden kann. Dazu müssen die Wirkstoffteilchen im Aerosol eine Größenverteilung von ein bis fünf Mikrometer haben, um das natürliche Filtersystem der Atemwege passieren zu können.

Teamarbeit ist bei derartigen Entwicklungen absolut notwendig. So kann ich vom Wissen und den Erfahrungen der Abteilung Drug Delivery profitieren, in der auch ein neuartiges Inhalationsgerät entwickelt wurde.

Da die Wirkstoffe oftmals in fester Form angewendet werden, besteht eine weitere Aufgabe in der Optimierung der physikochemischen Eigenschaften von Pulversystemen. Zurzeit beschäftige ich mich mit neuen Verfahren der Zerkleinerung von Feststoffen. Mit diesen Verfahren wollen wir kleine Partikel in einer Form erzeugen, bei der die Kohäsionskräfte zwischen den Teilchen reduziert sind. Bei der Anwendung in einem Inhalationsgerät können solche Teilchen dann leichter

Der Physikochemiker Jörg Schiewe ist seit 2000 Mitarbeiter der Boehringer Ingelheim Pharma GmbH & Co. KG in Ingelheim am Rhein im Geschäftsbereich Forschung und Entwicklung der Abteilung Drug Delivery.



Dieser Inhalator zerstäubt 15 Mikroliter Flüssigkeit, wie zum Beispiel wässrige Wirkstofflösungen, in ca. 1 Sekunde.

zerstäubt, also besser in ein inhalierfähiges Aerosol überführt werden.

Der Grundstein für meinen späteren Beruf war mein Chemiestudium an der Martin-Luther-Universität in Halle an der Saale und meine Promotion 1994 zu einem physikochemischen Thema. Danach habe ich zunächst als Postdoc an der Monash University in Melbourne gearbeitet. Im Anschluss an meinen Aufenthalt in Australien war ich drei Jahre als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mikrotechnik Mainz tätig. Seit Herbst 2000 arbeite ich bei der Boehringer Ingelheim Pharma GmbH & Co. KG.

Die Kenntnisse in Physikalischer Chemie, Physik und Technik, die ich während meines Studiums und der wissenschaftlichen Tätigkeit danach erwerben konnte, sind eine wesentliche Voraussetzung zur Lösung der täglich gestellten Aufgaben. Das notwendige medizinische Wissen, wie etwa über die Funktion der Lunge, konnte ich mir dank der internen Schulungen bei Boehringer Ingelheim aneignen.

Zu meiner Tätigkeit als Physikochemiker gehören neben der Organisation der Laborarbeit und den Besprechungen mit Kollegen ebenso die Pflege von Firmenkontakten und der Besuch von Fachkonferenzen, auf denen aktuelle technische Entwicklungen vorgestellt werden. Für diese internationalen Treffen sind gute Kenntnisse der englischen Sprache unerlässlich.

Wichtig für meine Arbeit ist es, einen Blick für das Wesentliche zu entwickeln. Nur so kann es gelingen, aus den Angeboten an neuen Technologien diejenigen heraus zu filtern, die in der Zukunft relevant sein werden. Die Arbeit in einem Pharmaunternehmen ist interessant und herausfordernd, sie macht mir viel Spaß. Ein großer Reiz meiner Tätigkeit besteht für mich auch darin, am Anfang eines zielgerichteten Entwicklungsprozesses mitzuwirken, wenn aus ersten Forschungsergebnissen Impulse für neue Produkte entstehen.

7.2 1000 gehen auf ein Haar

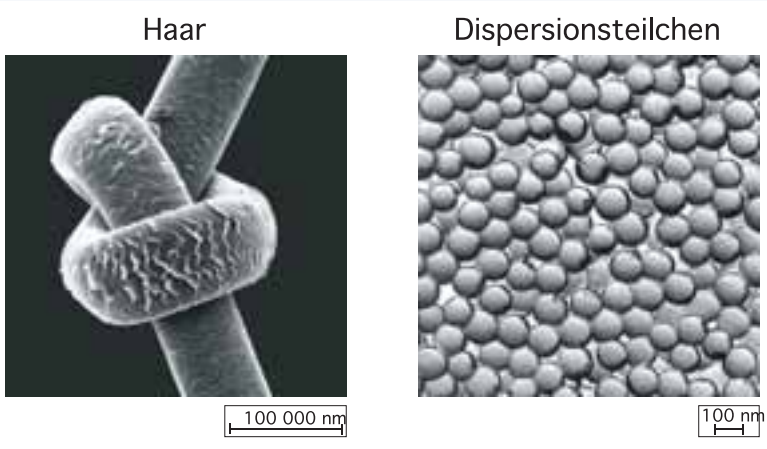
7. Woche *Dieter Distler • BASF Aktiengesellschaft, Ludwigshafen*

Die kleinste Dimension, die uns im täglichen Leben begegnet, ist die Dicke eines Haares. Als Haarspalterei bezeichnen wir deshalb auch das schier Unmögliche und Überflüssige, nämlich so ein dünnes Haar auch noch spalten zu wollen. Menschliche Haare sind circa 70 bis 100 Mikrometer im Durchmesser (das sind 0,07 – 0,1 Millimeter oder 70.000 – 100.000 Nanometer).

Noch viel kleinere Dimensionen haben die Klebstoffteilchen, die in Wasser dispergiert bei Verletzungen eines Blattes oder Zweiges eines Gummibaumes als weiße Milch austreten. Diese „Klebstoffteilchen“ waren Vorbild für die synthetisch über Emulsionspolymerisation in großer Vielfalt hergestellten Polymer-

7. Woche

Etwa 1000 Teilchen von Polymerdispersionen gehen auf die Dicke eines einzigen menschlichen Haares. Im Bild links ist in ein Haar ein Knoten gemacht, damit man die schuppige Struktur des Haares sieht. Im Bild rechts sind Teilchen einer Polymerdispersion bei einer 100fach höheren Vergrößerung dargestellt. Die kugelförmigen Teilchen sind in Wasser dispergiert und weisen selbst bei hohen Konzentrationen (bis über 60 Prozent) niedrige Viskositäten auf.



dispersionen. Die Teilchen von Polymerdispersionen haben Durchmesser von 30 bis 500 Nanometern. Es gehen also etwa 1000 Teilchen auf die Dicke eines menschlichen Haares.

Polymerchemiker synthetisieren die Polymere aus verschiedenen Monomeren wie etwa Acrylsäureester, Styrol, Butadien und stellen über die Zusammensetzung und das Molekulargewicht die Eigenschaften des Polymerisates ein.

Physikochemiker beschäftigen sich mit der Morphologie der Teilchen und deren Größe. Mit der Teilchengrößenverteilung steuern sie die Fließeigenschaften der wässrigen Dispersionen.

Verfahrensingenieure bemühen sich darum, dass die Polymerisation sicher, schnell und vollständig in großen Reaktoren abläuft.

Anwendungstechniker schließlich sorgen dafür, dass die Polymerdispersion für Klebstoffe, Lacke, Anstrichfarben, Papierstreichmassen, Textilverfestigung, Pigmentdruck, Lederfinish, Möbelmodifizierung und viele andere Gebiete eingesetzt werden können.

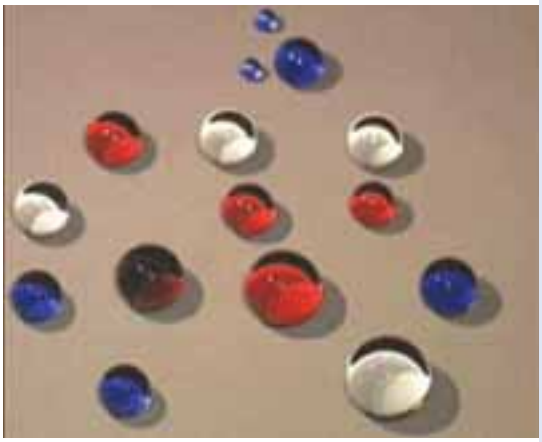
7.3 Materialoberflächen für den technischen Einsatz

19. Woche *Karsten Reihs und Rolf Claessen • SuNyx GmbH, Köln*

Materialoberflächen gibt es im täglichen Leben überall, nämlich immer dort, wo Materialien überhaupt zum Einsatz kommen. Oft ist die Funktion eines Materials, beispielsweise für ein Bauteil, besonders durch die Eigenschaft seiner Oberfläche bestimmt. Beispiele dafür gibt es aus vielen sehr unterschiedlichen technischen Gebieten. Dazu gehören Eigenschaften wie das Aneinander-Haften verschiedener Materialien beim Kleben, das Reflektionsvermögen von Oberflächen bei optischen Anwendungen oder katalytische Eigenschaften von Oberflächen in einem Abgaskatalysator.

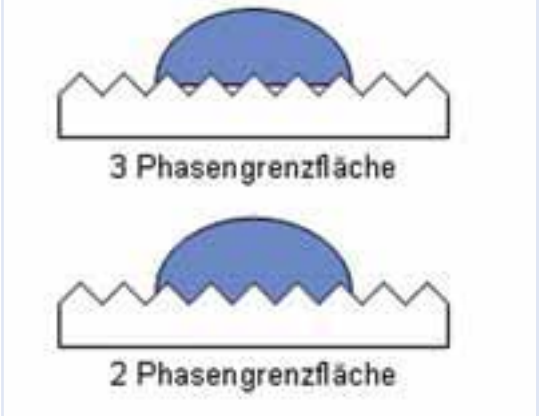
SuNyx beschäftigt sich neben optischen Eigenschaften besonders mit der Oberflächeneigenschaft der Benetzung, also mit der Frage, wie gut eine Oberfläche eine Flüssigkeit „annimmt“.

Diese fast gar nicht mehr benetzenden („ultraphoben“) Oberflächen muss man mit besonders strukturierten Oberflächen herstellen. Dabei spielen Nanostrukturen eine zentrale Rolle. Es gibt viele mögliche Arten von Strukturen für ultraphobe Oberflächen mit ganz unterschiedlichen



Eine „fast nicht“ benetzende Oberfläche. Die Fläche ist genau waagerecht gelegt, sonst würden die bunten Wassertropfen sofort wegrollen. Der Durchmesser der großen Tropfen beträgt circa drei Millimeter.

19. Woche



Schematische Darstellung von Flüssigkeitstropfen auf strukturierten Oberflächen. Die Strukturen der Oberfläche sind – anders als hier schematisch gezeigt – immer sehr klein im Vergleich zum Tropfen.

Merkmalen. Solche irregulären Strukturen, die nicht aus geometrisch geordneten Elementen bestehen, haben für diese Anwendung eine besondere Bedeutung. Ihre Struktur kann mit statistischen Methoden eindeutig beschrieben werden. SuNyx arbeitet zusammen mit dem Technion – Israel Institute of Technology und dem Fraunhofer Institut für angewandte Optik und Feinmechanik an der Frage, wie Oberflächenstrukturen von ultraphoben Oberflächen für optische Anwendungen beschaffen sein müssen.

