

# CLB

*Chemie in Labor und Biotechnik*

Analytik

Biotechnik

Optimierte Prozesse

Komplexe Materialien

Maßgeschneiderte Moleküle

Menschen und Chemie

Aus- und Weiterbildung



- Feuerzeuge:  
Geschichte, Chemie und Experimente (1)
- Petrochemie in Wesseling
- Jugend forscht: Graphen
- Jugend forscht: Polymilchsäure
- REACH und GHS
- Kunststoffe – Märkte und Technologien
- Chemie für Wissenschaftsjournalisten (2)

Kunststoffe sind ein Thema dieser CLB (ab Seite 346). Wie sich ihre Wahrnehmung von Ersatzstoffen zu neuartigen Werkstoffen änderte zeigt dieser Artikel aus der CLB vom Januar des Jahres 1954. So liest man bereits: Die enorme Entwicklung der Elektrotechnik sei ohne die neuen Isolierstoffe kaum möglich...

19

## Chemie und Praxis der Kunststoffe

Von Dipl.-Chem. W. Gehring, Hamburg-Harburg.

*Was sind Kunststoffe?*

Zur sauberen Abgrenzung dessen, was man unter Kunststoffen zu verstehen hat, kann man drei Kriterien anführen, die ein Stoff erfüllen muß, wenn er unter den Sammelbegriff „Kunststoffe“ fallen soll:

1. Die rein wörtliche Erklärung besagt, daß ein Stoff (genauer: ein Werkstoff<sup>1)</sup> künstlich hergestellt sein muß, wenn er ein Kunststoff sein soll. Somit stehen die Kunststoffe im Gegensatz zu den Naturstoffen (Holz, Wolle, Leder, Steine usw.), die in der Form, wie sie in der Natur vorkommen, gegebenenfalls nach gewisser Aufarbeitung im täglichen Leben gebraucht werden. Daß diese Definition allein aber nicht genügt, geht z. B. daraus hervor, daß das Glas zwar ein künstlich hergestellter Werkstoff, aber doch kein Kunststoff ist, weil ein solcher noch eine weitere Forderung erfüllen muß, und zwar
2. die chemische Bedingung, daß er ein makromolekulares und fast ausnahmslos organisch-chemisches Produkt sein soll. Diese Forderung erfüllt das Glas aber nicht, es ist also kein Kunststoff. Schließlich muß ein Kunststoff noch
3. die physikalisch-technische Eigenschaft aufweisen, daß er im Verlauf seiner Herstellung oder Verarbeitung den plastischen Zustand reversibel oder irreversibel durchlaufen haben soll. Daher auch der englische Name „Plastics“ für Kunststoffe und das Bestreben, in Deutschland den Namen „Polyplaste“ an Stelle der „Kunststoffe“ einzuführen. Die Eigenschaft der Plastizität hängt mit dem makromolekularen Aufbau der Kunststoffe eng zusammen, darauf wird später noch näher eingegangen werden. Zusammengefaßt:

Kunststoffe sind voll- oder halbsynthetisch<sup>2)</sup> hergestellte, meist organische, makromolekulare Werkstoffe, die einen plastischen Zustand durchlaufen haben bzw. diesen jederzeit reversibel wieder erhalten können und auf Grund ihrer physikalischen, chemischen und verarbeitungstechnischen Eigenschaften geeignet sind, an die Stelle von natürlichen Werkstoffen zu treten bzw. ganz neue Einsatz- und Konstruktionsmöglichkeiten eröffnen.

<sup>1)</sup> Stoffe, aus denen die Gebrauchsgegenstände gefertigt werden. <sup>2)</sup> Vgl. unten Seite 22

21

Chemie und Praxis der Kunststoffe

waren oder geeignete Typen damals überhaupt noch fehlten — keineswegs geeignet waren. Es sei hier nur an die Verwendung von Kunststoffen als Lederersatz für Riemen, Schuhe und dergleichen erinnert, was in der damaligen Form und Verarbeitung gewiß noch verfehlt war. Aber es gibt ja keinen Werkstoff, den man überall und immer mit gleich gutem Erfolg einsetzen kann, ein jeder hat sein mehr oder weniger begrenztes Einsatzgebiet. Für die natürlichen Werkstoffe ist das allgemein bekannt und keinem würde es beispielsweise einfallen, Aschenkästen für Öfen oder Herde aus Holz anzufertigen. Wenn beim Einsatz von Kunststoffen solche Fehler — wenn auch nicht in diesem krassen Maße — vorgekommen sind, geschah dies aus der Not der Zeit heraus, oder weil den dafür Verantwortlichen die nötige Kenntnis oder Erfahrung mit dieser jungen Werkstoffklasse noch fehlte.

Leider hat aber diese Entwicklung dazu geführt, daß bei uns auch heute noch, wenn auch in immer mehr abnehmendem Maße, die Kunststoffe mit dem Makel des Ersatzstoffes behaftet sind, was in dieser Verallgemeinerung völlig falsch und nur eine Folge des geschilderten und aus der Not der Zeit heraus geborenen falschen Einsatzes ist. In Amerika, wo die technische Entwicklung der Kunststoffe viel natürlicher und ohne diesen Zwang vorstatten gehen konnte, ist von diesem Vorurteil kaum etwas zu bemerken, und der Amerikaner ist demzufolge viel kunststofffreundlicher (plastic minded) als der Europäer. So liegt der Kunststoffverbrauch je Kopf der Bevölkerung 1952 in Amerika bei 8,5 und in Deutschland bei 4 kg. Das zeigt die Unhaltbarkeit des genannten Vorurteils und es muß vom Verbraucher gefordert werden, diese vorgefaßte Meinung aufzugeben, damit der Verbrauch und die technische Entwicklung der Kunststoffe auch bei uns sich nach ihren Möglichkeiten entwickeln können. Andererseits ist es Aufgabe der kunststoffherstellenden und -verarbeitenden Industrie, durch intensive Aufklärung des Verbrauchers und durch werkstoffgerechte Verarbeitung und Verwendung das Ihre hierzu beizutragen.

3. Schließlich sei noch auf zwei weitere Punkte hingewiesen, die für die Entwicklung der Kunststoffe von nicht zu unterschätzender Bedeutung waren: einmal die Tatsache, daß die bis dahin gebräuchlichen natürlichen Werkstoffe auch in normalen Zeiten quantitativ den Bedarf nicht mehr decken konnten, und zum anderen, daß sie in qualitativer Hinsicht vielfach nicht mehr genigten bzw. daß überhaupt keine natürlichen Werkstoffe vorhanden waren, die die geforderten Eigenschaften

20

Chemie und Praxis der Kunststoffe

### *Bedeutung der Kunststoffe*

Die Kunststoffe haben in den letzten zwei Jahrzehnten eine Bedeutung erlangt, die am besten daraus hervorgeht, daß ihre Welterzeugung 1952 die der Nichteisenmetalle volumemäßig bereits überflügelt hat. Im einzelnen ist uns heute kaum noch bewußt, in welchem Umfang Kunststoffgegenstände uns das Leben erleichtern, weil deren Einsatz zum großen Teil schon zur Selbstverständlichkeit geworden ist. In diesem Zusammenhang ist es ganz nützlich, sich einmal ganz bewußt die Gegenstände anzusehen, mit denen man im Laufe des Tages zu tun hat, wie werden überrascht bemerken, daß uns — sei es im eigenen Hause, in Verkehrsmitteln, im Beruf usw., um nur einige Beispiele zu nennen — Kunststoffgegenstände in immer steigendem Maße begegnen.

### *Entwicklung der Kunststoffe*

Die Kunststoffe sind Kinder unseres Jahrhunderts, wenn auch schon im vergangenen Nitrocellulose (als Celluloid), Hydrocellulose (als Vulkanfiber) und vulkanisierter Kautschuk (als Ebonit) erstmalig hergestellt und auch eingesetzt wurden. Von einer Kunststoffindustrie im eigentlichen Sinne kann man aber erst von dem Zeitpunkt an sprechen, als die Fertigung des mit Formaldehyd gehärteten Caseins (Galalith) und der Phenolharze (Bakelite) aufgenommen wurde. Entwicklungsgeschichtlich sind dabei folgende Faktoren bestimmend gewesen:

1. Die gewaltige Entwicklung der Chemie in der zweiten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts hat eine Unmenge von experimentellen Tatsachen aufgezeigt, die zunächst z. T. nur wissenschaftliche Bedeutung hatten, dann aber auch in ihrem technischen Wert erkannt wurden bzw. die Basis dafür abgaben, neue Stoffe aufzubauen. Dabei sei ganz dahingestellt, ob dies in der Absicht geschah, etwas technisch Brauchbares zu schaffen oder dem wissenschaftlichen Bestreben nach neuen Erkenntnissen Genüge zu tun. Praktische Bedeutung bekamen diese Arbeiten dann aber sofort, als
2. in Zeiten der Not, also besonders in den Kriegsjahren, viele natürliche Werkstoffe auf Grund der wirtschaftlichen Isolierung und des riesigen Materialverbrauches immer knapper wurden. Diese Zwangslage hat zweifellos die technische Entwicklung der Kunststoffe sehr gefördert, hat aber andererseits auch — und das vornehmlich bei uns in Deutschland — dazu geführt, daß man für manche Zwecke Kunststoffe eingesetzt hat, für die diese — sei es, weil sie dafür noch nicht weit genug entwickelt

22

Chemie und Praxis der Kunststoffe

aufwiesen. So ist wohl allgemein bekannt, daß Holz heute ein sehr kostbarer Werkstoff ist, und daß mit den vorhandenen Beständen sehr haushälterisch umgegangen werden muß. Hier konnte die Kunststoffforschung helfend eingreifen, indem sie geeignete Kunstharze entwickelte, die es ermöglichen, Holzabfälle (Hobel- und Sägespäne u. ä.) so zu veredeln, daß sie als Bauplatten und Formteile wieder eingesetzt werden können. Ja, es ist sogar möglich, auf Holz als Rohstoff z. T. ganz zu verzichten und dafür Kunststoffe zu verwenden, z. B. Folien aus Kunststoffen oder kunstharzgetränkten Papieren als Tisch- oder Dekorationsplatten.

Zu dem zweiten Punkt ist zu sagen, daß die enorme Entwicklung der Elektrotechnik ohne die Isolierstoffe auf Kunststoffbasis kaum möglich gewesen wäre, und daß die moderne Lebensmittelverpackung in Kunststofffolien in hygienischer Beziehung einen großen Fortschritt gegenüber früher bedeutet.

### *Aufbaumöglichkeiten für Kunststoffe*

Kunststoffe sind, wie bereits definiert wurde, makromolekulare organische Stoffe, und es muß nun die Frage geklärt werden, wie man zu solchen Stoffen kommt. Dies wird uns gleichzeitig eine Möglichkeit geben, in die Fülle der vorhandenen Kunststoffe eine sinnvolle und übersichtliche Ordnung zu bringen. Außerdem erlaubt eine solche Systematik, in gewissem Maße vom Herstellungsweg aus Schlüsse auf die verarbeitungstechnischen Eigenschaften der Endprodukte zu ziehen.

Zur Herstellung von Kunststoffen gibt es grundsätzlich zwei Wege (Tabelle 1):

1. Man geht von in der Natur vorkommenden makromolekularen Stoffen aus, reinigt diese, bringt sie in eine für die Weiterverarbeitung geeignete Form und unterwirft sie schließlich einer chemischen Nachbehandlung, durch die der fertige Kunststoff gebildet wird. Auf diese Weise hergestellte Kunststoffe nennt man modifizierte Naturstoffe oder auch halbsynthetische Kunststoffe, da der für die zweite Art von Kunststoffen — die vollsynthetischen Kunststoffe — charakteristische chemische Schritt, nämlich die Synthese des Makromoleküls aus vielen kleinen Molekülen, hier schon von der Natur vorweggenommen wurde.
2. Die zweite Möglichkeit, Kunststoffe herzustellen, besteht darin, auch das Makromolekül chemisch aufzubauen, man nennt alle hierher

Fortsetzung auf Umschlagseite 3

## Liebe CLB-Leserin, lieber CLB-Leser,

heute spricht man gerne vom „Information Overkill“ in Anlehnung an den Overkill-Begriff der Atomrüstung: Das Waffenarsenal der Menschheit ist heute so groß, dass es sie selbst vielfach vernichten kann. Übertragen auf die Informationen heißt dies heute: Ihr Angebot ist so überwältigend, dass es einen erdrückt. Meiner Ansicht nach ist das die falsche Sehensweise.