Von strukturierten Oberflächen mit ultraphoben Eigenschaften gibt es zwei Versionen: Eine Version, bei der die Grenzfläche im Kontaktbereich von Flüssigkeit und Unterlage aus drei Phasen besteht (flüssig, fest, gasförmig) und eine Version, bei der die Grenzfläche im Kontaktbereich von Flüssigkeit und Unterlage aus zwei Phasen besteht (flüssig, fest).

Wo werden solche Oberflächen eingesetzt?

Diese Oberflächen sind besonders verschmutzungsresistent, weil auf ihnen keine Wassertropfen kleben bleiben und Ränder hinterlassen können. In Autos mit solchen Scheiben erreicht man zum Beispiel bei Regenfahrten einen erheblichen Sicherheitsvorteil, wie anhand von Studien gezeigt werden konnte.

Ein anderes zukünftiges Einsatzgebiet betrifft die Möglichkeit, die fast schwebenden Tropfen mit elektrischen Feldern zu bewegen. Auf diese Weise würden sich universell programmierbare Prozessoren für Flüssigkeiten herstellen lassen, die in der Analytik als sehr leistungsfähige neuartige Chip-Labors („Lab-on-a-chip“) eingesetzt werden können.

All diese Entwicklungen erfordern die enge Zusammenarbeit von (Physiko-)Chemikern, Physikern, Biochemikern, Mathematikern und Ingenieuren.

24. Woche

7.4 Mannometer Nanometer: Die faszinierende Welt der Zwerge

24. Woche *Wolfgang Leuchtenberger • Degussa AG, Düsseldorf*

Nanopartikel – Nano leitet sich vom griechischen nanos „der Zwerg“ ab – sind Teilchen, die zwischen einem Millionstel und 100 Millionstel Millimeter groß sind, mehr als tausendmal kleiner als der Durchmesser eines Haars. In dieser Größenordnung bestimmt nicht nur die chemische Zusammensetzung die Eigenschaften, sondern auch Größe und Form der Partikel. Optische, elektrische und magnetische Eigenschaften, aber auch Härte, Zähigkeit oder Schmelzpunkt von Nanomaterialien unterscheiden sich deutlich von den Eigenschaften entsprechender makroskopischer Festkörper. Schmutzabweisende Oberflächen, kratzfeste Beschichtungen, superschnelle Computer, neue Krebstherapien, neue Katalysatoren für chemische Prozesse sind Beispiele für vielfältige Anwendungsmöglichkeiten der Nanomaterialien. Degussa hat in dreijähriger Projektzeit im so genannten Projekthaus Nanomaterialien neue Herstelltechnologien für derartige Materialien entwickelt. Anfang 2003 wurde das interne Start-up „Degussa Advanced Nanomaterials“ gegründet, das die neu entwickelten Nanomaterialien vermarktet, Produkte, die bei Sonnenschutz, Mikrochips, Touchscreens und leitfähigen Beschichtungen Anwendung finden.

Sonnenschutz

Sonnencremes sollen die empfindliche Haut zuverlässig und unsichtbar gegen UV-Strahlen schützen. Erreichen lässt sich dies mit nanoskaligem Zinkoxid, das Degussa Advanced Nanomaterials anbietet. Dieses nanoskalige Produkt verbindet hohes UV-Absorptionsvermögen mit uneingeschränkter Transparenz. In Sonnenschutzmitteln wirkt es als physikalischer Lichtschutz: Die Nanopartikel legen sich unsichtbar auf die Haut und reflektieren die Sonnenstrahlen wie kleine Spiegel. In Kombination mit nanoskaligem Titandioxid lassen sich sehr effektive UV-Breitbandfilter mit hohen Lichtschutzfaktoren formulieren, die für die Haut gut verträglich sind und gegen Hautalterung (UVA) und Sonnenbrand (UVB) schützen.

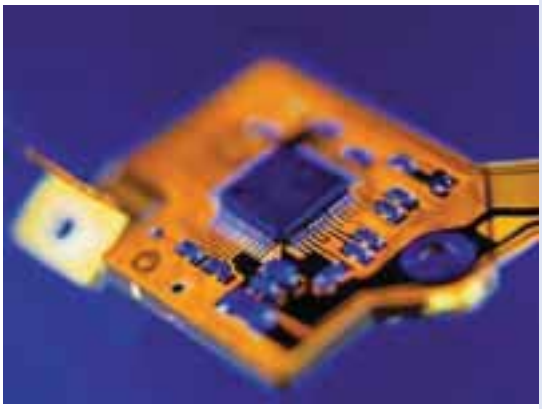
Nanopartikel wirken in Sonnenschutzmitteln als physikalischer Lichtschutz.

Chemisch-mechanisches Polieren (CMP)

Die ultrapräzise Oberflächenbearbeitung von Wafern ist eine Schlüsseltechnologie für die Herstellung noch leistungsfähigerer Computerchips. Immer kleinere elektronische Bauteile auf dem Chip werden über Leiterbahnen verbunden, die nur wenige tausend Atome breit sind. Damit bei diesen winzigen Strukturen, die aus Millionen Bauteilen in mehreren Schichten auf dem Wafer bestehen, keine Fehler auftreten, muss jede einzelne Schicht absolut eben sein. Erreichen lässt sich dies durch chemisch-mechanisches Polieren (CMP) mittels Aluminiumoxid und mit pyrogener Kieselsäure. Mit zunehmender Miniaturisierung der elektronischen Bauteile wächst der Bedarf nach Poliermitteln für noch feinere Strukturen. Mit nanoskaligem Ceroxid werden die Isolationsschichten und Leiterbahnen im Mikrochip nahezu „atomar glatt“ poliert. Geeignet ist dieses Produkt insbesondere für das Polieren von Kupfer, das als Leiterbahnmaterial in der neuesten Chip-Generation zum Einsatz kommt.

Transparente Antistatik-Beschichtungen

Antistatische Beschichtungen verhindern die elektrostatische Aufladung von Kunststoff- und Lackoberflächen. Dadurch wird die Gefahr plötzlicher Entladungen gebannt und auch die unerwünschte Staubadhäsion wirksam unterbunden. Bislang wird in Antistatik-Beschichtungen bevorzugt Carbon Black eingesetzt, mit dem sich jedoch keine transparenten Beschichtungen formulieren lassen. Leitfähiges Indiumzinnoxid (ITO) ermöglicht dagegen die antistatische Beschichtung von Kunststofffen-



Computerchips werden immer kleiner und leistungsfähiger. Die richtige Behandlung der Wafer-Oberfläche ist hierfür eine entscheidende Voraussetzung.

28. Woche

stern. Außerdem kann bei Gebäuden oder Fahrzeugen der Energieeintrag durch Sonneneinstrahlung deutlich reduziert und damit Energiekosten für die Klimatisierung gesenkt werden.

Touchscreens

Die Funktion von Touchscreens beruht im Wesentlichen auf zwei ITO-Schichten, die durch Abstandhalter getrennt sind. Ein Fingerdruck auf die Vorderschicht führt zu einem elektrischen Kontakt, der eine bestimmte Spannung in der unteren Schicht hervorruft und so den gewünschten Vorgang auslöst. Erzeugt werden die großflächigen ITO-Schichten durch Sputtern. Dabei schießen beschleunigte Ionen – ähnlich wie beim Billard – Teilchen aus der Oberfläche von Indiumzinnoxid, die sich dann in einer dünnen Schicht niederschlagen. Herausragender Vorteil von ITO ist der außerordentlich niedrige Rohstoffverbrauch.

Sonnencreme, Touchscreens, das Polieren von Mikrochips oder leitfähige Lacke zeigen nur einen kleinen Ausschnitt davon, was Nanomaterialien leisten können. Welche weiteren wunderbaren Möglichkeiten in maßgeschneiderten Nanomaterialien stecken, lässt sich heute kaum erahnen. In den kommenden Jahren werden für Nanomaterialien Zuwächse um 20 Prozent erwartet.

Magnetische Flüssigkeit

7.5 Kunststoffe in der mesoskopischen Welt

28. Woche *Edith Hellmann und Matthias Rehahn • Deutsches Kunststoff-Institut (DKI), Darmstadt*
Karlheinz Nothnagel, Röhm GmbH & Co. KG, Darmstadt

Polymere sind aus organischen Molekülen, den Monomeren, aufgebaut, die in langen Ketten miteinander verbunden sind. Sie bilden deshalb weiche, elastische Festkörper, die schon bei mäßigen Temperaturen in hochviskose Schmelzen übergehen. Diese Merkmale haben den Erfolg der Polymerwerkstoffe begründet, die mit Recht als Kunststoffe bezeichnet werden.

Die Polymerketten werden durch eigenwillige Skalengesetze beschrieben. Sie können bis auf über 1 Mikrometer Länge wachsen, sind dabei aber nur ungefähr 1 Nanometer dick. Diese dünnen Fadenmoleküle sind nicht starr, sondern liegen in ständig wechselnden Knäuelkonformationen vor. Die Knäueldurchmesser liegen im Bereich von 10 bis 100 Nanometern Durchmesser. Die Knäuel verschiedener Ketten verschlaufen sich miteinander zu einem wirren Netzwerk, demgegenüber ein Topf Spaghetti als Muster vorbildlicher Ordnung erscheint. Das hat seltsame Konsequenzen. Wenn sich zwei Kettensegmente treffen, wissen sie durchaus nicht, ob sie zur gleichen Kette gehören oder zu verschiedenen. Wenn zwei Polymerketten verschiedener chemischer Struktur miteinander zu einer Gesamtkette verknüpft werden, können die beiden Einzelketten, obwohl aneinanderhängend, sich gegenseitig so ausweichen, dass zwei separate Nanophasen entste-

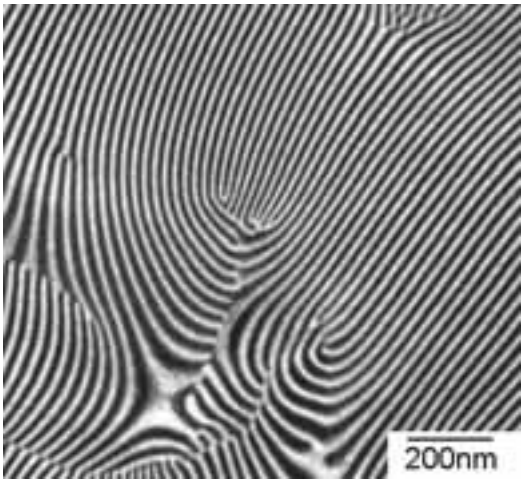
hen. Solche Effekte verdeutlichen, dass Polymerketten, obwohl sie zweifellos als Moleküle zu klassifizieren sind, auch supermolekulare Eigenschaften aufweisen, die man sonst nur Phasen zuordnet.

Daraus ergibt sich die Rolle der Polymeren in der mesoskopischen Welt. Mesoskopische Systeme zeichnen sich durch submikroskopische, dabei aber supermolekulare Strukturen auf der Skala von 10 Nanometer bis 1 Mikrometer aus. Klassische Beispiele sind die wässrigen Kolloide und andere Dispersionen. Aber auch Festkörper, vor allem Polymere, weisen solche Strukturen auf. Noch herrscht Babylon in der Begriffsbildung. Moderne Studien zur Mikroemulsionspolymerisation und zur Nanotechnologie befassen sich zum Beispiel beide oft mit mesoskopischen Phasen und Strukturen.

Die mesoskopische Welt hat ihre eigenen Gesetze:

- Die Schwerkraft verliert ihre Wirkung. Die winzigen Phasendomänen in mesoskopischen Emulsionen unterliegen der Brownschen Bewegung, die sie in der Schwebe hält.
- Tröpfchen und Partikeln mit 200 Nanometer bis 1 Mikrometer Durchmesser streuen intensiv sichtbares Licht (400-770 nm Wellenlänge). Deshalb ist die Milch weiß. Noch kleinere Tröpfchen unter 200 Nanometer Durchmesser sind dagegen unsichtbar. Das Licht ist zu langwellig, um sie zu bemerken.

Man kann in die mesoskopische Welt auf zwei Wegen eindringen: erstens auf dem mikrotechnischen durch Zerteilen und Strukturieren makroskopischer Objekte (top down) oder zweitens dem chemischen durch den Aufbau von Riesenmole-



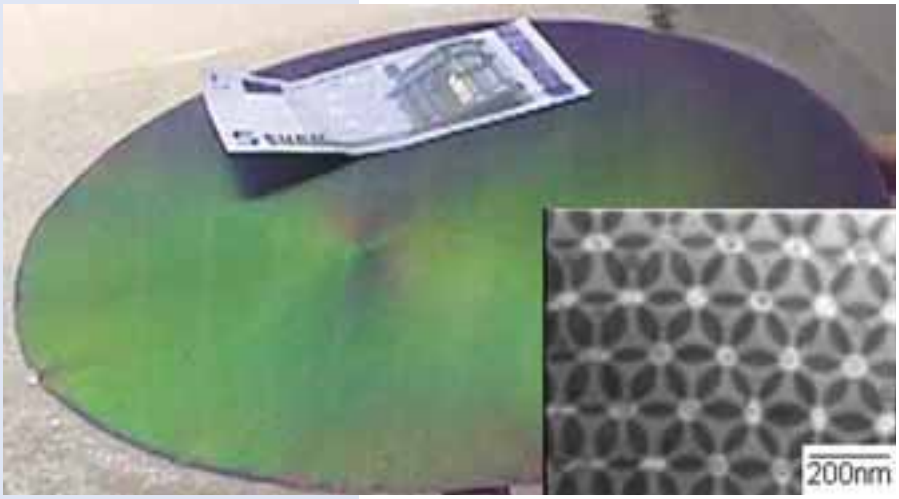
Lamellenphasen (Dicke 20 nm) eines Dreiblockcopolymeren im Lamellenstapel (schwarz Butadien, weiß Styrol) Man sieht die lamellare Stapelstruktur eines Dreiblockcopolymeren SBS mit einem inneren Butadien- und zwei äußeren Styrolblockketten. Diese Strukur entsteht von selbst durch molekulare Selbstorganisation. Von den beiden alternierenden Mesophasen ist die schwarze zähflüssig, die weiße aber fest. Daraus resultiert das elastische Deformationsverhalten eines Gummis. Der Markt dieser thermoplastischen Elastomeren (TPEs) ist stark expansiv, weil man TPEs, anders als konventionellen Gummi, aufschmelzen und problemlos rezyklieren kann.

külen oder durch molekulare Selbstorganisation (bottom up). Für den chemischen Weg eignen sich die polymeren Kettenmoleküle mit ihren mesoskopischen Knäuelabmessungen besonders gut.

Blockcopolymere bestehen aus zwei oder mehr chemisch verschiedenen Polymeren. Die verschiedenen Blockketten streben auseinander und bauen unsichtbar feine, wunderbar geordnete Phasenstrukturen auf.

Ein weiteres Beispiel für Selbstorganisation sind mesoskopische Latexkugeln. Man sieht ein kristallines Gitter und könnte glauben, es sei aus Atomen aufgebaut. In Wirklichkeit haben aber die Kugeln mesoskopische Größe. Solche Kugeln können in Latexdispersionen hergestellt werden. Wenn man sie aus zwei Polymeren aufbaut, mit einem harten Kern und einer weichen, viskosen Schale, fließt die Latexmasse bei hohen Temperaturen wie eine reguläre Polymerschmelze, so dass man durch Extrusion und Spritzguss Filme und Formkörper herstellen kann.

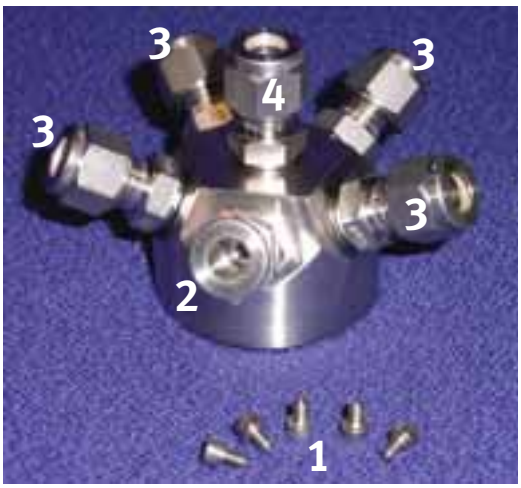
Kürzlich ist es erstmals gelungen, solchen Filmen die gezeigte kristalline Gitterstruktur zu verleihen. Diese Struktur



Perfektes Kristallgitter mesoskopischer Latexkugeln im Opalfilm (man sieht zwei Schichten des Gitters und eine dritte durch Punkte angedeutet), dahinter: grün reflektierender Opalfilm (mit 5 € Schein als Skala)

wechselwirkt mit Licht, das an den Gitterebenen nach dem Braggschen Gesetz gestreut wird. Die Filme schillern deshalb in Reflektion winkelabhängig in brillianten metallischen Farben. In Transmission erscheint die jeweilige Komplementärfarbe. Schräge Gitterebenen fügen dem Bild noch charakteristische Farbmuster hinzu.

Die Struktur entspricht der eines Halbedelsteins, des Opals, der sein changierendes Farbenspiel den gleichen Streuphänomenen verdankt. Die Forschung visiert aber keine Halbedelsteine an, sondern photonische High-Tech-Anwendungen: Wenn in einem solchen Film Licht angeregt wird (durch Mikrolaserpartikeln, LEDs oder durch Fluoreszenz), kann das Licht wegen der Gitterreflektionen nicht oder nur in bestimmten Richtungen durch den Film wandern. Mesoskopische Lichtleiter und Laser können realisiert werden.



Vortex-Mischer von Clariant, 1: Düsen, Durchmesser 0,1 bis 1,0 Millimeter, 2: Wirbelkammer, Durchmesser 0,5 Millimeter, Länge 11 Millimeter, 3: Eduktzufuhr, 4: Produktaustritt.

7.6 Mikroreaktoren in der chemischen Verfahrenstechnik

37. Woche *Wolfgang Grünbein • Clariant GmbH, Frankfurt am Main*

Das Wissen aus der Miniaturisierung der Mikroelektronik und die Erfahrungen aus der Chip-Herstellungstechnologie lieferten die Grundlage für die breite anwendungstechnische Umsetzung der Mikrosystemtechnik. Seit den achtziger Jahren werden immer mehr mikroskopische Maschinen eingesetzt – in intelligenteren Automobilen, neuen Geräten für die Medizin, der Brennstoffzellentechnologie und auch als Minireaktoren für chemische Umsetzungen.

Die grundlegende Idee bei der Mikroreaktionstechnik besteht darin, chemische Reaktionen in haarfeinen Mikrokanälen ablaufen zu lassen. Dadurch erreicht man eine sehr präzise Reaktionsführung. Denn die mikrostrukturierten Reaktordimensionen erlauben eine exakte Führung der Gradienten wichtiger Zustandsgrößen der Umsetzungen, wie Temperatur, Druck und Konzentration. Die verbesserte Prozesskontrolle resultiert aus der kontinuierlichen präzisen Führung der Stoffströme und der genauen Einstellung der Verweilzeiten. Durch das günstige Oberflächen-Volumen-Verhältnis sind in den Strömungskanälen die Wärmeübergänge um mehrere Größenordnungen effektiver als in herkömmlichen Reaktoren. Dies ist zum Beispiel bei stark exothermen Reaktionen besonders wichtig.

Zusammen mit der Vergrößerung der Phasengrenzflächen infolge optimierter Vermischung der Rohstoffe führen alle diese Faktoren zu einer optimierten Selektivität. Die auf den Umsatz bezogene Ausbeute einer chemischen Reaktion kann unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten bei effizientem Ressourceneinsatz sicher durchgeführt werden.

Die Kopplung von zielgerichteter Nutzung der Rohstoffe und verminderter Bildung von Nebenprodukten führt häufig zur Einsparung von nachgeschalteten, energieintensiven Reinigungsverfahren.

Mikroreaktoren, Mischer, Separatoren und Wärmetauscher werden als kleine Bauteile in verschiedensten Ausführungen realisiert, in deren Inneren mehrere Dutzend von Mikrokanälen für die parallele Prozessführung gebündelt sind. Kanäle können mit verschiedenen Fertigungstechniken in Metall-, Glas-, Silizium- oder Keramikwerkstoffen hergestellt werden. Die Breite eines solchen Kanals beträgt etwa zwischen 10 und 500 Mikrometern, kann aber für technische Anwendungen bis in den Submillimeterbereich reichen.

Die Anwendung der Mikrotechnologie in der Chemischen Industrie hat das Ziel, neue kontinuierliche Herstellungsverfahren mit verbesserten Produkten zu entwickeln und durch die Auswahl einer geeigneten Anlagenperipherie – wie Förderpumpen, Temperatur- und Druckmessung sowie Analysengeräte – wirtschaftliche Produktionsverfahren zu realisieren. Im Labormaßstab ermöglicht die Anwendung von Mikroreaktoren kombiniert mit automatisiertem Betrieb und Analyse beispielsweise die beschleunigte Entwicklung von neuen Katalysatoren. Oder sie dienen als effizientes Entwicklungsinstrument für metallorganische Umsetzungen, Radikalreaktionen, Durchführung von Nitrierungsreaktionen bis hin zur Herstellung neuer organischer Pigmente.