Ich vermute, die Menschen nach der Erfindung des Buchdrucks bzw. diejenigen, die die Entwicklung von Rundfunk und Fernsehen miterlebt haben, haben Ähnliches empfunden, auch wenn sie das nicht mit dem englischsprachigen Schlagwort belegten. Entscheidend ist jedoch nicht der Zuwachs an Informationsfülle, der jeweils an solchen Technologiesprüngen – heute durch das Internet – stattgefunden hat, sondern der persönliche Umgang damit.

Wenn ich heutzutage gelegentlich Heranwachsende beobachte, wie sie nahezu wahllos ein paar Wortfetzen ins ICQ-Programmfenster hacken, hastig etliche Profile im SchülerVZ oder FaceBook durchsehen, mit Skype ein paar Kurzmeldungen ggf. als Videobotschaft absetzen und zwischenzeitlich noch „Deutschland is assi cool Schland“ twittern, kann man das höflich ausgedrückt gerade mal mit dem Spruch aus Goethe's Faust „Getretner Quark wird breit, nicht stark“ kommentieren; die reale Ausdrucksweise der Netzgemeinschaft enthält bei irrwitzig verstümmelter Grammatik eher Begriffe aus der Gossensprache. So etwas ist weder für den Sender noch Empfänger sinnvolle Information, bestenfalls summiert es sich im Gehirn zu kakophonischem Rauschen ähnlich dem der Vuvuzelas. Darin besteht natürlich auch die Gefahr für die Heranwachsenden: im sich Verlieren in Informationsfetzen, in der Sucht nach vermeintlich Neuem, im Kitzel kurzfristiger Spontanmeldungen. Das wichtige Eintauchen in die vernetzte, komplexe Gestalt vieler Aspekte unserer heutigen Welt, auch gerade der naturwissenschaftlich-technischen Aspekte, findet so nicht statt.

Es liegt im Interesse unserer Gesellschaft, den Heranwachsenden ein Gefühl für eine entsprechende Entwicklung zu vermitteln. Ein Weg dazu ist sicherlich das Erfolgserlebnis einer eigenen Projektarbeit, wie sie beispielhaft seit vielen Jahren durch den Wettbewerb „Jugend forscht“ bei jährlich mittlerweile über 10 000 Teilnehmern vermittelt wird. Um durch Beispiele motivierend zu wirken veröffentlicht die CLB wie ebenfalls schon seit vielen Jahren zuvor Arbeiten von Bundessiegern, diesmal zu den aktuellen Themen

Graphen sowie Polymilchsäure. Der Überblick über Neuentwicklungen auf dem Kunststoffsektor gleich anschließend greift dann ja auch das Thema nachwachsender Rohstoffe, das mit der Polymilchsäure angestoßen wird, weiter auf.

Ein weiterer Weg zu vertieftem Verständnis statt zu oberflächlichem Informationskonsum besteht auch darin, junge Menschen mit Leistungsträgern aus Wissenschaft und Technik in der Art zu vernetzen, dass ein eigenständiges Interesse zu weitergehenden Recherchen eigener Themen angestoßen wird. Ein Beispiel hierfür: 650 der besten Nachwuchswissenschaftler der Welt kamen auf der 60. Tagung der Nobelpreisträger Ende Juni in Lindau mit 59 Nobelpreisträgern der Physiologie oder Medizin, Physik und Chemie zusammen. Um diesen weltweit einzigartigen Austausch über die Herausforderungen in der Wissenschaft ungeachtet zeitlicher und räumlicher Grenzen fortzusetzen, haben die Organisatoren der Tagungen eine Kooperation mit dem wissenschaftlichen Online-Netzwerk ResearchGate vereinbart. Diese Gruppe ist eingebettet in einer Gemeinschaft von mittlerweile 400 000 Forschern in diesem führenden Netzwerk für Wissenschaftler, das seinen Sitz in Berlin und Boston hat.

Möglicherweise ändert sich diese Netzwerklanschaft aber bald: Ich war bei der Vorstellung von SciSpace in Heidelberg dabei. SciSpace ist eine vernetzte Arbeitsplattform für Wissenschaftler, initiiert von Wissenschaftlern in Cambridge und jetzt professionell organisiert von der BGA Group GmbH, Freiburg. Die Plattform [www.scispace.com](http://www.scispace.com) befindet sich noch im Betastadium. Für Wissenschaftler bietet sie RSS, Blogs, Wikis, in geschlossenen oder offenen Gruppen, mit detaillierter Zugriffskontrolle, kompletter Archivierung von Inhalten und Diskussionen sowie schnelle Austauschformate. Die professionelle Ausrichtung zeigt sich auch in den Daten: Wissenschaftlern soll in späteren Ausbaustufen ein 25 Gigabyte-Mailspeicher sowie ein 10 Gigabyte-Videospeicher nutzbar sein – womit wir dann doch wieder bei Netzwerken gelandet sind. Nur sehen solche Netzwerke ihre Existenzberechtigung vor dem Hintergrund, durch die Vernetzung und die gemeinsame Stärke aller daran Beteiligten etwas zu Erschaffen – statt Zerstreung zu vermitteln, übrigens ganz im Sinne der CLB,

Ihr

# INHALT

## Aufsätze

Von der Zunderbüchse zum Kult-Zippo Historische und chemiedidaktische Aspekte zum Thema Feuerzeug (Teil 1) _____	288
Wesseling und die Petrochemie Von der Gerberei zu den Kunststoffen – Rheinuferbahn als Verbindung_	305
Sensoren mit Graphen: Ein Molekül reicht Jugend forscht 2010: Anwendungen von Graphen mit schulischen Mitteln erstellt _____	310
Kunststoffe aus erneuerbaren Ressourcen Jugend forscht 2010: Biotechnologische Milchsäureerzeugung aus Biomasse _____	322
REACH- und GHS/ CLP-Verordnung Zwei europäische Mammut-Regelwerke halten die Chemische Industrie in Atem _____	338

## Rubriken

Editorial _____	281
Impressum _____	283
F & E im Bild _____	283
Unternehmen _____	284
Personalia _____	286
Förderungen / Preise _____	287
<b>Aktuelles Ereignis</b>	
Kunststoffe: Asien dominiert die Nachfrage – BASF-Infos im Vorfeld der K 2010 _____	346
Forschung und Technik _____	353
Literatur _____	356
Der neueste Stand _____	358
Neue Produkte _____	359
Bezugsquellenverzeichnis _____	375
CLB-Geschichte _____	U1/UB



**Zum Titelbild:**  
Das Bild zeigt ein Original  
Döbereiner Feuerzeug (siehe den  
Artikel ab Seite 288 (Foto: Prof. Dr.  
Viktor Obendrauf).

## Erreichen & Erhalten

Nachfrage ungebrochen – Dienstleistungen steigen DPG und IdW veröffentlichen Studie zum Arbeitsmarkt für Physiker _____	362
Chemie für Wissenschaftsjournalisten Teil 2: Verschiedene Anwendungsbereiche: Von Energie bis Nanotechnik _____	364
Halbleiter in Naturwissenschaft und Technik Mehrere richtige Antworten pro Frage sind möglich _____	374

# Ein Milliardstel einer milliardstel Sekunde

Mit einem Attosekunden-Laser hat ein internationales Forscherteam jetzt herausgefunden, wie genau die Ionisation in einem Wasserstoffmolekül abläuft, bei der ein Elektron aus dem Molekül entfernt wird, und wie sich das verbliebene Elektron innerhalb des Moleküls hinterher neu anordnet. In einer Attosekunde durchquert Licht gerade mal solch ein Molekül. Ihre Aussage: „„Wir haben das Problem nicht gelöst, wie wir zunächst dachten, wir haben lediglich eine Tür geöffnet. Aber das macht das ganze Projekt eigentlich noch viel wichtiger und interessanter.“ Das Bild zeigt die Elektronendynamik in einem Wasserstoffmolekül nach der Photoionisation durch einen Attosekunden XUV-Lichtpuls. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des verbliebenen Elektrons im Molekül (in grün skizziert) wird im Experiment gemessen und ist als Berglandschaft dargestellt (Berg und Tal bedeuten höhere Elektronendichte auf der linken bzw. rechten Seite des Moleküls). Mit zunehmender Zeit nach der Photoionisation wird der Bindungsabstand im Wasserstoff größer (nach rechts; Grafik: Christian Hackenberger/FU Berlin).

## Impressum

**CLB**  
Chemie in Labor und Biotechnik

**Verlag:**  
Agentur & Verlag Rubikon  
für technische und wissenschaftliche  
Fachinformation – Rolf Kickuth  
Anschrift:  
CLB, Agentur & Verlag Rubikon  
Bammentaler Straße 6–8  
69251 Gaiberg bei Heidelberg  
Deutschland  
E-Mail: redaktion@clb.de

**Gründungsherausgeber:**  
Dr. Dr. h.c. Wilhelm Foerst (†)  
Prof. Dr. Wilhelm Fresenius (†)

**Herausgeber:**  
Prof. Dr. Dr. U. Fitzner, Ratingen  
Prof. Dr. K. Kleinermanns, Düsseldorf,  
Prof. Dr. J. Schram, Krefeld  
Prof. Dr. Georg Schwedt, Bonn  
Dr. Wolfgang Schulz, Stuttgart  
Prof. Dr. G. Werner, Leipzig.

**Redaktion:**  
Rolf Kickuth (RK, verantwortlich;  
E-Mail: kickuth@clb.de),  
Dr. Christiane Soiné-Stark  
(CS, E-Mail: stark@clb.de).

**Ständige Mitarbeiter:**  
Raymond Blavatt (Grafik) San Diego (USA);  
Dr. Maren Bulmahn, Bensheim;  
Knut Burgdorf, Ried-Brig (CH);  
Prof. Dr. Wolfgang Hasenpusch, Hanau;  
Dr. Mechthild Kässer, Diekholzen;  
Dr. Annette von Kieckebusch-Güick, Liestal (CH);  
Prof. Dr. Röbbbe Wünschiers, Quedlinburg.

**VBTA-Verbandsmitteilungen:**  
Thomas Wittling,  
Raiffeisenstraße 41, 86420 Diedorf  
Telefon (0821)327-2330  
Fax (08 23 8) 96 48 50  
E-Mail: info@vbta.de

**Anzeigenservice:**  
Natalia Bajramovic  
CLB, Agentur & Verlag Rubikon  
Bammentaler Straße 6–8  
69251 Gaiberg bei Heidelberg  
Telefon (0 62 23) 97 07 43  
Fax (0 62 23) 97 07 41  
E-Mail: service@clb.de

**Abonnentenbetreuung:**  
Natalia Bajramovic  
E-Mail: service@clb.de

**Layout und Satz:**  
Agentur & Verlag Rubikon  
Druck: Printec Offset, Ochshäuser Straße  
45, 34123 Kassel

CLB erscheint monatlich.  
© 2010 Agentur und Verlag Rubikon  
Rolf Kickuth

**Bezugspreise:**  
CLB Chemie in Labor und Biotechnik  
mit der Beilage „CLB-MEMORY“. Einzelheft – außerhalb des Abonnements – 13,00 Euro, im persönlichen Abonnement jährlich 104,00 Euro zuzüglich Versandkosten; ermäßigter Preis für Schüler, Studenten und Auszubildende (nur gegen Vorlage der Bescheinigung) jährlich 79,45 Euro zuzüglich Versandkosten, inkl. 7% MWSt. Ausland sowie Firmen- bzw. Bibliothekenabonnements auf Anfrage. Bezug durch den Buchhandel und den Verlag. Das Abonnement verlängert sich jeweils um ein weiteres Jahr, falls nicht 8 Wochen vor Ende des Bezugsjahres Kündigung erfolgt.

Erfüllungsort ist Heidelberg. Mitglieder des VBTA, des VCÖ sowie des VDC erhalten die CLB zu Sonderkonditionen.

**Anzeigenpreisliste:**  
Nr. 46 vom 01. 12. 2006.

Bei Nichterscheinen durch Streiks oder Störung durch höhere Gewalt besteht kein Anspruch auf Lieferung.