Voraussetzung für die weitere Umsetzung dieser jungen Technologie in den Produktionsmaßstab ist die Kombination des grundlegenden physikalischen und physikochemischen Verständnisses einer Reaktion mit dem Know-how der chemischen Verfahrens- und Ingenieurtechnik. Damit liefert die Anwendung der Mikroreaktionstechnik in der chemischen Industrie einen wichtigen Beitrag zur Erforschung, Entwicklung und Herstellung neuer innovativer Verkaufsprodukte.

In Mikroreaktoren laufen chemische Reaktionen in haarfeinen Kanälen ab. Grundlegende Kenntnisse zu den ablaufenden chemischen Reaktionen sowie der chemischen Verfahrenstechnik sind notwendig, damit diese Technologie auch zur Produktion von Chemikalien verwendet werden kann.

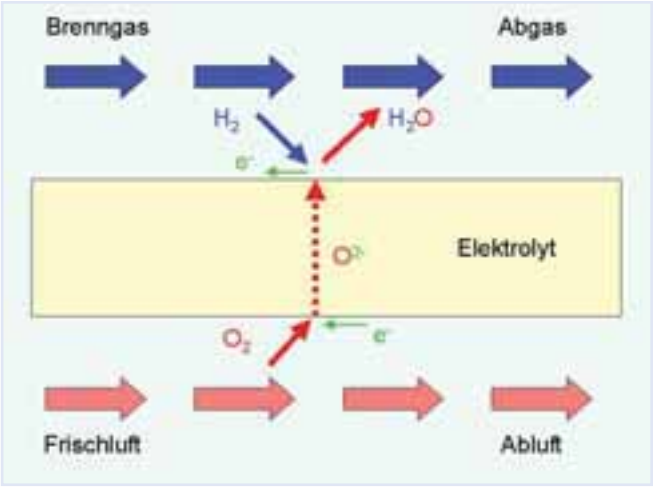
40. Woche

7.7 Die Hochtemperatur-Brennstoffzelle – Vom Funktionsprinzip zum Blockheizkraftwerk

40. Woche *Harald Landes • Siemens AG, Erlangen*

Die Brennstoffzelle wurde zwar schon 1839, also 27 Jahre vor der Dynamomaschine erfunden. Aber erst seit wenigen Jahren nähert sich diese Technik einem Entwicklungsstand, der dem Dynamo in einigen Anwendungsfeldern ernsthaft Konkurrenz machen könnte.

Was einerseits als Vorteil der Brennstoffzelle erscheint die Erzeugung elektrischer Energie direkt aus der Oxidation eines Brenngases ohne Umweg über eine Flamme, eine Gas- oder Dampfturbine und einen Generator – entpuppt sich bei der Realisierung als große Hürde. Die aggressiven chemischen Bedingungen um



Das Prinzip der Brennstoffzelle.

den Verbrennungsvorgang herrschen nämlich in der Brennstoffzelle unweigerlich auch dort, wo elektrischer Strom über korrosionsanfällige Kontakte zwischen unterschiedlichen Materialien fließen muss. Die bei der konventionellen Stromerzeugung über die Zwischenschritte chemisch-thermisch, thermisch-mechanisch und mechanisch-elektrisch stattfindende Energiewandlung ermöglichte offenbar bisher durch die Entkopplung technischer Anforderungen eine wesentlich raschere Lösung der gestellten Aufgabe. Nur High-Tech-Werkstoffe, die dementsprechend teuer sind, halten den Anforderungen des Brennstoffzellen-Betriebes stand. Diese hohen Kosten sind aber mit einem wirtschaftlich konkurrenzfähigen Produkt unvereinbar.

Röhrenförmige keramische Brennstoffzellen für ein Blockheizkraftwerk.

Damit sind schon die typischen Hindernisse charakterisiert, die einer raschen Verbreitung dieser Technik im Wege stehen und an deren Überwindung die Entwickler weltweit arbeiten.

Wie funktioniert eine Brennstoffzelle eigentlich?

Ihr wichtigstes Bauteil ist der so genannte Elektrolyt, ein Material, das elektrischen Strom ausschließlich in Form von Ionen, also geladenen Atomen oder Atomgruppen leitet. Der Elektrolyt trennt in Form einer dünnen, gasdichten Wand zwei flache Kammern. Die eine Kammer wird mit dem Brenngas, wie etwa Wasserstoff, gespült, die andere mit Luft.

Leitet der Elektrolyt zum Beispiel Sauerstoffionen (O^{2-}), so saugt die sauerstoffverzehrende Oxidation des Wasserstoffs den Sauerstoff von der Luftseite durch den Elektrolyten auf die Brenngasseite. Da der Elektrolyt aber eben nur Ionen leitet, wird der Sauerstoff gezwungen, dabei Ladung zu transportieren.

Der Energiebedarf für diesen Ladungstransport wird aus der Verbrennungswärme des Brenngases gedeckt. Deshalb wird bei der elektrochemischen Oxidation wesentlich weniger Wärme frei als bei der gewöhnlichen Verbrennung. Stattdessen wird elektrische Energie an den äußeren Stromkreis abgegeben.

Dabei sind insbesondere Hochtemperatur-Brennstoffzellen-Typen in der Lage, selbst in kleinen Anlagen von circa 100 kW, Wirkungsgrade zu erreichen, die in konventioneller Technik erst bei 30-facher Leistung realisiert werden können. Deshalb sind solche Zellen für die dezentrale Stromerzeugung interessant.

Bis heute wurde nur die prinzipielle Funktionsfähigkeit der Brennstoffzelle in verschiedenen technischen Anwendungen gezeigt. Es kommt nun darauf an, sowohl ein technisch zuverlässiges, als auch wirtschaftlich konkurrenzfähiges Produkt zur umweltfreundlichen Stromerzeugung zu entwickeln. Dazu muss ein breites Spektrum von Disziplinen beherrscht werden. Im Fall der keramischen Hochtemperatur-Brennstoffzelle sind das:

- elektronische und ionische Leitungsvorgänge in Metallen, oxidischen Keramiken und ihren Kontakten unter Betriebsbedingungen
- Thermodynamik der Brenngase und Zellmaterialien
- Gasdiffusion und Strömung in porösen Strukturen
- Elektrokatalyse an Elektrodenmaterialien
- Katalyse und Verfahrenstechnik der Brenngasaufbereitung/Wasserstofferzeugung
- Strömungsmechanik der Gase über den Elektroden, in den Gasverteilungskanälen und Zuleitungen
- Zelldesign und Erkennung kritischer Betriebszustände durch Computersimulation von Gasfluss-, Wärmefluss- und Stromflussverteilungen
- Chemische Wechselwirkung der Zellmaterialien und der Reaktionsgase im Dauerbetrieb („Alterungsverhalten“)
- Bruchfestigkeit der Zellen bei Beanspruchung durch Wärmedehnungseffekte (verursacht durch Temperaturunterschiede im Betrieb und beim Aufheizen und Abkühlen der Zellen)
- Herstellung metallischer und keramischer Ausgangsmaterialien und deren Formgebung
- Beschichtungstechnik zur Herstellung der dünnwandigen Zellstrukturen
- Maschinenbau

Deshalb arbeiten in einem Brennstoffzellen-Entwicklungsteam Physiker, Chemiker, Werkstoffwissenschaftler, Verfahrenstechniker, Fertigungstechniker, Maschinenbauer und Elektrotechniker eng zusammen. Um eine marktgerechte Lösung zu finden, bedarf es frühzeitig der Einbindung des Marketings und potentieller Kunden.

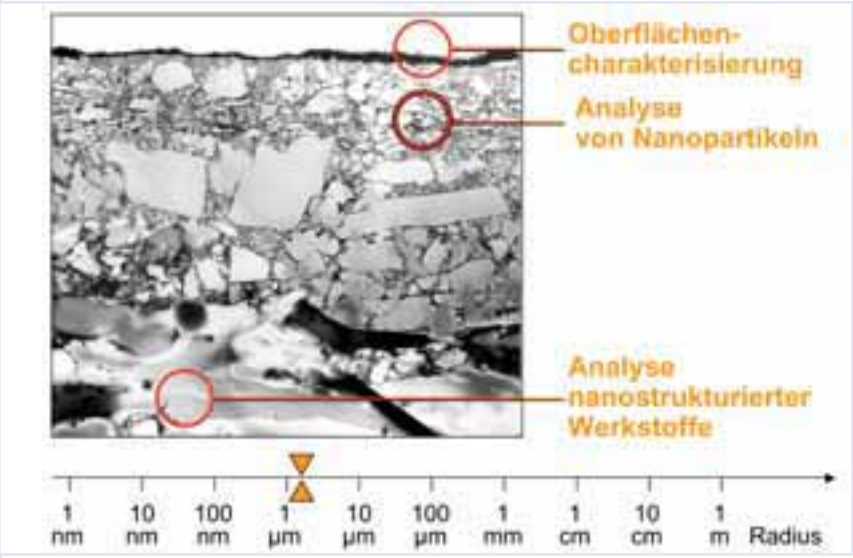
7.8 „Begegnung mit den Nanoteilchen“

45. Woche

45. Woche *Lars Börger und Rüdiger Iden • BASF Aktiengesellschaft, Ludwigshafen*

Es gibt derzeit kaum ein Thema aus dem Bereich der Naturwissenschaften im Allgemeinen und der Chemie im Speziellen, dem soviel Aufmerksamkeit geschenkt wird wie der Nanotechnologie. Und immer häufiger werden auch Nicht-Fachleute mit Bildern und Informationen unter der Überschrift „nano“ konfrontiert.

In diesem Beitrag wollen wir uns der Frage widmen, woher wir eigentlich wissen, wie es in der Nanowelt aussieht. Dazu stellen wir eine kleine Auswahl der Methoden dar, mit denen Physikochemiker in den Bereich der Nanowelt vordringen – und beantworten, wie es also zu Begegnungen mit den Nanoteilchen kommt.