Die Zeitschrift und alle in ihr enthaltenen einzelnen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar.

Für die Rückgabe unverlangt eingesandter Buchbesprechungs-exemplare kann keinerlei Gewähr übernommen werden.

ISSN 0943-6677



## NACHRICHTEN & NOTIZEN

**CS-Service** wird in den kommenden zwei Jahren gemeinsam mit dem Forschungszentrum Jülich und der Firma Chemical Consulting Dornseiffer (CCD) untersuchen, wie Nanopartikel in der Analytik eingesetzt werden können, um bekannte chromatographische Trennverfahren zu verbessern. Thomas Rachel, Staatssekretär beim BMBF, überreichte dazu Förderbescheide über insgesamt 200.000 Euro. **Febit** wird sich künftig auf die Entdeckung und Validierung von microRNA (miRNA)-Biomarker Signaturen aus Blut sowie Partnerschaften und IP-Kommerzialisierung in diesem Bereich fokussieren. Die Neuausrichtung ist das Ergebnis einer Geschäftsentwicklung 2009/2010, in der sich der Bereich miRNA-Biomarker-Signaturen durch überproportionales Wachstum auszeichnete.

**Die Siemens-Division Industry Automation** hat die Fertigung von Komponenten für die Prozessindustrie am französischen Standort Haguenau konzentriert. Mit dem Aufbau einer neuen, 10.000 Quadratmeter großen Produktionslinie für Durchflussmesser wurde der Standort zum Mechatronik-Fertigungszentrum für Prozess-Instrumentierung und -Analytik in Europa ausgebaut.

**BASF** hat ihre Schweizer Gruppengesellschaften BASF Orgamol Pharma Solutions SA, Evionnaz, und BASF Fine Chemicals Switzerland SA, Evionnaz, am 1. Juli in einem Unternehmen zusammengeschlossen. Die aus dem Zusammenschluss entstandene Firma trägt den Namen BASF Pharma (Evionnaz) SA und hat ihren Sitz in Evionnaz, Schweiz.

**Lanxess** baut aus: Der Spezialchemie-Konzern erweitert die Kapazität für seine Premiumprodukte der Reihe Mesamoll, da die Nachfrage nach diesen phthalatfreien Weichmachern steigt. Mit einem Investitionsvolumen im mittleren einstelligen Millionen-Euro-Bereich wird die Produktionsanlage in Krefeld-Uerdingen um 40 Prozent ausgebaut. Am Standort Jinshan in Shanghai/China ist eine weitere Expansionsphase bei der Produktion von Eisenoxid-Gelbpigmenten abgeschlossen worden. Ab sofort kann die Anlage unter Volllast jährlich 28.000 Tonnen produzieren. Der Standort Jinshan ist damit die größte Produktionsstätte für Eisenoxid-Gelbpigmente in Asien.

**Novozymes**, weltgrößter Produzent industrieller Enzyme, und Lignol Energy Corporation, ein Unternehmen, das Ethanol aus Zellulose produziert, haben jetzt ein F&E-Abkommen zur Produktion von Biotreibstoff aus Holzspänen und anderem Waldabfällen unterzeichnet. Das Ziel ist, aus diesen Abfallprodukten Biosprit zu erzeugen, wobei die Produktionskosten nur bei zwei Dollar pro Gallone liegen und damit wettbewerbsfähig sein sollen.

**Bayer Schering Pharma AG** und Bayer HealthCare Pharmaceuticals Inc. haben Mitte Juni in den USA Klage gegen Teva Pharmaceuticals USA, Inc., Barr Pharmaceuticals LLC, und Barr Laboratories, Inc. eingereicht. Mit der Klage geht Bayer gegen eine ihrer Ansicht nach irreführende Werbung und Patentverletzung im Zusammenhang mit der Vermarktung von Texas Pille Gianvi in den USA vor.

## Cognis beschließt Verkauf an BASF

### Dem badischen Unternehmen ist das 3,1 Mrd. € wert

**Die Cognis Holding Luxembourg S.à r.l., die von Permira Fonds, GS Capital Partners und SV Life Sciences kontrolliert wird, hat am 22. Juni einen Vertrag unterzeichnet, 100 Prozent ihrer Anteile an der Cognis Holding GmbH an die BASF SE zu verkaufen.**

Der Kaufpreis für das Eigenkapital beträgt 700 Millionen Euro. Nettofinanzschulden und Pensionsverpflichtungen eingeschlossen ergibt das einen Unternehmenswert von 3,1 Milliarden Euro. Der Abschluss der Transaktion unterliegt den üblichen Bedingungen, einschließlich der kartellrechtlichen Genehmigungen, und wird für spätestens November 2010 erwartet.

Cognis ist ein führender, weltweit tätiger Hersteller von innovativen Lösungen sowie Produkten auf

Basis nachwachsender Rohstoffe für den Ernährungs- und Gesundheitsmarkt sowie für die Kosmetik-, Wasch- und Reinigungsmittelindustrie. Ein weiterer Schwerpunkt sind Produkte für industrielle Märkte wie Bergbau, Schmierstoffe, Farben und Lacke, sowie Pflanzenschutz. Das Unternehmen beschäftigt rund 5500 Mitarbeiter und verfügt über Produktionsstätten und Servicecenter in 30 Ländern. Im Jahr 2009 erzielte Cognis einen Umsatz von ca. 2,6 Milliarden Euro und ein EBITDA (Ergebnis vor Zinsen, Steuern und Abschreibungen) von 322 Millionen Euro.

Nach Erhalt der notwendigen rechtlichen Genehmigungen wird das Geschäft in das BASF-Segment Performance Products integriert. Das Segment erzielte 2009 einen Umsatz von 9,4 Milliarden Euro.

## TOP 100 2010: Sechsmal Chemie

### 60 Familienunternehmen unter den Ausgewählten

**Gerade ermittelte die Comgamedia GmbH in Überlingen mit dem Mentor Lothar Späth die „TOP 100 2010 – Die 100 innovativsten Unternehmen im Mittelstand“. Auch sechs Unternehmen aus den Bereichen Chemie und Pharmazie sind dabei.**

32.500 Mitarbeiter arbeiten bei den Top-Innovatoren deutschlandweit. 2009 erwirtschafteten sie einen Gesamtumsatz von 11,1 Milliarden Euro. 42 Prozent sind national die Nummer eins ihrer Branche, zehn Prozent sind Weltmarktführer. Dass sich Traditionsbewusstsein und Veränderungswille nicht ausschließen, zeigen 60 Familienunternehmen, die sich unter den TOP 100 befinden. 86 der 100 Firmen sind in den vergangenen drei Jahren schneller gewachsen als der Branchendurchschnitt.

Der größte Teil der TOP 100-Unternehmen 2010 kommt aus dem Maschinenbau (18 %), gefolgt von Unternehmen aus den Bereichen IT (8 %) und der Elektronikbranche (8 %). Insgesamt hatten sich 248 Unternehmen beworben. Untersucht wurden sie in fünf Kategorien: Innovationsförderndes Top-Management, Innovationsklima, Innovative Prozesse und Organisation, Innovationsmarketing und Innovationserfolg.

Die Unternehmen aus dem Bereich Chemie/Pharmazie sind (alphabetisch geordnet): Allit AG Kunststofftechnik, Bad Kreuznach; Cytonet GmbH & Co. KG, Weinheim; Ewald Dörken AG (Kunststoffe), Herdecke; Innojet Herbert Hüttlin, Steinen; SGL Carbon SE, Wiesbaden sowie die Wissenschaftliche Gerätebau Dr. Ing. Herbert Knauer GmbH, Berlin.

## Platz 3 in Europa – über 3000 F&E-Mitarbeiter

### Überblick über die Entwicklung der Biotech-Branche Frankreichs

**F**rankreich verfügt im Bereich der Biotechnologien über eine diversifizierte Industriestruktur. Rund 400 Biotechnologieunternehmen beschäftigen nahezu 6000 Mitarbeiter. Dabei sind mehr als die Hälfte in der Forschung und Entwicklung tätig. Europaweit rangiert Frankreich in diesem Wirtschaftsbereich hinter Großbritannien und Deutschland auf Platz drei. Gleichzeitig spielen die in der Biotechnologie entwickelten Anwendungen eine immer wichtigere Rolle für Mensch und Umwelt: Fast 50 Prozent aller marktgängigen Medikamente werden im Bereich der Biotechnologie erforscht.

Neben dem Gesundheitswesen zählen auch Bereiche wie die Nano-Biotechs, das Zusammenwachsen von Biotech und IT sowie biotechnologische Anwendungen im Dienste des Umweltschutzes zu den zukunftsweisenden Forschungsgebieten.

Dabei bietet Frankreich ein günstiges Umfeld für Kooperationen: acht auf Biotechnologie und Gesundheit spezialisierte Cluster tragen seit 2005 zur Dynamisierung dieses Wirtschaftszweiges bei, indem sie die partnerschaftliche Zusammenarbeit zwischen Industrieunternehmen und öffentlichen Forschungseinrichtungen fördern. Dazu gehören die Cluster Lyon-biopôle ([www.lyonbiopole.com](http://www.lyonbiopole.com)), Medicen ([www.medicen.org](http://www.medicen.org)), Alsace BioValley ([www.alsace-biovalley.com](http://www.alsace-biovalley.com)), Nutrition Santé Longévité ([www.pole-nsl.org](http://www.pole-nsl.org)), Atlantic Biothérapies ([www.atlantic-biotherapies.com](http://www.atlantic-biotherapies.com)), Prod'Innov ([www.prodinov.fr](http://www.prodinov.fr)), Eurobiomed ([www.eurobiomed.org](http://www.eurobiomed.org)) und Cancer-Bio-Santé ([www.cancerbiosante.fr](http://www.cancerbiosante.fr)). Diese als „offene Ökosysteme“ ausgelegte Cluster beherbergen rund sechzig ausländische Unternehmen.

Zu den Fördermaßnahmen der Biotechnologieunternehmen zählen die Steuergutschrift auf Forschungsausgaben (CIR) und Finanzierungen für gemeinsame F&E-Projekte innerhalb der Cluster. Zum Maßnahmenkatalog gehören ebenso die Initiative „junges, innovatives Unternehmen“ (JEI), Finanzhilfen der französischen Innovationsagentur OSEO und Projektausschreibungen der französischen Agentur für Forschung (ANR). Anfang 2009 wurde die Französische Allianz für Lebenswissenschaften und Gesundheitswesen (AVIESAN) gegründet, deren Aufgabe es ist, die Aktivitäten der verschiedenen französischen Forschungseinrichtungen zu koordinieren. Darüber hinaus dient der mit 140 Millionen Euro dotierte InnoBio-Fonds der Unterstützung innovativer Unternehmen. Seit verganginem März fördert und entwickelt die „Allianz für Forschung und Innovation von

Unternehmen aus dem Gesundheitswesen“ (ARIIS) öffentlich-private Partnerschaften.

Innerhalb der vergangenen zehn Jahre wurden bereits 320 ausländische Investitionsprojekte im Bereich der Lebenswissenschaften in Frankreich verzeichnet. 2009 gründete Novartis (Schweiz) weltweit das vierte Krebsforschungszentrum in Frankreich. Neben der Ansiedlung kleinerer Unternehmen wie beispielsweise die Firmen Cellseed (Japan) oder Immunoclin (Großbritannien) entschied sich auch Genzyme im Zuge der Einrichtung eines neuen Bioproduktionszentrums für den Standort Frankreich. Gleiches gilt für Medizintechnik-Unternehmen wie Sysmex (Japan) im Diagnosebereich und Sorin (Italien) auf dem Gebiet der Herzimplantate. Auch die Firmen Daiichi Sankyo (Japan), Novo Nordisk (Dänemark) und Ely Lilly (USA) bestätigen ihr Interesse für den französischen Markt.