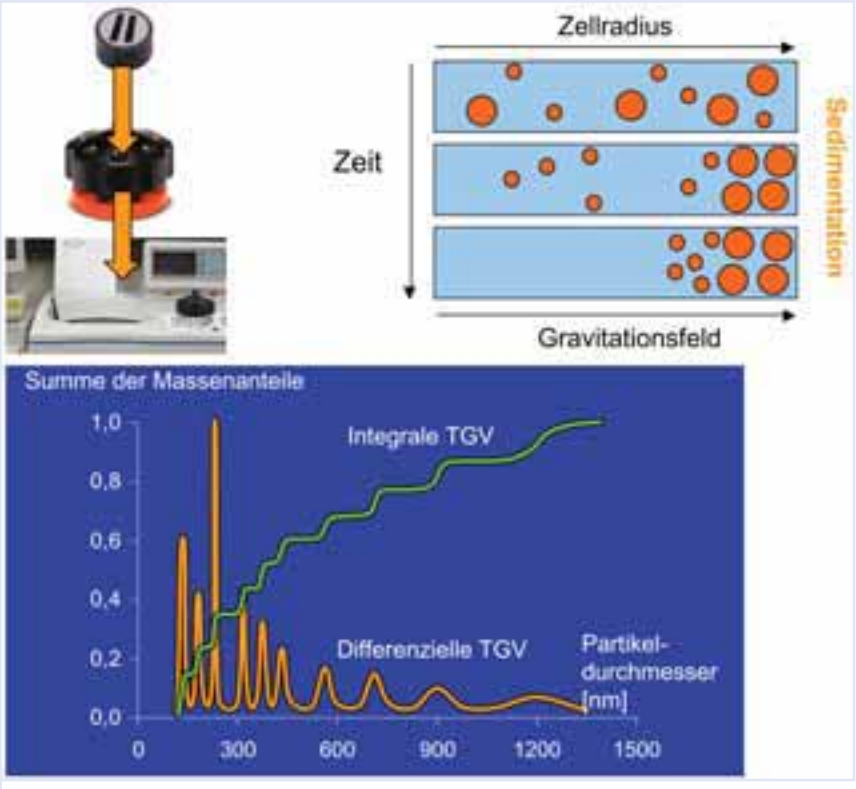


Elektronenmikroskopische Querschnittsaufnahme eines kontrastierten Ultradünnschnitts von gestrichenem Papier.

Auch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) sieht im Fortschritt der Nanoanalytik die entscheidende Triebfeder zum Fortschritt der Nanotechnologie. Es stellt sich heraus, dass Nanotechnologie nicht unbedingt mit futuristischen Maschinen und Materialien zu tun hat. Vielen bereits vertrauten Funktionalitäten und Wirkungen „alltäglicher“ Materialien liegen Effekte zu Grunde, die auf Selbstorganisation und Strukturierung im Bereich der Nanometerskala basieren. Ein Beispiel hierfür kennen wir aus dem täglichen Leben: Papier.

Denn laut Definition zeichnen sich nanotechnologische Materialien dadurch aus, dass sie in mindestens einer Dimension zwischen 1 und 100 Nanometer messen. Dementsprechend enthält ein so „alltägliches“ Material wie Papier alle drei denkbaren Nanomaterial-Klassen:

- Oberflächen, die nur in einer Dimension das Kriterium erfüllen
- Partikuläre Strukturen, die in allen drei Dimensionen das genannte Kriterium erfüllen
- Faserartige Strukturen, die in zwei Dimensionen zwischen 1 und 100 Nanometern liegen.



Analytische Ultrazentrifugation: In der Abbildung ist die Partikelgrößenverteilung einer Mischung aus zehn unterschiedlich großen Polymerlatexmaterialien gezeigt. Die Partikeldurchmesser liegen zwischen 70 Nanometern und 1,2 Mikrometern. 70 Nanometer sind dabei noch lange nicht die untere Grenze zugänglicher Partikelgrößen: Mit dieser Methode wurden bereits Platin-Cluster mit Durchmessern unter 1 Nanometer hochaufgelöst gemessen. Das entspricht Partikeln, die lediglich etwa 20 Atome enthalten.

Für all diese Varianten gibt es nanoanalytische Methoden der Charakterisierung. Eine interessante und zudem wenig bekannte Methode ist die analytische Ultrazentri-

fugation (AUZ). Bereits der Erfinder der Methode Theodor Svedberg (Nobelpreis für Chemie 1926) untersuchte in seinen ersten Messungen mit der AUZ Gold-Nanopartikeln.

Wir in der BASF benutzen diese fraktionierende Methode, um genaueste Informationen über Partikelgrößen im Durchmesserbereich zwischen kleiner 1 Nanometer und größer 1 Mikrometer zu erhalten. Das Prinzip der AUZ beruht darauf, dass durch schnelle Drehung des analytischen Titan-Rotors um eine feste Achse hohe Gravitationsfelder erzeugt werden. Die Messzellen im Rotor, welche nur 0,3 Milliliter Probe beinhalten, werden bis zu 60.000 Umdrehungen pro Minute beschleunigt. Das entspricht Gravitationsfeldern von bis zum 400.000fachen der Erdanziehung – eine Probe von normalerweise einem Gramm wiegt dann 400 Kilogramm. Während des Schleuderns wird die Sedimentation der Probe, also das Absetzen feinverteilter (dispergierter) Nanopartikel im Lösemittel, mittels optischer Detektoren beobachtet. Daraus lassen sich dann Eigenschaften der dispergierten Probe, wie die Partikelgrößenverteilungen und Partikeldichten, berechnen.

Mit nanoanalytischen Methoden wie der analytischen Ultrazentrifugation werden die entscheidenden Fortschritte bei der Entwicklung der chemischen Nanotechnologie bereits heute erzielt – und das nicht nur in neuen Anwendungen und Materialien, sondern auch in Systemen, die uns gut bekannt erschienen.

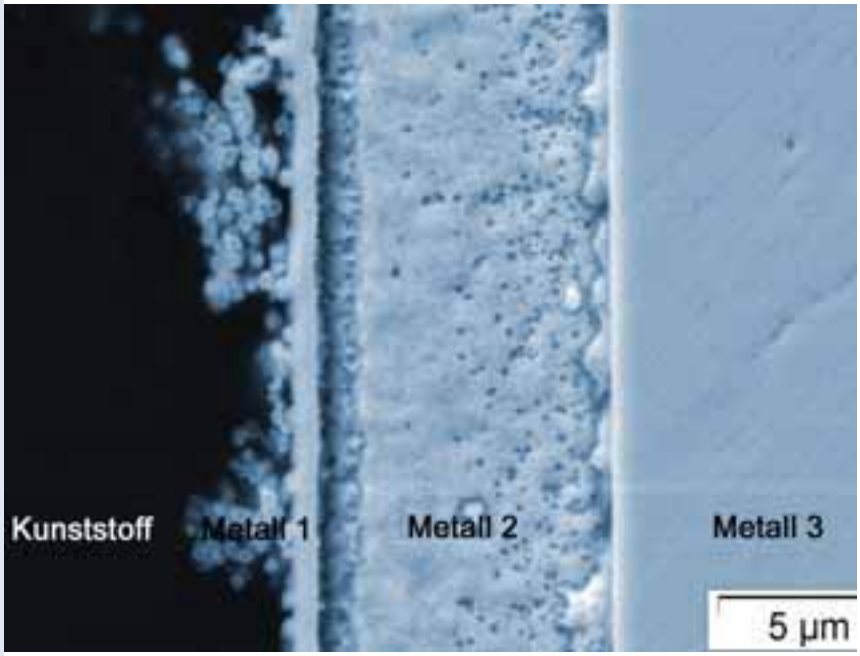
7.9 Physik und Chemie an Grenzflächen – Oberflächliches tiefgehend betrachten

48. Woche *Daniel Rudhardt und Christoph Schild • Bayer Technology Services GmbH, Leverkusen*

Viele Phänomene des Alltags werden durch Oberflächen und Grenzflächen bestimmt. Innere Grenzflächen entstehen zwischen nicht miteinander mischbaren Phasen, während Oberflächen die äußere Grenzfläche eines Materials darstellen. Die Fettaugen auf der Suppe oder der Schaum im Bierglas sind nur zwei Beispiele für Systeme mit inneren Grenzflächen. Systeme, bei denen die Oberfläche eine wichtige Rolle spielt, sind zum Beispiel poröse Körper. Poröse Materialien sind in der Lage, Flüssigkeiten oder Gase in großer Menge aufzunehmen und werden deshalb in Waschmitteln als Enthärter oder in Katalysatoren als Trägermaterialien eingesetzt.

Um den Einfluss von Grenzflächen auf die Materialeigenschaften steuern zu können, ist es erforderlich, die relevanten chemischen und physikalischen Vorgänge genau zu verstehen. In der chemisch-pharmazeutischen Industrie gibt es eine Vielzahl von Beispielen für solche „grenzflächenbestimmten“ Produkte. Die Physik und Chemie der Grenzflächen bestimmen beispielsweise darüber, ob ein Lack auf dem Auto haftet, ob eine Dispersionsfarbe streichfähig ist und einen glatten Film bildet oder wie schnell der Wirkstoff eines Arzneimittels freigesetzt wird.

Die Beschichtung von Kunststoffen mit Metallen ist ein Beispiel für einen Prozess, in dem Oberflächeneigenschaften gezielt manipuliert werden. Kunststoff-



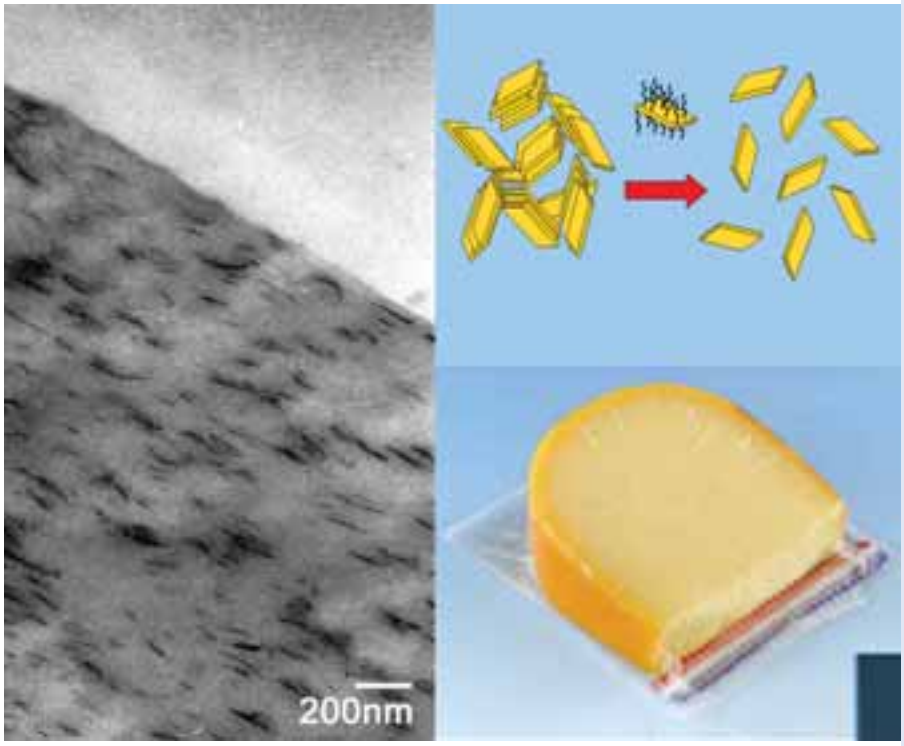
Elektronenmikroskopische Aufnahme eines Schnitts durch einen Kunststoff (schwarz), der mit verschiedenen Metallschichten beschichtet ist. Die direkt auf dem Kunststoff aufgebrachte Schicht dringt in die Oberflächenporen des Kunststoffes ein und sorgt somit für eine mechanische Haftvermittlung.

oberflächen werden im Allgemeinen von Metallen nur schlecht benetzt, was das Aufbringen eines gut haftenden Metallfilms erschwert. Durch intelligente Oberflächenbehandlungen kann die Benetzbarkeit jedoch erhöht werden. Weiter kann die Haftung eines Metallfilms verbessert werden, indem die Kunststoffoberfläche vor der Beschichtung aufgeraut wird. In die entstandenen Poren dringt der Metallfilm ein und kann ganz ähnlich wie beim „Druckknopf-Prinzip“ einrasten. Erst diese aufwendigen Schritte ermöglichen die Herstellung von dauerhaften Metallbeschichtungen, wie sie zum Beispiel auf Duschköpfen zu finden sind.