#### Neue Anlage durch starke Nachfrage bei langglasfaserverstärktem Polypropylen

Mehr als nur positiv gestaltet sich die Nachfrage an den neuen, besonders geruchs- und emissionsarmen Compounds der Reihe TechnoFiber PP-LGF (langglasfaserverstärkten Polypropylen (PP)-Granulate) des Bad Sobernheimer Compoundierspezialisten TechnoCompound. Auf lange Sicht rechnet man dort mit Zuwachsraten, die deutlich im zweistelligen Bereich liegen. Um auch zukünftig Lieferengpässe zu vermeiden und die gewohnte Produktqualität sowohl für die langglasfaserverstärkten Compounds als auch für die anderen Produktlinien garantieren zu können, entschied sich die Unternehmensleitung kurzfristig für die Investition in eine weitere neue Produktionsanlage. Damit wird die Gesamtproduktionskapazität nochmals um 10 000 Jahrestonnen auf insgesamt 60 000 Jahrestonnen erhöht. Produktionsstart soll Sommer 2011 sein. Das als Stäbchengranulat angebotene Compound enthält Glasfasern mit einer Ausgangslänge von zehn Millimetern, die in Gewichtsanteilen zwischen zehn und 60 Prozent eingearbeitet sind. Aktuell beschäftigt TechnoCompound 70 Mitarbeiter. Der Umsatz im Jahr 2008 betrug rund 35 Millionen Euro. Das Foto zeigt eine LGF-Anlage von TechnoCompound.

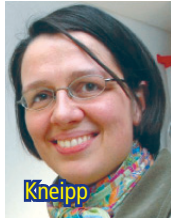


**DGEM** Der gebürtige Schweizer und Mediziner **Prof. Dr. Cornel Sieber** (51) aus Nürnberg ist für die nächsten zwei Jahre neuer Präsident der Deutschen Gesellschaft für Ernährungsmedizin (DGEM e.V.). Prof. Sieber ist Spezialist für Geriatrie, Ernährung im Alter, Mangelernährung und Adipositas. Sein Vorgänger, Prof. Dr. Arved Weimann aus Leipzig, gehört als erster Vizepräsident weiter dem Präsidium an.

**GWEC** **Dr. Klaus Rave** (60), Vorstand der Investitionsbank Schleswig-Holstein und Sprecher des Beirats der Husum Wind Energy ist zum neuen Vorstandsvorsitzenden des Global Wind Energy Council (GWEC) gewählt worden. Er folgt in dieser Funktion dem Griechen Arthouros Zeros, derzeit Direktor des mehrheitlich in Staatsbesitz befindlichen, größten griechischen Energieversorgungsunternehmens Public Power Corporation (PPC) in Griechenland. Zeros hatte den Vorsitz des GWEC seit der Gründung des Verbandes im Jahr 2006 inne. Komplettiert wird der neue Vorstand durch Denise Bode (American Wind Energy Assoc.), DV Giri (Indian Wind Turbine Manufacturers' Association), Henning Kruse (Siemens) und Carlos Gasco (Iberdrola Renewables).

## EHRUNGEN

**Privatdozent Dr. Alexander W. Friedrich**, Oberarzt am Institut für Hygiene des Universitätsklinikums Münster (UKM), erhielt den diesjährigen mit 5000 Euro dotierten **Robert Koch-Förderpreis**. Er wird damit als medizinischer Mikrobiologe ausgezeichnet, der die modernen diagnostischen Verfahren zur Prävention von Krankenhausinfektionen, insbesondere verursacht durch Antibiotika-resistente Erreger wie MRSA, anwendet. Der Robert Koch-Förderpreis wird seit 1981 alle zwei Jahre von der Geburtsstadt Robert Kochs, Clausthal-Zellerfeld, verliehen.



Die Biologin **Dr. Dörte Gocke** und der Physiker **Dr. Sebastian Feste** sind in diesem Jahr die Träger des jeweils 5000 Euro dotierten **Exzellenzpreises des Forschungszentrums Jülich**. Dörte Gocke befasste sich in ihrer Dissertation mit Enzymen, die für die Herstellung wichtiger chemischer Bausteine, die zum Beispiel als Ausgangsstoffe für unterschiedliche Pharmazeutika dienen, eingesetzt werden können. Die 32-Jährige, die Anfang Juni zum zweiten Mal Mutter wurde, leitet am Institut für Biotechnologie des Forschungszentrums eine Arbeitsgruppe. Der 31-Jährige Sebastian Feste erforschte in seiner Doktorarbeit die Herstellung und Analyse von Halbleiterbauelementen auf dem Gebiet der Silizium-Nanoelektronik. Feste war Nachwuchswissenschaftler am Jülicher Institut für Bio- und Nanosysteme, gegenwärtig forscht er an der Purdue Universität in Indiana/USA. Der Exzellenzpreis des Forschungszentrums Jülich wurde im vergangenen Jahr erstmals vergeben. Jedes Jahr können bis zu fünf junge Wissenschaftler mit dem Preis ausgezeichnet werden.

**PD Dr. Dr. Carole Bourquin** (40) von der Abteilung für Klinische Pharmakologie des Klinikums der Uni München erhielt den mit 25000 Euro dotierten **Georg Heberer Award 2010**. Die Oberärztin und Nachwuchswissenschaftlerin erhielt die Auszeichnung für einen neuen Ansatz zur Krebstherapie. Ziel ist es, die angeborene Immunabwehr des Patienten mit Hilfe synthetisch hergestellten, kurzen Molekülen aus RNA zu stimulieren. Erstmals gelang der Nachweis, dass diese Oligonukleotide NK-Zellen dazu anregen, Tumorzellen zu erkennen und zu eliminieren. Mit dem Preis der US-amerikanischen Chiles Foundation soll die Auseinandersetzung mit aktuellen Themen in der Chirurgie gefördert werden.

Der polnisch-amerikanische Wissenschaftler **Prof. Dr. Krzysztof Matyjaszewski** hat den **Gutenberg Lecture Award 2010** der Graduiertenschule Materials Science in Mainz erhalten. Matyjaszewski lehrt und forscht an der Carnegie Mellon University in Pittsburgh, USA. Den mit 10000 Euro dotierten Preis erhält er für die Entwicklung eines neuartigen Verfahrens zur Synthese von Polymeren, durch das maßgeschneiderte Kunststoffe hergestellt werden können. Matyjaszewski konnte durch die Verwendung von Kupfer-Katalysatoren eine Vielzahl bisher unkontrollierbarer Polymerisationen steuern.

Der Umwelt-Ingenieur **Dr. Claudio Cinquemani** (34) erhält den mit 10000 Euro dotierten **Umsicht-Wissenschaftspreis in der Rubrik Wissenschaft** des Umsicht-Fördervereins. In seiner am Deutschen Textilforschungsinstitut Nord-West e.V. in Krefeld angefertigten Promotionsarbeit entwickelte Dr. Cinquemani einen neuen Sterilisationsprozess. Durch die Verwendung von bakterizidem, überkritischem CO<sub>2</sub> zum Transport anderer Substanzen lassen sich patienten- und umweltfreundliche Sterilisationsverfahren ableiten, ohne dass schädliche organische Lösemittel zurückbleiben.

Der mit 5000 Euro dotierte **Dr. Friedrich-Förster-Preis 2010** der Fakultät für Mathematik und Physik der Uni Tübingen und der Fa. Institut Dr. Förster wird an **Dipl. Phys. Barbara Grüner** aus Billafingen (Bodensee-Kreis) verliehen. Barbara Grüner hat in ihrer Diplomarbeit am Physikalischen Institut der Universität Tübingen ein neues Konzept zum Nachweis von neutralen Atomen umgesetzt und dabei einen grundlegend neuen Atomdetektor sowie einen neuen, extrem sensitiven Drucksensor realisiert. Ihr Detektor benötigt kein Licht mehr und bietet weit reichende Anwendungsperspektiven im Bereich der Atom- und Molekülphysik.



Für seine Entdeckungen auf dem Gebiet der Pflanzenentwicklung erhält **Prof. Dr. Jiri Friml** (37) den mit 750 000 Euro dotierten **Körber-Preis für die Europäische Wissenschaft 2010**. Der Molekularbiologe und Biochemiker, seit 2007 Professor am Departement für Pflanzen-Systembiologie an der belgischen Universität Gent, erforscht die genetischen, molekularen und zellbiologischen Prozesse, die die Entwicklung von Pflanzen steuern. Das Wachstumshormon Auxin reguliert, wo bei einer Pflanze oben und unten ist, wie stark sie in welche Richtung wächst und wo welche Organe angelegt werden.

**Prof. Dr. Dr. Dr. Hanns Hatt** erhielt den **Forschungspreis der Doktor Robert Pfleger-Stiftung**. Dieser Preis gilt mit 50 000 Euro als einer der höchst dotierten Preise für medizinische Forschung. Hanns Hatt, Inhaber des Lehrstuhls für Zellphysiologie an der Ruhr Universität Bochum und Präsident der Nordrhein-Westfälischen Akademie der Wissenschaften und Künste, bekam den Preis für seine Erkenntnisse im Bereich des Geruchssinns.

Der Europäische Forschungsrat (European Research Council, ERC) hat **Prof. Dr. Janina Kneipp** mit einem **ERC Starting Grant** ausgezeichnet. Für die nächsten fünf Jahre erhält Janina Kneipp eine Fördersumme von 1,39 Mio. Euro. Unter dem Projekt-Kürzel Multibiophot wird sie mit ihrer Gruppe neue mikrospektroskopische Methoden für analytische Anwendungen weiterentwickeln. In diesem Projekt sollen neue spektroskopische Strategien basierend auf der Kombination verschiedener Mehrphotonen-Prozesse und den günstigen optischen Eigenschaften von Metall-Nanostrukturen erforscht und angewendet werden. Janina Kneipp ist seit 2008 Junior(S)-Professorin für Analytische Chemie am Institut für Chemie an der Humboldt Universität zu Berlin und der BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung.

## Interdisziplinäre Materialforschung

Bereits zum fünften Mal schreiben der Materialforschungsverbund Dresden (MFD), die TU Dresden und das European Center for Micro- and Nanoreliability (ECEMAN) in diesem Jahr den internationalen ‚Dresden Barkhausen Award‘ aus. Zu den Sponsoren des mit 10 000 Euro dotierten Preises gehört auch das Bergisch Gladbacher Unternehmen Fries Research & Technology (FRT). Der ‚Dresden Barkhausen Award‘ wird für Leistungen in der angewandten Forschung und Entwicklung auf dem Grenzgebiet zwischen Physik, Materialwissenschaft und Elektrotechnik vergeben. Die Forschungsergebnisse sollen neue Anwendungspotenziale erschließen oder bereits Eingang in Pro-

dukte gefunden haben. Seit dem vergangenen Jahr wird in diesem Zuge auch der Dresdner Barkhausen-Poster-Preis für Studenten und junge Nachwuchswissenschaftler ausgelobt, bei dem herausragende Forschungsergebnisse und ihre gelungene Poster-Präsentation gewürdigt werden. Um die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses weiter zu unterstützen, erhöht FRT 2010 seinen Anteil am Preisgeld. Bewerber für den ‚Dresden Barkhausen Award‘ können bis zum **10. Oktober 2010** ihre Vorschläge beim Materialforschungsverbund Dresden einreichen. Die komplette Ausschreibung finden Sie unter [www.mfd-dresden.de/Bilder/Ausschr\\_BAward10-deut-A3.pdf](http://www.mfd-dresden.de/Bilder/Ausschr_BAward10-deut-A3.pdf).

## Nachwuchsförderung Chemoinformatics

Mit dem FIZ Chemie Berlin-Preis zeichnen FIZ Chemie und die Fachgruppe Chemie-Information-Computer (CIC) der Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V. (GDCh) Nachwuchswissenschaftler verschiedener Disziplinen aus, die mit ihrer Dissertation, Master- oder Diplomarbeit eine besondere Leistung zur Weiterentwicklung des Fachgebietes Chemie-Information-Computer erbringen. Die Ausschreibungsfrist für den Preis endet am **31. Juli 2010**. Auch aus anderen naturwissenschaftlichen Disziplinen können Arbeiten ein-

gereicht werden, wenn sie die verlangten Kriterien erfüllen und die in der CIC vertretenen wissenschaftlichen Fachgebiete betreffen. Die Preisverleihung 2010 erfolgt bei der jährlichen Chemoinformatik-Konferenz (German Conference on Chemoinformatics) der CIC in Goslar. Die Preisträger erhalten eine finanzielle Anerkennung in Höhe von 500,- Euro für die Dissertation und 250,- Euro für die Diplomarbeit. Details zur Ausschreibung unter [www.fiz-chemie.de/home/news-terminen/foerderpreise/fiz-chemie-berlin-preis.html](http://www.fiz-chemie.de/home/news-terminen/foerderpreise/fiz-chemie-berlin-preis.html).

## Schülerwettbewerb zum Jahr der Energie

Was ist Energie, wo kommt sie her: Um diese Fragen geht es beim Schülerwettbewerb Formel EIns, den das Forum Chemie aus Anlass des Jahres der Energie 2010 und des Internationalen Jahres der Chemie 2011 ins Leben gerufen hat. Pioniergeist und Erfindungsreichtum sind gefragt. Bis zum **1. September 2010** können die jungen Forscher ihre Konzepte einreichen. Nach einer Vorrunde im Internet treten die besten Teams in der Endrunde am 9. Februar 2011 in Berlin

gegeneinander an und werden im Rahmen der Eröffnungsveranstaltung zum Internationalen Jahr der Chemie im Beisein von Prominenz aus Wirtschaft, Politik, Wissenschaft und Medien ausgezeichnet. Teilnahmeberechtigt sind Schülerteams (3 bis 5 Mitglieder) bis einschließlich Klassenstufe 11. Dem Siegerteam winken ein Pokal und 500 €. Teilnahmebedingungen und Anmeldung zum Wettbewerb unter [www.energie-und-chemie.de/Wettbewerb](http://www.energie-und-chemie.de/Wettbewerb).

# Von der Zunderbüchse zum Kult-Zippo

## Historische und chemiedidaktische Aspekte zum Thema Feuerzeug (Teil 1)

**Viktor Obendrauf, Graz**

In der Kulturgeschichte gehören Beherrschung, Bewahrung und Erzeugung von Feuer zur Nutzung seiner Wärme und seines Lichts zu den wichtigsten Schritten in der Entstehung menschlicher Zivilisationen. Entsprechende Bedeutung kommt dem Feuerzeug zu. Ursprünglich war das Feuerzeug kein einzelnes Gerät, sondern bezeichnete das Zeug, mit dem man Feuer macht. Im Teil I dieses Fachbeitrags werden verschiedene historische Methoden der Feuererzeugung chronologisch beschrieben. Von diesen Betrachtungen ausgespart blieben Zündhölzer aller Art, weil diese bereits in einem gesonderten Artikel in der vorausgegangenen CLB 06-2010 behandelt worden sind. In Ergänzung dazu zeigt ein Aufsatz in der kommenden CLB 09-2010 wesentliche Fakten zur Entwicklung und Funktion von modernen Gasfeuerzeugen mit und ohne Piezozündung auf.

Bedecke deinen Himmel, Zeus,  
Mit Wolkendunst  
Und übe, dem Knaben gleich,  
Der Disteln köpft,  
An Eichen dich und Bergeshöhn;  
Mußt mir meine Erde  
Doch lassen stehn  
Und meine Hütte, die du nicht gebaut,  
Und meinen Herd,  
Um dessen Glut  
Du mich beneidest.

So unverfroren provoziert der „Revoluzzer“ Prometheus den autoritären Göttervater Zeus. Leidenschaftlicher Sturm und Drang ist bereits in dieser ersten Strophe des berühmten Gedichtes von J. W. Goethe aus dem Jahr 1774 unverkennbar. Der Titan und Halb-

### Der Autor

Prof. Dr. Viktor Obendrauf ist seit 1978 im Schuldienst tätig, seit 1980 in der Lehreraus- und -fortbildung im In- und Ausland. Er arbeitet an der Universität Graz und ist weltweit führend in der Entwicklung von Mikromaßstab-Experimenten für den Chemieunterricht. Viktor Obendrauf veröffentlichte über 100 Arbeiten. Er erhielt u.a. 1998 den Friedrich-Stromeyer-Preis der GDCh, 2001 den Pädagogenpreis des Fachverbands der chemischen Industrie Österreichs (FCIO) und 2005 den Manfred-und-Wolfgang-Flad-Preis.



Abbildung 1: Lakonische Schale (550 v. Chr.) Vatikanische Museen (Bildquelle I).

gott, Menschenmacher und „Vordenker“ hatte dem Götterschmied das Feuer entwendet um es für seine unvollkommenen Geschöpfe verfügbar zu machen. Die Menschen sollten damit von den Göttern unabhängiger werden und sich entwickeln können. Die „olympische“ Strafaktion blieb nicht aus: Prometheus wurde von Hephaistos an den Kaukasus geschmiedet wo ihm ein Adler jeden Tag ein Stück Leber entriß; gerade so viel, dass diese nachts wieder nachwachsen konnte (Abbildung 1). Herakles konnte den wohlthätigen Feuerräuber schließlich befreien. Den Menschen schickten die Götter die unsterblich schöne und verführerische Pandora, die in ihrer sprichwörtlich gewordenen Büchse alles bereithielt, was es zuvor auf der Erde nicht gegeben hatte: Krankheit, Tod, Mord und Verzweiflung (Hesiod, ca. 700 v. Chr.).

Nachträglich betrachtet behielt der Goethe'sche Prometheus, aber auch Hesiod Recht: Trotz der genannten Plagen waren die Menschen imstande, sich mit dem gezähmten Feuer weiter zu entwickeln (um sich z.B. auch in klimatisch unwirtlicheren Regionen der Erde anzusiedeln). Mit den Kulturtechniken der von Glut und Feuer dominierten Kupfer-, Bronze- und Eisengewinnung ließ der Homo sapiens bereits vor tausenden von Jahren die Mühen der Steinzeit hinter sich. Und heute steuert der Homo sapiens mit

angeblich wertfreien (Klon-)Techniken in zweifelhaft-schöpferischer Manier sogar in Richtung „Homo xerox“. Die Büchse der Pandora enthält offensichtlich immer wieder neue Überraschungen...

## Feuer mit Vergangenheit

Feuer bedeutet Chemie im engsten Sinn. Mit dem beruhigend rationalen Wissen um allgemein gültige Gesetzmäßigkeiten werden damit die Begriffe Brennstoff, Oxidationsmittel, Aktivierungsenergie bzw. negative Reaktionsenthalpie assoziiert. Wie in dieser Zeitschrift zum Thema „Zünd- und Streichhölzer“ bereits ausführlich festgehalten, hat die Nutzung bzw. Erzeugung von Feuer aber auch zutiefst kulturhistorische Bedeutung [1]. Einschlägige Materialien für fächerverbindende Projekte an der Schule können in der Literatur, im Geschichte- und Religionsunterricht fast genauso ergiebig gesammelt werden, wie im Bereich der Naturwissenschaften.

Selbst die heroischen Verfechter des Latein- bzw. Griechischunterrichts müssten nicht ganz leer ausgehen: Im 36. Buch seiner *Naturalis historia* beschreibt C. Plinius d. Ä. (23 – 79 n. Chr.) die Technik des Feuermachens mit Feuerstein, Pyrit und Schwamm. Im 7. Buch recherchiert er aus mythologischer Sicht, wer zum ersten Mal eine Art Feuerzeug verwendet hat: „... ignem e silice Pyrodes Cilicis filius, eundem adservare ferula Prometheus.“ Was für ebenso heroische Ignoranten des lateinischen Sprachschatzes etwas sperrig übersetzt soviel heißt wie: „Feuer aus einem Kieselstein zu schlagen, lehrte Pyrodes, der Sohn des Kilix, und es in einem Zunder aufzufangen, Prometheus“ (ferula communis ist der mediterrane Riesenfenchel, dessen Stängel ein zunderähnliches Mark enthält, das lose und getrocknet in Sizilien noch bis zum Beginn des vergangenen Jahrhunderts zum Feuermachen und zum Transportieren von Glut verwendet wurde).

In einer altgriechischen Komödie (Aristophanes, „Die Wolken“, Uraufführung 423 v. Chr.) ist von „durchsichtigen Steinen“ die Rede, die in diesem Stück von Sokrates als „Kristalllinsen“ bezeichnet werden und zum Feuermachen verwendet werden können. [2].

In den Schriften der alten Römer tauchen derartige Kristalllinsen im Zusammenhang mit der rituellen Erzeugung des „reinen“ (Sonnen-)Feuers im Vesta-Tempel auf.

Auch die Technik des Feuerbohrens durch Reibung von zwei verschiedenen Hölzern als Urform eines Feuerzeuges war sowohl den alten Griechen als auch den Römern bereits geläufig. Es gibt in der einschlägigen Literatur beider Kulturen die zusammengehörigen Vokabel dafür (z. B. lat. terebra et tabula (Bohrer, Reibholz und Brett) [3].

Sechs jungfräuliche Vestalinnen behüteten das „ewige“ Feuer im Vesta-Tempel. Wenn es einmal trotzdem recht unrühmlich verloschen ist, soll es mit zwei Hölzern wieder neu entfacht worden sein. Dieses heilige Feuer auf diese Weise mühsam wieder entzünden

zu müssen, verlangte selbstverständlich nach einem besonderen Opfer: Die unachtsame Vestalin wurde zu Tode gezeißelt [4].

Aber nicht nur im alten Rom besaß das Feuer eine mythische bzw. religiöse Komponente: Die Germanen entzündeten das Frühlingsfeuer als Fruchtbarkeitsymbol und zu Ehren ihres Gottes Wotan und in den katholischen Kirchen flackert heute das „Ewige Licht“.

Seit 1928 wird das olympische Feuer in Olympia durch Bündeln von Sonnenlicht mittels Hohlspiegel entzündet und von dort an die jeweiligen Austragungsorte gebracht.

Solche Feuer erzeugenden Vorläufer von modernen Solarkraftwerken soll es angeblich in der Antike schon gegeben haben: Von Archimedes (285 – 212 v. Chr.) wird berichtet, dass er die mit polierten (Metall-)Spiegeln ausgerüsteten Bürger von Syrakus so zu einem riesigen Hohlspiegel antreten ließ, dass die gebündelten Lichtstrahlen der Sonne die Segel der feindlichen römischen Flotte in Brand gesetzt haben. Seriöse Forscher sind diesbezüglich skeptisch und meinen, dass diese Geschichte nur gut erfunden sei und die Schiffe wahrscheinlich durch Brandgeschosse manövrierunfähig wurden. Tatsache ist, dass ein analoges Experiment mit optimalem Equipment im Herbst 2002 in Kalkriese (Deutschland) gelungen ist: 500 Freiwillige, die sich unter der Anleitung eines Physikers mit neuzeitlichen, 45 x 45 cm großen Kristallspiegeln bewaffnet und höhenversetzt in 5 Reihen zu einem lebendigen Hohlspiegel gruppieren ließen, konnten mit der Kraft der Sonne ein 50 m entferntes (schwarzes) Segel in Brand setzen [5].

Noch heute ist das Feuer bei vielen alten Stammeskulturen von elementarer Bedeutung: Es ermöglicht die Zubereitung von verdaulicheren Speisen, es wärmt und ist unverzichtbar bei der Herstellung von Werkzeugen, Keramiken, Metallen und bei der Gewinnung von fruchtbarem Ackerland durch Brandrodung.

## Früh genutzt, spät erzeugt

Wie verschiedene erstaunliche Beispiele aus der Tierwelt belegen, ist die Nutzung von primitiven Werkzeugen noch kein sicherer Indikator für menschliches Denken und Handeln. Mit der Fähigkeit, die bedrohliche Macht des Feuers zu zähmen und zu bewahren, hob sich jedoch der frühe Mensch bereits sehr deutlich von den reinen Instinktwesen ab. Mit der Fertigkeit, natürlich entstandenes Feuer zu hüten und zu nutzen, war für unsere weit verzweigten Urahnen die Möglichkeit geschaffen, von der Wiege Afrika aus ins winterkalte Eurasien vorzudringen. Das konservierte Herdfeuer schützte vor Kälte und wilden Tieren. Die Notwendigkeit, die Feuerstelle gemeinschaftlich zu hüten und zu nähren, förderte ein komplexeres Sozialverhalten und nicht zuletzt die Entwicklung der Sprache [6].

Über die erstmalige Nutzung von Feuer durch die Hominiden kann es natürlich nur sehr unsichere Da-

Abbildung 2:  
Feuersteine aus  
Krapina [15].



tierungen geben. Ausgrabungen in Kenia bzw. Südafrika deuten darauf hin, dass das Feuer zumindest zeitweise für den Homo habilis („handy man“) bzw. für den Homo erectus bereits vor ca. 1,5 Millionen Jahren verfügbar war [7, 8].