Ein Beispiel für ein Produkt, in dem Grenzflächen sowohl bei der Herstellung, als auch der Verarbeitung und in der Anwendung eine wichtige Rolle spielen, sind wässrige Polymerdispersionen. Diese werden unter anderem als filmbildende Komponente in umweltfreundlichen lösemittelfreien Lacken eingesetzt.

Während der Herstellung und Lagerung solcher Dispersionen sorgen abstoßende Kräfte zwischen den Dispersionsteilchen, die durch chemische Modifizierung der Partikeloberflächen eingestellt werden können, für eine stabile Dispersion. Während der Aufbringung des Lackes spielen die Oberflächeneigenschaften der Teilchen wieder eine entscheidende Rolle. So ist die Partikelgröße, die von der elektrischen Ladung der Oberfläche beeinflusst wird, entscheidend für die Filmbildung. Bei der Anwendung des Lackfilms, etwa als Korrosionsschutz, wird durch die Grenzflächeneigenschaften bestimmt, wie groß die Adhäsionskraft zwischen Lack und Substrat ist und ob eine dauerhafte Beschichtung realisiert werden kann. Durch so genannte Haftvermittler, die in die Grenzfläche eingebracht werden und die für zusätzliche chemische Bindungen zwischen Lack und Substrat sorgen, können diese Kräfte weiter erhöht werden.

Arbeitet man Nanoteilchen in eine Polymermatrix ein, so kann man auch hierdurch die Materialeigenschaften des Polymers ändern. Die Kunst besteht darin, diese Teilchen feinverteilt in das Polymer zu bringen, was ebenfalls durch chemische Modifikation der Oberfläche geschieht. Solche Polymer-Nanokomposite können verwendet werden, um die Gasdurchlässigkeit von Folien zu verringern, da Gasmoleküle die Grenzfläche zwi-



Elektronenmikroskopische Aufnahme von Schichtsilikaten in einer Kunststofffolie (links). Diese wirken nur dann als Gasbarriere, wenn sie einzeln dispers in den Kunststoff eingearbeitet werden können (oben rechts). Durch chemische Modifikation der Oberflächen können dispergierbare „Organoclays“ hergestellt werden, die zum Beispiel in Verpackungsfolien für Lebensmittel eingesetzt werden (unten rechts).

schen Nanoteilchen und Polymer nicht durchdringen können. Bringt man zum Beispiel nur wenige Nanometer dicke mineralische Plättchen in eine Kunststofffolie ein, so müssen die Gasmoleküle beim Diffundieren durch das Polymer einen Umweg durch das aus den Plättchen gebildete Labyrinth nehmen. Dieser Mechanismus ist äußerst effektiv und hält zum Beispiel die Aromen im und die Umgebungsluft fern vom Käse.

Diese Beispiele zeigen, wie es gelingt, chemische und physikalische Vorgänge an Grenzflächen zu verstehen und diese zu nutzen, um innovative Materialen mit definierten Eigenschaften zu entwickeln.

Anhang

Deutsche
Forschungsgemeinschaft

DFG

A. 1 Warum Bunsen-Gesellschaft?

27. Woche *Heinz Behret* • *Deutsche Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie (DBG), Frankfurt am Main*

Warum Bunsen-Gesellschaft? Darauf gibt es viele, ganz unterschiedliche Antworten:

Weil die Bunsen-Gesellschaft im Jahr 2003 – dem Jahr der Chemie – so eine spannende Wochenschau macht! Da gab es jede Woche etwas Neues, Spannendes aus dem Bereich der Chemie: Aktuelles aus Wissenschaft, aus Industrie und Hochschule, aus den Forschungsgebieten der Physikalischen Chemie.

Weil die „Jungen“ mitmachen!

Die Bunsen-Gesellschaft unterstützt Schüler und Studenten bereits vor und im Studium mit Rat und Tat – nicht zuletzt mit Tagungszuschüssen. Der erste Auftritt von jungen physikalisch-chemisch orientierten Wissenschaftlern wird in vielfacher Weise gefördert: Bei der Bunsentagung mit einem Vortrag, bei der internationalen Bunsen-Diskussionstagung mit einem englischen Vortrag – auch hier zunächst im „Heimspiel“.

Diese erste Präsentation eigener Arbeitsergebnisse ist für die Entwicklung eines Forschers wichtig, unabhängig davon, ob später eine akademische Laufbahn oder die Industrie-Karriere, die Arbeit in einer Behörde oder bei einer Fachinstitution angestrebt wird. Bei der Bunsen-Gesellschaft werden die „Jungen“ an die Hand genommen, und – wie sollte es anders sein fürs Berufsleben – dann auch kritisch geprüft. Jedoch: Herausragende Leistungen werden ausgezeichnet.

Weil „man“ gleichrangig mitredet!

Die Bunsen-Gesellschaft, wenn auch (zahlenmäßig) „kleinste“ der drei wissenschaftlichen Chemie-Gesellschaften (Dechema, GDCh, DBG), so gibt sie doch aus ihrem Fachgebiet heraus entsprechend Rat und Tat und trägt mit Expertise und Sachverstand bei zur Gesamtchemie. Die Bunsen-Gesellschaft ist gefragt, so zum Beispiel bei der Reform des Chemie-Studiums und des Schulunterrichts. Getreu dem Motto „getrennt marschieren, aber gemeinsam handeln“ gibt die Bunsen-Gesellschaft der Wissenschaft die größtmögliche Unterstützung.

Weil eine kleinere Gesellschaft manches besser kann!

Es kommt natürlich auf die Fragestellung an – oder auf das Gebiet. In der physikalischen Chemie sind effektives Arbeiten und Erfolge in der Gemeinsamkeit einer kleinen Gesellschaft leichter zu erreichen, nicht zuletzt durch den persönlichen Kontakt der Mitglieder untereinander. Ein Subsidiaritätsprinzip hat wenig mit „subaltern“ zu tun.

Weil der wissenschaftliche Nachwuchs gefördert wird!

Einzelne Stipendien zu internationalen Bunsen-Diskussionstagungen und Bunsen-Kolloquien und ganz besonders Stipendien für 100 junge Diplomanden und Doktoranden zur Bunsentagung und zusätzlich freie Teilnahme bilden einen nicht unbedeutenden Anreiz.

Durch die persönliche Aktivität einzelner Bunsen-Mitglieder wird das naturwissenschaftliche Interesse bereits in Schulen geweckt und gefördert.

Weil Chemie „Natur“ und „Produkt“ ist!

Der erste Vorsitzende der Bunsen-Gesellschaft für die Jahre 2003/2004, Klaus Funke, schrieb im Bunsen-Magazin Heft 3/2003:
... *„Fragen wie 'Was kann die Chemie mir geben?' und 'Warum ist Chemie wichtig für mich?' lassen die Universalität der Wissenschaft Chemie nicht erkennen. Sie lassen den Blick auf das Ganze vermissen, der deutlich macht, dass die Chemie weit über das Leben der Menschen hinausreicht. Die genannten Fragen sind ausgesprochen anthropozentrisch. Die Chemie hat diese Eigenschaft natürlich nicht. Menschen ohne Chemie gibt es nicht, aber Chemie ohne Menschen hat es Milliarden Jahre gegeben."*...

49. Woche

Weil es das Bunsen-Magazin gibt!

Alle Mitglieder erhalten das Magazin, mit Beiträgen, die für den naturwissenschaftlich Interessierten ausgewählte Texte aus vielen Bereichen der physikalischen Chemie enthalten.

Weil es die Bunsentagungen gibt!

Jährlich mehr als 700 Teilnehmer, zum Teil mehr als 1000 Teilnehmer an den Bunsentagungen – und das an einem Feiertag wie Christi Himmelfahrt – können nicht irren.

Weil die Bunsen-Gesellschaft etwas für die Allgemeinheit tut, also für unsere gesamte Gesellschaft.

Die Bunsen-Gesellschaft übernimmt als eingetragener Verein wichtige Funktionen, die letztlich „der Staat“ den Bürgern bringen sollte, aber der Bunsen-Gesellschaft als gemeinnützigem Verein übertragen hat.

Weil Bunsen-Gesellschaft Spaß macht!

Oder mit anderen Worten: Mitglieder sehen in der Tätigkeit und Wirkung der Bunsen-Gesellschaft eine stark emotionale Komponente. Erfolge wie hohe Teilnehmerzahlen bei den Tagungen oder Anerkennung durch Publikationen und Publikationsmedien der Bunsen-Gesellschaft sind die Grundlage für eine persönliche positive Haltung. Anerkennung nicht nur persönlich, sondern beispielsweise auch für die jeweilige Arbeitsgruppe. Und nicht zuletzt erwachsen aus Gesprächskontakten über Jahre hinweg, etwa bei den Bunsentagungen, persönliche Freundschaften.

A. 2 DFG-Forschungsförderung im Jahr der Chemie

49. Woche *Karl-Heinz Schmidt • Deutsche Forschungsgemeinschaft, Bonn*

In Deutschland werden zurzeit circa 50 Milliarden US-Dollar pro Jahr für Forschung und Entwicklung (F&E) ausgegeben, davon zwei Drittel von der Wirtschaft. Der Anteil der F&E-Aufwendungen am deutschen Bruttoinlandsprodukt (BIP) beträgt 2,5 Prozent. Er liegt damit niedriger als in Japan (3,0 Prozent) und in den USA (2,7 Prozent). Die politische Absichtserklärung der Europäischen Union, bis 2010 den Forschungsanteil des BIP von durchschnittlich 1,9 Prozent in allen Mitgliedsländern auf 3 Prozent anzuheben, ist weit von den finanziellen Realitäten entfernt.