Viele Archäologen sind jedoch heute der Meinung, dass etliche dieser ältesten Fundstellen in Afrika nicht sicher auf eine gezielte Nutzung von Feuer schließen lassen, weil Reste an nur leicht angebrannter Erde direkt bei den Knochenfunden auch auf natürlich entstandene, (Busch-, Steppen- oder Wald-?)brände zurückgeführt werden können [9].

Eine bewusste Nutzung von Feuer lässt sich nur aus tatsächlich gesicherten, längerfristig aktiven Feuerstellen ableiten, die vor allem in kälteren Regionen der Erde von evolutionärer Bedeutung waren. Tatsächlich finden sich die ältesten Feuerstellen an Orten,

die zur Zeit des Homo erectus im Einflussbereich von heranrückenden Gletschern lagen: Auf 500 000 Jahre schätzt man eine Feuerstelle am französischen Ausgrabungsort L’Escale [10].

Mindestens 500 000 Jahre alt sollen die Holzkohlenreste in der Höhle von Zhoukoutian in der Nähe der chinesischen Hauptstadt Beijing sein (siehe Tabelle 1 nach [11])

Die Feuer in den Wohnhöhlen des „Peking-Menschen“ wurden offensichtlich über viele Generationen geschürt und gehütet, bis sich eine mehr als 6 Meter dicke Aschenschicht angesammelt hatte [12].

Bedenken gibt es neuerdings jedoch an der zweifelsfreien Authentizität dieser Ablagerungen in Zhoukoudian, weil durch verschiedene, weniger gut dokumentierte Grabungen unkontrollierte Umschichtungen erfolgt sein sollen [13].

Auch zur Datierung der Funde in Yuanmou findet man seit einiger Zeit kritische Anmerkungen. Nach [14] sollen die dort gefundenen Zähne „nur“ 500 000 bis 600 000 Jahre alt sein, was zeitlich auch besser zu den Theorien über die Verbreitung der Hominiden in Asien passen würde (siehe Tabelle 1).

Hunderttausende Jahre später hinterließ der Homo neanderthalensis bereits so ausgeprägte Feuerstellen, die den Schluss nahelegen, dass diese Menschen bereits vor mehr als 60 000 Jahren Feuer erzeugen konnten. Beweise dafür gibt es (noch) keine. Ausgrabungen z.B. in Krapina (Kroatien, nahe der Grenze zu Slowenien; Abbildung 2) liefern eigentlich nur sichere Indizien dafür, dass das Feuer zwischen 130 000 und 50 000 Jahre v. Chr. zwar genutzt, jedoch noch nicht nach Belieben erzeugt werden konnte [15].

### Schlagen, Bohren, Reiben

Die erstmalige Erzeugung von Feuer durch Menschen des Paläolithikums ist archäologisch noch unsicherer einzuschätzen als die Nutzung von Feuer. Natürlich

Tabelle 1

Ausgrabungen mit Hinweisen für die gezielte Nutzung von Feuer (z. B. Reste von Asche, Holzkohle, angebranntem Lehm neben Knochenfunden)	Historisches Zeitfenster (Jahre), nach zunehmendem Alter geordnet
Vertesszollo, Ungarn	166 000 - 250 000
Terra Amata, Frankreich	300 000 - 375 000
Olorgesailie, Kenya	375 000 - 460 000
l’Escale, Frankreich	450 000 - 550 000
Zhoukoudian, China	450 000 - 550 000
Gadeb, Äthiopien	1 125 000 - 1 200 000
Yuanmou, China	1 210 000 - 1 300 000
Karari Escarpment, Kenya	1 375 000 - 1 460 000
Chesowanja, Kenya	1 375 000 - 1 460 000
Swartkrans, Südafrika	1 600 000

ist es vorstellbar, dass die spaltende Formung von Steinwerkzeugen aus Silex einmal zu ersten Funken und durch Zufall in Kombination mit Pyrit bzw. Markasit-Knollen zur Fertigkeit des Feuerschlagens geführt hat. Das Schlagen von ausreichend heißen Funken aus Pyrit bzw. Markasit mit Hilfe des Feuersteins (Silex, flint) dürfte somit schon viel länger bekannt gewesen sein, als dies durch Ausgrabungen derzeit belegbar ist.

Zwei Feuersteine gegeneinander geschlagen, liefern zwar mitunter ebenfalls heiße Partikel, die Chance auf einen zündenden Funken ist aber minimal. Außer man reibt und schlägt Quarz mit natürlich vorkommenden Schwefel dazwischen, bis sich der Schwefel entzündet. In Alaska bzw. auf den Aleuten war das einmal der gängige Weg zum wärmenden Feuer [16].

Der Feuerstein (Flint, Silex) ist mineralogisch ein mit Opal durchsetzter Chalzedon (eingetrocknete Kieselgele  $\text{SiO}_2 \cdot n \text{H}_2\text{O}$  in mikrokristallinen Quarz  $\text{SiO}_2$ ), härter als Stahl und überdauerte unbeschadet viele Jahrtausende. Pyrit (Schwefelkies  $\text{FeS}_2$ ) bzw. die zum Feuerschlagen viel besser geeignete metastabile Form Markasit (als Knolle) ist jedoch nicht sehr verwitterungsbeständig, was das Auffinden von prähistorischen „Stein-Feuerzeugen“ naturgemäß sehr erschwert.

Auch die ältesten Werkzeuge zum Feuerbohren (Holz auf Holz) könnten längst verrottet sein. Sehr wahrscheinlich hat das Bohren von Löchern in Holz bei der Werkzeugherstellung ebenfalls einmal durch Zufall zu Rauch und Feuer geführt. Tatsächlich hat sich die Technik des Feuerbohrens mit Hilfe von Reibungswärme bei verschiedensten alten Kulturen von Australien bis Afrika bis in jüngste Zeit erhalten (Abbildung 3). Hinweise auf eine sehr frühe Anwendung dieser und anderer Holz-auf-Holz-Techniken (Feuerhobeln, Feuerpflügen, Feuersägen) sind in den älteren Ausgrabungsstätten des Homo sapiens natürlich nicht mehr zu finden.

Sichere Hinweise für die Erzeugung von Feuer in Form von Schlagspuren auf Pyrit und Markasit bzw. Flint finden sich in der etwa vor 40 000 Jahren in Europa erstmals auftretenden Cro-Magnon-Kultur des Homo sapiens sapiens, von der auch die vor 15 000 bis 10 000 Jahren in Frankreich entstandenen Höhlenzeichnungen und Kunstgegenstände aus Holz, Knochen und Ton stammen. Ähnliches gilt für die Aurignac-Kultur (35 000 - 29 000), benannt nach der Höhle von Aurignac im französischen Departement Haute Garonne [17].

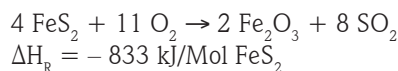
Etwa 10 000 Jahre alt ist der Eisenkies (Abbildung 4) aus einer belgischen Höhle (Cro-Magnon-Kultur) mit tiefen Schlagspuren durch den Feuerstein. Man könnte diese Knolle in Kombination mit einem scharfkantigen Flint und etwas getrocknetem Zunder (s. u.) als erstes, noch gut erhaltenes „Feuerzeug“ bezeichnen.

Aus chemischer Sicht erscheint die Funktion des Ur-Feuerzeugs in erster Näherung recht einfach: Durch das kräftige Schlagen mit dem härteren Flint



Abbildung 3: Feuerbohren bei den Aborigines (Bildquelle: II).

wird den kleinen abgeschabten Eisendisulfid-Partikeln soviel Aktivierungsenergie mitgegeben, dass diese teilweise in einer exothermen Reaktion kurz aufglühend oxidieren.



Je kleiner die abgeschlagenen Partikel sind, desto eher erreichen sie die notwendige Aktivierungsenergie. Kleinere Partikel erleichtern auch den Zutritt von Sauerstoff. Nach wenigen Schlägen macht sich tatsächlich der charakteristische Geruch nach oxidiertem Schwefel bemerkbar (Abschnitt *Experimente*). Weil

Abbildung 4: Teil eines ersten, gut erhaltenen „Feuerzeuges“ der Cro-Magnon-Kultur: Eisenkies-Knolle mit tiefen Feuerstein-Schlagspuren, Alter ca. 10 000 Jahre (Foto: Prideaux; Bildquelle: III).





Abbildung 5: Feuerstahl der Vikinger (800 - 1025) (Bildquelle: IV).

ein Teil der freiwerdenden Reaktionswärme auch von gasförmigen Reaktionsprodukten abgeführt wird, sind die Funken weniger heiß (und damit am Zunder weniger Erfolg versprechend) als die Funken aus Feuerstahl (siehe unten).

Während die archäologischen Beweise für das Feuerschlagen im späten Paläolithikum (bis etwa 10 000 v. Chr.), im Mesolithikum (bis etwa 6000 v. Chr.) und Neolithikum (bis ca. 2300 v. Chr.) durchgehend vorhanden sind, ist die Verwendung von Feuerbohrern (Holz auf Holz), noch nicht dokumentiert. Daraus schließen manche Archäologen, dass das Feuerschlagen zumindest in Europa die ältere Methode des Feuermachens ist [17].

Sicher scheint auch, dass das Erzeugen von Feuer auch für den Mann vom Hauslabjoch (ca. 3300 Jahre v. Chr.) noch immer mühsamer erschien, als das ständige Mittragen von konservierten Glutstücken vom jeweils verlassenen Lagerfeuer. Zu den geborgenen persönlichen Habseligkeiten des „Ötzi“ gehörte ein Behälter aus Birkenrinde, in dem sich Blätter des Spitzahorns und darin eingebettet Fichten- und Wacholderadeln mit Holzkohlefragmenten befanden [18].

In der Bronzezeit (etwa 2200 - 750 v. Chr.) werden die Belege über die Feuererzeugung mit Feuerstein

Abbildung 6: Feuerstahl (Mittelalter) mit Flint und Zunder (Bildquelle: V).



und Pyrit seltener. Möglicherweise wurde das Feuerbohren zu dieser Zeit in manchen Regionen populärer [19].

In der römischen Eisenzeit (0 - 400 n. Chr.) ist das Feuerschlagen aber wieder bestens dokumentiert. Es tauchte anstelle des Pyrits der häufig stabförmige, leicht gebogene bzw. auch ovale Feuerstahl auf, den man am Ledergürtel mittragen konnte (Abbildung 5).

In Gräbern aus der Zeit um 500 n. Chr. fand man z. B. Ledergürtel, an denen Beutel mit Utensilien zum Feuermachen zusammen mit dem Feuerstahl befestigt waren [20].

Die Funkenbildung geschieht beim Feuerstahl ähnlich wie beim Pyrit bzw. Markasit: Mit dem härteren, scharkantigen Flint können durch das Schlagen in diesem Fall kleinste Eisenpartikel abgeschabt werden. Die große Reibungswärme liefert die Aktivierungsenergie für die kleine Partikelmasse, die große Oberfläche sorgt für den Zutritt von Luftsauerstoff, das Eisenpartikelchen verbrennt zu Eisenoxid. Ein heißer Funke entsteht, den man auf gut anglimmendes Material (Zunder) bringen kann. Da bei der Oxidation von Eisen kein Gas gebildet wird, mit dem ein Teil der Energie abtransportiert werden könnte, ist der Funke heißer (sichtbar heller) als der Funke generiert aus Markasit, obwohl die freigesetzte Energiemenge (ausgehend von der Molmasse auf die gleiche Partikelmasse bezogen) ziemlich ähnlich ist:

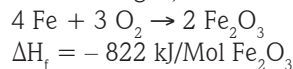


Abbildung 7: Alte Zunderbüchse aus Messing mit integrierter Brennlinse, Feuerstahl, Flint und Zunder, d. h. angekohlte Faserstoffe, bzw. Holzkohle (Bildquelle: VI).





Abbildung 8: Tinder pistol. "J. SAVIGE / W. HAMPTON"  
(Zunderpistole 18. Jahrhundert; Bildquelle: VII).

In der germanischen Eisenzeit (bis 800 n. Chr.) erhielt der Feuerstahl die ovale bzw. eingerollte Form, die sich über viele Jahrhunderte bis ins 19. Jht. hielt (Abbildung 6).

Sowohl die Funken von Eisendisulfid als auch die vom Feuerstahl sind sehr vergänglich und müssen in kurzer Distanz auf eine gut anglimmende Unterlage, den „Zunder“, gebracht werden (Abbildung 7; siehe auch Abschnitt *Experimente*).

Als Zunder zum Anzünden (!) wurden verschiedene in der Natur vorkommende Faserstoffe verwendet: Das bereits bei Plinius (siehe oben) genannte Mark des mediterranen Riesenfenchels (*ferula communis*) gehörte genauso dazu wie der (Flug-)Samen des Rohrkolbens und der Distel. Verkockte (angekohlte) Leinenstückchen waren ebenso in Verwendung. Die besten Resultate erhält man jedoch mit entsprechend präparierten Teilen des echten Zunderpilzes (*fomes fomentarius*), der auf abgestorbenen Buchen- und Birkenstämmen wächst. Unter der holzigen Kruste dieses parasitären Pilzes befindet sich die Zunderschicht (Trama), die von Kruste und Röhrenmaterial abgetrennt wird. Der so gewonnene schwammige Lappen wurde früher einige Wochen in Urin gelegt. Der oxidative Abbau von Harnstoff führte zu einem gewissen Gehalt an sauerstoffspendendem Nitrat. Anschließend wurde der noch feuchte Lappen solange geklopft, bis man einen dünnen, lederartigen Flecken erhielt, der dann getrocknet und leicht angekohlt werden musste. Nur die angekohlten Stellen beginnen offensichtlich leicht zu glimmen [21].

Obwohl im 19. Jahrhundert längst andere Formen der Feuererzeugung erfunden waren (siehe oben bzw. [1]), spielten Zunder, Pyrit und Feuerstahl weiterhin noch eine wichtige Rolle. Insbesondere bei den so genannten „Zunder-Pistolen“ (tinder pistols; Abbildung 8), aber auch bei den Lunten-Feuerzeugen (Abbildung 9 und 10), die man als Sturmfeuerzeuge der ersten Stunde bezeichnen könnte, funkte es wie in uralten Zeiten. Beide Feuerzeug-Typen sind in Anlehnung an historische Waffentechniken entwickelt worden.

Seit Anfang des 14. Jahrhunderts kannte man in Europa das Schießpulver und benutzte es leider auch für Feuerwaffen. [22].

Es war deshalb naheliegend, den Zünd-Mechanismus von Steinschlosspistolen für ein repräsentatives Feuerzeug zu verwenden. Alte und beschädigte Stein-



Abbildung 9: Luntenfeuerzeuge 19. Jht. mit Flint und Feuerstahl, bzw. imprägnierter Lunte (Bildquelle: VIII).

schlosspistolen wurden zu diesem Zweck etwa ab Mitte des 17. Jahrhunderts einfach umgebaut. Der verkürzte Lauf wurde nur mehr als Vorratsgefäß für den feuchtigkeitsempfindlichen Zunder verwendet. Der Hahn mit dem eingeklemmten scharfkantigen Flint – von dem sich übrigens auch der Name Flinte ableitet – wurde nach Auslösen des Abzugs durch eine Feder gegen den sich öffnenden Pfannendeckel geschleudert. Dabei schabte der Flint an dem geriffelten Eisen, Funken trafen auf die vormalige Pulver-Pfanne, in der sich bei der Zunderpistole nicht Schießpulver sondern Zunder befand. Tischfeuerzeuge dieser Art erhielten einen Standfuß, „Taschenfeuerzeuge“ wurden einfach wie eine Pistole transportiert (Abbildung 8).

Die „Luntenfeuerzeuge“ traten erstmals im späten 19. Jht. auf und hielten sich in manchen Ländern (mit Cereisen-Zündsteinen) bis heute als funktions-sichere „Sturmfeuerzeuge“. Das Prinzip ist von den primitiven Luntenschloss-Feuerwaffen des 15. Jhts. abgeleitet. Anstelle des Zunders oder der angekohlten Leinenstückchen diente eine präparierte Lunte zum Fangen der erzeugten Funken. Bei den Luntenschloss-Vorderladern fungierte ursprünglich eine mit „Bleizucker“ (= Bleiacetat) imprägnierte Hanfschnur, die nach dem Anglimmen im gewünschten Moment

Abbildung 10: „Modernes“ Outdoor-Lunten-Feuerzeug mit Stahlreibrad und Cereisenfeuerstein (Bildquelle: IX).



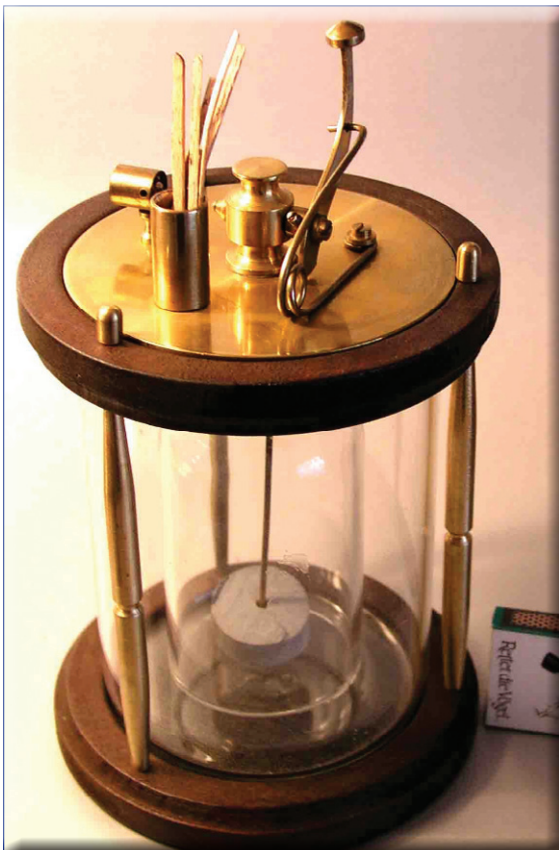


Abbildung 11: Pneumatisches Feuerzeug um 1820 Hessisches Landesmuseum Darmstadt (Bildquelle X).

durch einen einfachen Abzugmechanismus mit dem Pulver auf der Pfanne in Kontakt gebracht wurde. Später wurde die Lunte mit Salpeter imprägniert, um ein verlässlicheres Glimmen bis zur Betätigung des Abzuges zu gewährleisten. Dieses Glimmen der nitrat-hältigen Lunte führte in der näheren Umgebung zu einem unverkennbaren Geruch, sodass ein Hinterhalt unter Umständen vorzeitig entdeckt wurde, weil man eben „Lunte gerochen“ hat. Bei den „Lunten-Feuerzeugen“ (tinder lighter) werden Funken (von Flint und Feuereisen, bei moderneren Sturmfeuerzeugen von Cereisen-Mischmetall und Stahlrädchen) auf die präparierte Lunte gebracht (Abbildung 10).

An den aufglimmenden Lunten von sterlingsilber-schimmernden Dunhill-Sturmfeuerzeugen z. B.

Abbildung 12: Döbereiner Feuerzeug: Nach Öffnen des Hahnes strömt Wasserstoff auf Platinschwamm und entzündet sich.



wurden noch im 2. Weltkrieg unzählige Zigaretten entzündet, ohne dass kräftiger Wind das Suchtverhalten hätte beeinflussen können. Auch der nächtliche Standort der Soldaten war von lauernden Scharfschützen nicht ganz so leicht auszumachen, weil es bei dieser Art des Feuerzeugs kein helles Aufflammen gibt („Foxhole Lighter“).

Die wohldosierte Präparation (Nitrierung) der Lunte ist essentiell: Die Lunte darf nur glimmen, solange sie dem Luftsauerstoff ausgesetzt ist.

Flint, Feuerstahl, Luntenfeuerzeuge etc. scheinen heute eine gewisse Renaissance zu erleben: Freaks archaischer Survival-Techniken können das zugehörige Equipment heute wieder käuflich erwerben [23].

Im 18. und 19. Jahrhundert gab es etliche Ansätze, das Prinzip von Flint und Feuerstahl zur Feuererzeugung zu umgehen. Abgesehen von der Entwicklung der verschiedenen Reib- und Zündhölzer [1], wurden unterschiedlichste Konzepte entwickelt, mit denen ebenfalls eine Reihe von naturwissenschaftlichen Gesetzmäßigkeiten auf schulischer Ebene diskutiert werden können.

Das Prinzip des Pneumatischen Feuerzeuges (Kompressions- oder Luftfeuerzeug), das um 1770 von DuMontier erfunden wurde, ist relativ einfach, die technische Ausführung erforderte aber einiges an handwerklichem Können (Abbildung 11). Ein Patent zur Erzeugung derartiger Feuerpumpen wurde in England im Jahr 1807 erteilt [24].

Eingeschlossene Luft in einem dickwandigen Glas- oder Metall-Zylinder wurde durch ein kräftiges und rasches Niederdrücken eines Kolbens so stark (adiabatisch) erhitzt, dass sich ein im Zylinder platziertes Stück Zunder (bzw. Watte etc.) entzündet hat. (siehe auch experimenteller Teil). Die „Firesyringe“ konnte sich in den Haushalten damals wie heute nicht durchsetzen und findet sich in dieser Form höchstens noch als „Mollets Pumpe“ in physikalischen Lehrmittelsammlungen und (amerikanischen) Lehrmittelkatalogen [25].

Es ist sehr wahrscheinlich, dass Rudolf Diesel derartige Feuerpumpen bereits bestens studiert hatte, bevor er daran ging, seinen Dieselmotor zu entwickeln, der im Jahr 2009 wegen des Kleinwagen-Booms mit 30,6 % ein Absatztief bei den Neuzulassungen hatte (2008: 44,1%).

Nach der Entdeckung von Wasserstoff durch Cavendish im Jahr 1766 kamen sehr bald feuererzeugende Geräte in Mode, die dieses leicht brennbare Gas als Brennstoff nutzten und als „Gasfeuerzeuge der ersten Stunde“ bezeichnet werden könnten.

Seit 1780 sind die „Fürstenberger Feuerzeuge“ von Johannes Fürstenberger (Basel) bekannt, in denen mit Hilfe von Zink und Schwefelsäure Wasserstoff generiert wurde, der sich (offensichtlich ähnlich dem Kippischen Apparat) unter Verdrängung der Säure in einer Glaskuppel sammelte und durch einen Hahn entnommen werden konnte. Ein geladener Elektrophor (die Urform der Influenzmaschine, entwickelt von Ales-





Abbildung 13:  
Österreichische  
Gedenkmarke zu  
Ehren von Auer v.  
Welsbach.

sandro Volta) lieferte einen elektrostatischen Funken, an dem sich der Wasserstoff entzünden konnte. [26, 27]. Die Pizenberger Zündmaschinen, bei denen der Elektrophor bereits in dekorativen Fußgestellen untergebracht war, arbeiteten nach dem gleichen Prinzip [28].

Wasserstoff, Zunder, aber auch erstmals Benzin wurden bei den Mitte des 19. Jhts. aufkommenden „Galvanischen Feuerzeugen“ entzündet. Die Aktivierungsenergie dazu lieferte ein heißer Platindraht, der mit galvanisch erzeugtem Strom (Kupfer, Zink, Schwefelsäure) zum Glühen gebracht wurde (Luigi Galvani (1737-1798).

Die mit Wasserstoff betriebenen Feuerzeuge wurden von Johann Wolfgang Döbereiner (1780-1849) in bezug auf den Zündmechanismus entscheidend verbessert (Abbildung 12). Bei systematischen Untersuchungen des Platins hat der Jenaer Chemieprofessor im Jahr 1823 entdeckt, dass ein Wasserstoff-Luft-Gemisch entzündet, wenn man es gegen Platinschwamm strömen lässt. Berzelius als bekanntester Chemiker seiner Zeit bezeichnete diese Entdeckung „als die in jeder Hinsicht wichtigste und brillianteste Entdeckung des Jahres“, ein englischer Fabrikant bot ein kleines Vermögen für die Rechte, aber Döbereiner ließ sich nicht davon abhalten, seine Entdeckung „zum Eigenthume der ganzen Welt zu machen und um dadurch dieser und der Wissenschaft seine Huldigung darzubringen.“ Fast alle Zeitungen der Welt druckten seine Veröffentlichung nach und die Produktion der Döbereiner Feuerzeuge ließ sogar einen kleinen Industriezweig entstehen [29].