Traditionell bilden die 92 Universitäten und Technischen Hochschulen das Rückgrat des deutschen Forschungssystems. An 56 davon kann man zurzeit Chemie

mit Diplom- oder Master-Abschluss studieren. Obwohl die Zahl der Studienanfänger und die Gesamtzahl der Studierenden im Fach Chemie seit einem Tiefstand im Jahre 1995 erfreulicherweise wieder stetig ansteigt, hat sich die Anzahl der Chemie-Doktoranden, die einen erheblichen Teil universitärer Forschung tragen, zum sechsten Mal in Folge verringert. 2002 wurden nur noch 1.505 Promotionen gemeldet. Diese Zahl wird in den nächsten Jahren weiter zurückgehen. Für 2006 wird eine Halbierung auf 750 vorhergesagt. Ein Wiederanstieg der Promotionen wird frühestens ab 2007/2008 erwartet.

Die laufenden Ausgaben der deutschen Hochschulen betragen pro Jahr circa 24 Milliarden Euro. Für die Grundfinanzierung sind die jeweiligen Bundesländer zuständig, die durchschnittlich 49 Prozent aller Ausgaben tragen. 39 Prozent der Ausgaben werden durch Verwaltungseinnahmen gedeckt, 12 Prozent stammen aus so genannten Drittmitteln, die zusätzlich zum regulären Hochschulhaushalt von „dritter Seite“, also von privaten und öffentlichen Geldgebern eingeworben werden.

Der größte Drittmittelgeber der deutschen Hochschulen ist die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), die zur Erfüllung ihrer Aufgaben vom Bund und den 16 Bundesländern zurzeit 1,3 Milliarden Euro erhält. Die DFG fördert jährlich 25.000 Forschungsvorhaben aus allen Wissenschaftsgebieten in verschiedenen Förderverfahren. Die Spannweite reicht von Forschungsprojekten einzelner Wissenschaftler über nationale Schwerpunktprogramme bis zu großen interdisziplinären Forschungszentren. 88,6 Prozent der Fördermittel der DFG fließen in die Universitäten und 11,4 Prozent in außeruniversitäre Einrichtungen.

Für chemische Forschungsprojekte hat die DFG im letzten Jahr insgesamt 85,2 Millionen Euro ausgegeben. Das sind 7 Prozent des gesamten Förderetats der DFG. (Zum Vergleich: Für die Physik wurden 118,9 Millionen Euro aufgewendet (9 Prozent) und für die Biologie (einschließlich Biochemie) 185,7 Millionen Euro (14 Prozent)). In der Chemie spielt die Förderung individueller Forschungsprojekte (Normalverfahren) eine überproportionale Rolle. Für dieses Förderverfahren beträgt der Anteil am Gesamtfördertopf Chemie 43 Prozent. Das sind 10 Prozent mehr als die durchschnittliche Inanspruchnahme des Normalverfahrens über alle Fächer. Die kooperativen Programme scheinen hingegen bei Chemikern weniger beliebt zu sein (48 Prozent der Gesamtförderung Chemie und somit 6 Prozent weniger als der Durchschnitt).

Nach einem 2003 von der DFG durchgeführten Förderranking weist die TH Aachen das höchste Bewilligungsvolumen über alle Wissenschaftsbereiche auf (119 Millionen Euro), dicht gefolgt von den beiden Münchner Universitäten (117 bzw. 116 Millionen Euro). Die zehn Universitäten mit den höchsten Bewilligungsbeträgen vereinigen insgesamt fast ein Drittel des insgesamt von der DFG bewilligten Mittelvolumens. Die Spitzenreiter der DFG-Forschungsförderung in der Chemie sind die TU München und die Universitäten Karlsruhe und Heidelberg.

A. 3 Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh)

Renate Hoer • Gesellschaft Deutscher Chemiker, Frankfurt am Main

Wissenschaftler schließen sich seit Generationen in wissenschaftlichen Gesellschaften zusammen, um in diesen Netzwerken ihre Arbeiten vorstellen und diskutieren zu können und um sich Anregungen von Kollegen zu holen. Das trägt ganz wesentlich zum Fortschritt und zur Förderung der Wissenschaften bei und dient zur Verbreitung des Wissens – auch international und in die breite Öffentlichkeit hinein. Wissenschaftliche Gesellschaften wie die GDCh haben sich die Förderung der Wissenschaft und die Verbreitung des Wissens zum Ziel gesetzt. Die GDCh mit ihren mehr als 26.000 Mitgliedern arbeitet in vielfältiger Weise sehr erfolgreich auf diesem Gebiet. Sie vereint die den chemischen und molekularen Wissenschaften verbundenen Menschen und unterstützt sie in ihrem verantwortungsvollen und nachhaltigen Tun zum Wohle der Allgemeinheit und unseres Lebensraums.

Das wissenschaftliche Netzwerk

Die Diskussion neuer Erkenntnisse in der Chemie und den molekularen Wissenschaften dient der Qualität und Verlässlichkeit der wissenschaftlichen Aussagen. Nationale und internationale Tagungen und Kongresse, wie von der GDCh organisiert, sind dafür die Plattform ebenso wie die deutsch- und englischsprachigen von der GDCh herausgegeben Zeitschriften von höchstem internationalem Renommee. Das Netzwerk GDCh verknüpft sich so mit anderen nationalen Netzwerken. Mit anderen Gesellschaften findet auch auf Managementebene ein reger Gedankenaustausch statt.

Das Netzwerk GDCh besteht aus 62 regionalen Netzen, den GDCh-Ortsverbänden, und 24 disziplin-fokussierten Netzen, den Fachgruppen, in denen sich ganz wesentlich die wissenschaftliche Arbeit abspielt. Ob Analytische oder Medizinische Chemie, Bau-, Bio- oder Umweltchemie – hier werden zukunftsträchtige Arbeitsfelder vorangetrieben.

Engagement für die Bildung

Das breite Informationsangebot in der GDCh und ihren Fachgruppen wird ergänzt durch ein umfassendes Fortbildungsprogramm, durch das sich der Chemiker in Theorie und Praxis neueste Methoden und Verfahren aneignen kann, die er im Studium (noch) nicht erlernen konnte. Wohl einmalig in seiner Art ist das Fortbildungsangebot für Chemielehrer; denn Schülern muss ein moderner, ein ideenreicher und spannender Chemieunterricht geboten werden.

So wie sich die GDCh für einen zeitgemäßen naturwissenschaftlichen Unterricht einsetzt, so engagiert sie sich auch in Bildungsfragen im Hochschulbereich. Die Neuorientierung im Rahmen eines gesamteuropäischen Bildungssystems wird von den Mitgliedern der GDCh mit großem Sachverstand begleitet. Die Ausbildung muss sich an den wissenschaftlichen Bedürfnissen, den aktuellen Forschungsrichtungen und den Anforderungen des Arbeitsmarkts ausrichten. Die GDCh bietet Studierenden Hilfe und Orientierung, durch den GDCh-Karriereservice auch und gerade nach Studienabschluss bei ihrem Eintritt ins Berufsleben.

Stellungnahmen und Auszeichnungen

Die GDCh wirkt nach außen und nach innen. In ihrer Öffentlichkeitsarbeit bezieht sie politisch Stellung zu neuen Vorhaben in der Bildungs-, Forschungs-, Industrie- und Umweltpolitik und unterhält intensive Kontakte zu den Medien. Sie bewertet wissenschaftliche Leistungen durch Vergabe bedeutender Auszeichnungen. Sie fördert die wissenschaftliche Elite, insbesondere bei den Nachwuchswissenschaftlern, durch Preise und Stipendien. In den Entscheidungsgremien der GDCh, vom Präsidium bis zu Fortbildungs- und Preisvergabekommissionen, sitzen die angesehensten Chemiker Deutschlands. Mehr Informationen sowie Anträge auf Mitgliedschaft unter www.gdch.de

A. 4 Impulse geben, Wissen stiften – auch in der Chemie

Christian Jung • VolkswagenStiftung, Hannover

Die VolkswagenStiftung leistete von Beginn an – sie nahm ihre Arbeit 1962 auf – entscheidende Beiträge für die physikalisch-chemische Grundlagenforschung. Sie hat sich auch in diesem Wissensgebiet mit großer Aufmerksamkeit immer wieder neuen Forschungsgebieten zugewandt und diese dann in rascher Entscheidungsfreude so effektiv gefördert, dass in vielen Fällen Spitzenleistungen entstanden sind. Die folgende Übersicht zeigt, auf welchen Feldern der physikalisch-chemischen Grundlagenforschung sich die Stiftung engagiert hat:

- Theoretische Chemie (1964 – 1973)
- Physik und Chemie unkonventioneller Materialien (1978 – 1984)
- Mikrostrukturwissenschaft (1980 – 1987)
- Synergetik (1980 – 1990)
- Mikrocharakterisierung von Werkstoffen und Bauelementen (1985 – 1997)
- Metallorganische Reaktionen für die organische Synthese (1985 – 1993)
- Photonik (1989 – 1999)
- Intra- und intermolekulare Elektronenübertragung (1993 – 2001)
- Physik, Chemie und Biologie mit Einzelmolekülen (1997 – 2002)
- Konformationelle Kontrolle biomolekularer Funktion (seit 1998)

Seit dem 1. Januar 2003 wird die Förderinitiative „Konformationelle Kontrolle biomolekularer Funktionen“ in modifizierter Form unter dem Titel „Zusammenspiel von molekularen Konformationen und biologischer Funktion“ weitergeführt. Eckpunkte des neuen Zuschnitts sind:

1. Der Schwerpunkt soll zu interdisziplinärer Forschung an der Schnittstelle zwischen Chemie und Biowissenschaften anregen.
2. Ziel ist die Analyse, Modulation und Kontrolle multipler Konformationszustände in biologischen Systemen.
3. Der Kombination von Synthesechemie, Strukturanalyse und Funktionsstudien wird hohe Priorität eingeräumt. Die Beteiligung der synthetischen Chemie ist dabei obligatorisch.

Natürlich können Vorhaben aus der Chemie auch in anderen Förderinitiativen der Stiftung zum Tragen kommen – etwa bei den „Lichtenberg-Professuren“, dem „Tandem-Programm zur Förderung der fachübergreifenden Zusammenarbeit von Postdoktoranden“ oder der Initiative „Komplexe Materialien: Verbundprojekte der Natur-, Ingenieur- und Biowissenschaften“. Das aktuelle Förderangebot ist

zu finden auf der Website der Stiftung unter www.volkswagenstiftung.de.
An dieser Stelle ein Wort zur Volkswagen-Stiftung. Die VolkswagenStiftung ist eine gemeinnützige Stiftung privaten Rechts und fördert Wissenschaft und Technik in Forschung und Lehre; die Geistes- und Gesellschaftswissenschaften ebenso wie die Natur- und Ingenieurwissenschaften und die Medizin. Sie ermöglicht Forschungsvorhaben in zukunftsträchtigen Gebieten und hilft wissenschaftlichen Institutionen bei der Verbesserung der strukturellen Voraussetzungen für ihre Arbeit. Besondere Aufmerksamkeit widmet die Stiftung der Zusammenarbeit von Forschern über disziplinäre und staatliche Grenzen hinweg sowie dem wissenschaftlichen Nachwuchs – sie vergibt allerdings keine Stipendien und fördert allgemein auch keine Diplom- und Promotionsvorhaben. Die Stiftung verfügt derzeit über ein Kapital von rund 2,1 Milliarden Euro, das sie so ertragreich und nachhaltig wie möglich anlegt. Sie ist wirtschaftlich autark und in ihren Entscheidungen autonom. In den 42 Jahren ihres Bestehens hat sie gut drei Milliarden Euro für rund 27.500 Projekte bewilligt; pro Jahr stellt sie rund 100 Millionen Euro für neue Vorhaben bereit. Das aktuelle Förderangebot und die in den einzelnen Förderinitiativen bewilligten Vorhaben sind zu finden im jetzt erschienenen Jahresbericht 2003 – und eben unter www.volkswagenstiftung.de.

A. 5 Fonds der Chemischen Industrie

Gerd Romanowski • Fonds der Chemischen Industrie, Frankfurt am Main

Der Fonds der Chemischen Industrie ist das Förderwerk des Verbandes der Chemischen Industrie e.V. zur Unterstützung von Grundlagenforschung, wissenschaftlichem Nachwuchs und Chemieunterricht an Schulen. Er führt eine Vielzahl von sich ergänzenden und aufeinander abgestimmten Fördermaßnahmen durch, von denen die wichtigsten hier genannt werden:

- Vergabe von Stipendien an hervorragende Doktoranden, Habilitanden und Nachwuchsdozenten
- leistungsorientierte Vergabe von Forschungsmitteln für Spitzen- und Nachwuchswissenschaftler an Hochschulen und Forschungseinrichtungen in Deutschland
- Entwicklung und Bereitstellung von chemiebezogenen Unterrichtsmaterialien wie z.B. Informationsserien, CD-ROMs, Experimentierkits für Schulen, Hochschulen und weitere interessierte gesellschaftliche Gruppen
- Unterrichtsförderung für Schulen zur Verbesserung des experimentellen Chemieunterrichts
- Durchführung wissenschaftlicher Veranstaltungen zur Förderung der Zusammenarbeit von Wissenschaft und Industrie in Schwerpunktbereichen
- Vergabe von Preisen und Auszeichnungen an Wissenschaftler, Lehrer, Lehrbuchautoren und Schüler
- gezielte Förderung von Projekten mit Modellcharakter zur Unterstützung forschungs- und bildungspolitischer Ziel der chemischen Industrie

Mehr Informationen unter
http://www.vci.de/fonds

Anschriften

Deutsche Bunsen-Gesellschaft
für Physikalische Chemie e.V.
Varrentrappstr. 40 - 42
60486 Frankfurt
Telefon: 069/7917-201
Fax: 069/7917-200
E-Mail: h.behret@bunsen.de
http://www.bunsen.de

Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V.
Postfach 90 04 40
60444 Frankfurt am Main
Telefon: 069 / 7917-0
E-Mail: gdch@gdch.de
http://www.gdch.de

Deutsche Forschungsgemeinschaft

Deutsche Forschungsgemeinschaft
Kennedyallee 40
53175 Bonn
Telefon: 0228/885-1
Fax: 0228/885-2777
E-Mail: postmaster@dfg.de
http://www.dfg.de

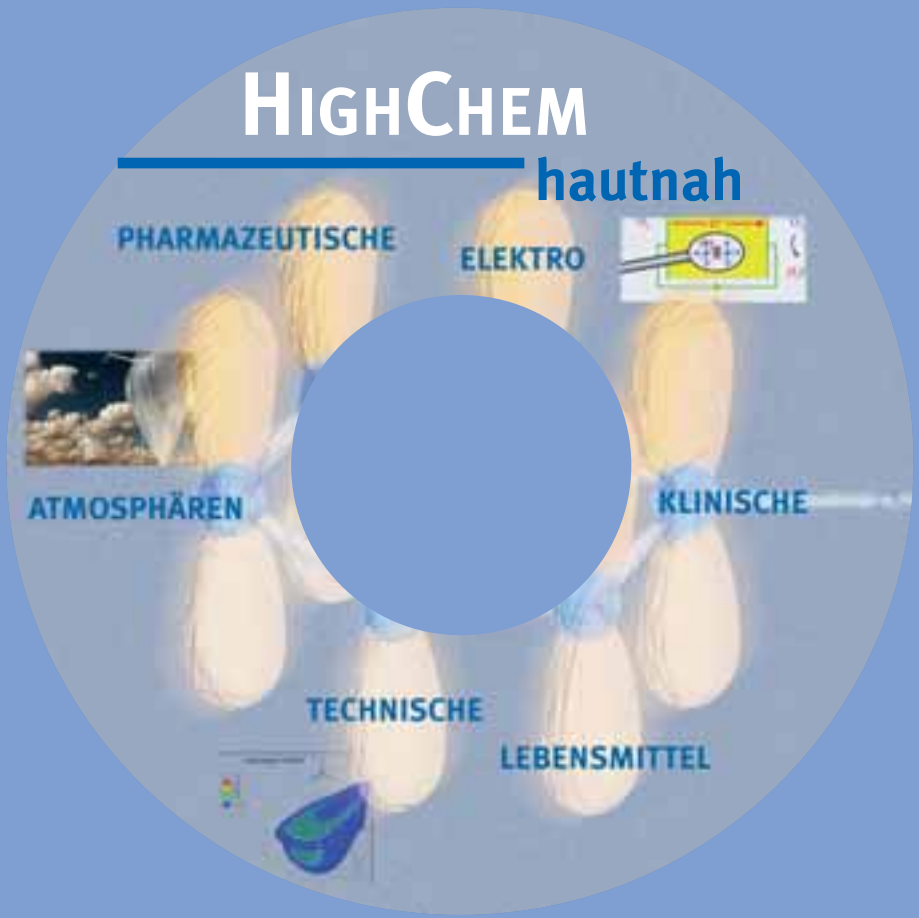
VolkswagenStiftung

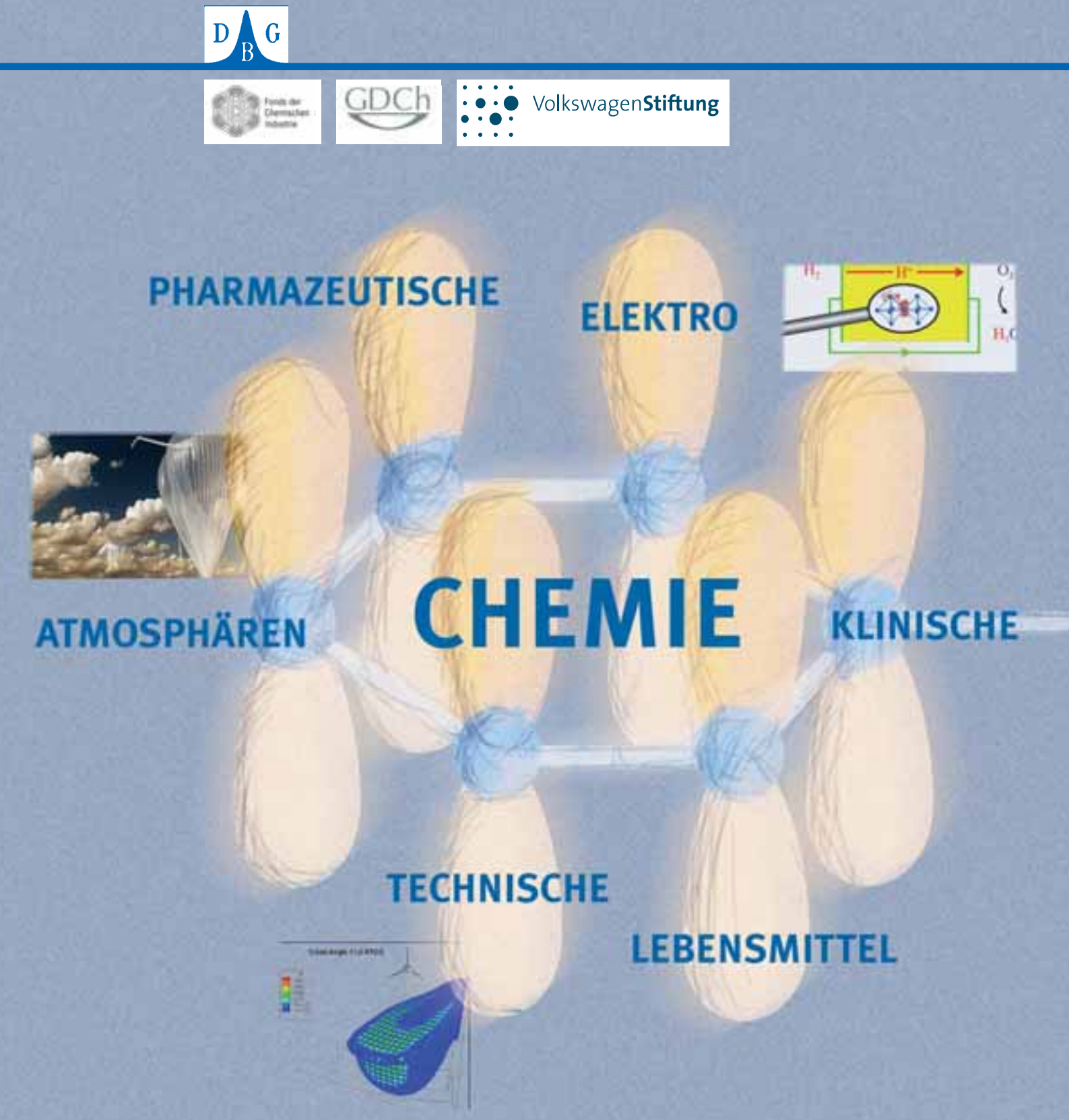
VolkswagenStiftung
Kastanienallee 35
30519 Hannover
Postfach 81 05 09
30505 Hannover
Telefon: 0511/8381-0
Fax: 0511/8381-344
E-Mail: mail@volkswagenstiftung.de
http://www.volkswagenstiftung.de

Fonds der Chemischen Industrie
Karlstr. 21
60329 Frankfurt am Main
Telefon: 069 / 2556-0
Fax: 069 / 2556-1471
E-Mail: fonds@vci.de
http://www.vci.de/fonds/

Notizen

Notizen


HighChem
hautnah
PHARMAZEUTISCHE
ELEKTRO
ATMOSPHÄREN
KLINISCHE
TECHNISCHE
LEBENSMITTEL



ISBN 3-9809691-1-8