Nach der Etablierung der im Jahr 1844 von G. E. Pasch erstmals beschriebenen Sicherheitszündhölzer [1] unterschied das Berliner „Universal Konversations Lexikon“ im Jahr 1894 vier Arten von Feuerzeugen: „1. mechanische mit Feuerstein und Stahl, 2. chemische, nämlich das Platin- und das Phosphor-Feuerzeug, 3. pneumatische wie z. B. Mollets Pumpe; 4. Elektrische mittels Galvanophor, Elektrophor...“

Bereits vor Beginn des 20. Jahrhunderts zeichneten sich grundlegende Neuerungen bei den Gerätschaften zur Feuererzeugung ab: Die Vorteile von speziellem

Feuerzeug-Benzin als Brennstoff wurden seit Mitte des 19. Jhts. immer häufiger genutzt. Die etwa ab 1885 vertriebenen Zündbandfeuerzeuge (Magic Pocket Lamp) funktionierten mit Zündplättchen, die in Papier oder in ein Seidenband eingearbeitet waren. Die Zündplättchen bestanden aus rotem Phosphor und Kaliumchlorat, explodierten auf Schlag und setzten mit der kleinen Stichflamme einen benzingetränkten Docht in Brand. Die Zündbandrolle („Amorces-Band“) wurde in das Feuerzeug eingelegt und wie bei der heutigen Spielzeugpistolen weitertransportiert. Amorcesbänder aus Papier gibt es noch heute.

Revolutioniert wurde die Feuerzeugindustrie durch die Erfindung des Cereisen-Mischmetalls als äußerst effizienten Zündstein durch den Österreicher Carl Auer v. Welsbach (Abbildung 13). Der in Wien im Jahr 1858 geborene Erfinder des Gasglühstrumpfes, der Metallfadenlampe und Entdecker von 4 Elementen (Neodym, Praseodym, Ytterbium, Lutetium) meldete im Jahre 1903 das Cereisen-Mischmetall als pyrophore Legierung zum Patent an (siehe CLB 10-2008, S. M74 - M78). Bereits im Jahr 1907 wurden die Treibacher Chemischen Werke GesmbH zur Produktion dieser Legierung gegründet. Schon 1929 erreichte die Weltproduktion von Cereisen etwa 100 000 kg [30]. Cermischmetall wird aus Monazitsand gewonnen.

Cereisenmischmetall besteht aus etwa 30% Eisen und 70% „natürlichem“ Cermischmetall (45-60% Cer, 15-30% Lanthan, 10-20% Neodym, 4-6% Praseodym, 1-2% Samarium, 0,5-1% Yttrium u. als Verunreinigungen häufig noch Fe (0,5-1%), Si, C, P, Mn, Mg) [31]. Cereisen stellt beim Reiben mit einem geriffelten Stahlrädchen eine sehr ergiebige Funkenquelle dar, denn die abgeriebenen Partikel sind an der Luft ab 150°C (Reibungswärme!) selbstentzündlich. Reines kompaktes Cer verbrennt bereits beim Erhitzen mit reinem Sauerstoff auf etwa 150 °C noch heller als Magnesium [31].

Die mit dem Reibrad erzeugten Funken glühen mit Temperaturen von 1200° C bis 2000°C. Standardzündsteine aus Auer-Metall sind heute stranggepresste zylindrische Stäbchen mit einem Durchmesser von 1,9 bis 20 mm [50]. Zum Schutz gegen Oxidation und Zerfall werden sie mit einer (meist goldfärbigen) Lackschicht überzogen [32].

Zu den ersten, damals noch mit großen Auer-Zündsteinen ausgerüsteten Feuerzeugen zählten die dekorativen „Frack-Anzünder“. Diese kleinen Statussymbole aus Silber und Messing waren ab etwa 1880 (noch ohne Cereisen) am Markt und wurden zu festlichen Anlässen (eben mit Frack an der Uhrkette) getragen. Sie hatten häufig die Form eines Büchleins, bei dem seitlich der ca. 20 bis 30 mm lange Zündstein eingepasst war (Abbildung 14). Der benzingetränkte Docht befand sich im Griffel in einem Stahlröhrchen eingebettet. Mit diesem Stahlröhrchen wurde über den Zündstein gestrichen. Nach Gebrauch wurde der Griffel samt Röhrchen in das Feuerzeug zurückgesteckt, wo sich der Docht in einem benzingetränkten



Abbildung 14: „Frack-Anzünder“ – Treibacher Feuerzeug: Ein mit Benzin getränkter Docht im Stahlröhrchen, das über den seitlich am Behälter angebrachten Auer-Zündstein gestrichen wurde, entzündete sich. (Bildquelle: XI).

Wattetank wieder vollsaugen konnte. Die Streich- bzw. Schlagzündung mit Auerzündsteinen war sehr populär und konnte bis in die 30er Jahre neben den bereits 1906 aufkommenden Hartmetall-Reibrädchen bestehen.

Die Tatsache, dass Methanol-Dämpfe sich an der Luft in Kontakt mit Pt-Schwamm entzünden, wurde in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts in einem kleinen Marktsegment beim Platin-Feuerzeug (Methanol-Feuerzeug) genutzt, das sich aber nicht durchsetzen konnte. Nach dem Öffnen dieses Feuerzeugs wurden am Deckel befestigte Pt-Schwammpillen über den gasenden Wattetank gehalten. Das Platin begann zu glühen und entzündete das Methanol. Auch ein Gemisch mit überwiegendem Ethanol-Anteil wurde Anfang des 20. Jahrhunderts als Brennstoff vorgestellt: Es gab ein (Damen-) Feuerzeug, das mit Eau de Cologne betrieben werden konnte. Echtes Kölnisch Wasser (4711) ist eine Lösung von verschiedenen wohlrie-

Abbildung 15: Prestige-Feuerzeug: Zippo aus purem Gold, Preis fast 2000 Euro (Bildquelle: XII).



chenden etherischen Ölen (2-5%) in verd. Ethanol (80-90%).

Benzinfeuerzeuge sind heute fast vollständig von Gasfeuerzeugen verdrängt worden. Nur das „Zippo“, ein Kultfeuerzeug, das seit 1932 in Form und Technik fast unverändert produziert wird, hat sich entgegen dem Trend zum Wegwerf-BIC nicht nur in Sammlerherzen eine Marktnische bewahren können (Abbildung 15). Über 300 Millionen Zippos in verschiedensten Sammlervarianten sind derzeit im Umlauf [32, 33].

Gasfeuerzeuge waren in Deutschland und Frankreich bereits Mitte der 30er Jahre entwickelt worden. Sie kamen aber aus wirtschaftlichen Gründen erst nach dem 2. Weltkrieg (1947) auf den Markt [26, 27]. Im Jahr 1957 stellte Rowenta das erste Gasfeuerzeug mit Isobutan-Butan anstelle von Benzin vor und 1964 funkte erstmals ein Gasfeuerzeug der gleichen Marke mit elektronischer Batteriezündung (eingebautem Zündkondensator, Hochspannungstrafo...). Diese Technik ermöglichte auch die Konstruktion von Lichtschranken- bzw. Sensorfeuerzeugen, bei denen der Hochspannungsfunke durch Berühren eines Sensorknopfes bzw. durch Unterbrechung einer Lichtschranke ausgelöst wird. Nach [32] stellte Rowenta 1968 das weltweit erste Piezofeuerzeug vor, obwohl es entsprechende Patente in Japan und in den USA bereits seit 1962 gegeben hatte [26, 27].

Von der ersten Publikation über piezoelektrische Phänomene und kristallographische Strukturen im Jahr 1880 durch Piere und Jacques Curie bis zur ausgeklügelten Piezokeramik war es ein weiter Weg.

Über diese Entwicklung im allgemeinen bzw. über verschiedene Aspekte von Gasfeuerzeugen und deren experimentellen Möglichkeiten im besonderen soll in einem Teil II dieser Publikation berichtet werden, damit die bisher gelieferten Fakten noch mit etlichen praktischen Anregungen für den experimentellen Chemieunterricht ergänzt werden können.

Abbildung 16: Funkenschlagen aus Pyrit.



## Experimenteller Teil

### Funkenschlagen aus Pyrit

Metastabiler, fein strukturierter Markasit liefert beim Funkenschlagen viel bessere Ergebnisse als Pyrit. Leider ist Markasit selbst in Mineraliensammlungen nicht vor einem Zerfall gefeit: Deshalb wird im folgenden Modellversuch Pyrit zum Funkenschlagen vorgeschlagen (Abbildung 16), weil dieses auffällige Mineral in den meisten Mineralienshops vorrätig ist. Um den Pyrit beim Feuerschlagen sicher halten zu können, sollte die Oberfläche des Minerals nicht zu klein sein (ab 100 g Masse). Beim Funkenschlagen aus Pyrit ist eine Eisenfeile wesentlich einfacher zu handhaben als ein scharfkantiger Feuerstein (Silex). Wenn man Pyrit und Feile mit einem Brenner kurz vor dem Feuerschlagen partiell etwas erhitzt (mit dem Quicktemp 826-T4 IR-Thermometer berührungslos gemessen etwas über 150°C), besitzen mehr abgeschürfte Partikel die Mindestenergie für ein Verbrennen mit Luftsauerstoff als beim Schlagen im kalten Zustand. Es funkt öfter.

*Material:* Pyrit, Feile, Brenner

*Durchführung:* Das Mineral wird zwischen zwei Fingern so gehalten, dass möglichst fein strukturierte Bereiche (keine großen Kristallflächen!) mit der flachen Feile schürfend geschlagen werden können. Dabei wird mit der Feile kein ständiger Kontakt mit dem Mineral (wie beim Feilen) hergestellt. Es müssen vielmehr winzige Partikel mit möglichst großer Geschwindigkeit und relativ geringem Anpressdruck aus dem Mineral herausgeschlagen werden. Nur bei gezielt und punktuell zugeführter Aktivierungsenergie (Reibungswärme) oxidieren die abgeschürften Partikeln unter Funkenbildung.

*Anmerkung:* Die Chance, mit diesen Funken selbst präparierten Zunder zum Glimmen zu bringen ist eine Frage der Zeit und des verfügbaren Zunders. Eigene Recherchen haben ergeben, dass heutzutage selbst in extensiv bewirtschafteten Buchenwäldern nur sehr selten brauchbare (größere) Exemplare des echten Zunderschwamms zu finden sind. Als Modellversuch zur Feuererzeugung soll deshalb das Schlagen der Funken ausreichend sein.

#### Nachweis von Schwefel in Pyrit

Die Untersuchung von Pyrit auf den Gehalt an Eisen und Schwefel ist bei [34] ausführlich beschrieben. Pyrit-Kristalle sind leider relativ teuer. Deshalb soll an dieser Stelle ergänzend zu [34] eine zeitsparende Microscale-Methode zur Untersuchung von Pyrit vorgestellt werden, bei der nur geringe Mengen des Minerals (an einer unscheinbaren Stelle) abgefeilt werden müssen.

*Material:* Pyrit, (Mini-Elektro-)Feile, Blatt Papier, Spatel, Mikrobrenner, Reagenzglas Borosilicat 10/75mm, Wäscheklammer aus Holz als Reagenzglashalter.

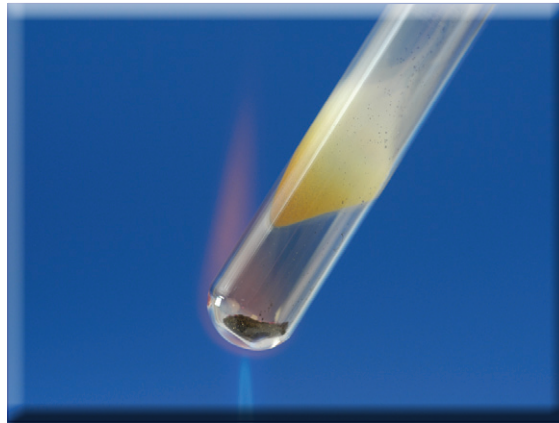


Abbildung 17: S-Nachweis: Erhitzen von Pyrit-Pulver – gelber Schwefel setzt sich ab.

*Durchführung:* Es wird eine geringe Menge Pyrit abgefeilt bzw. abgeschliffen, wobei man die weniger schön kristallisierten Bereiche des Minerals nutzt. Das schwarze Material wird auf einem Blatt Papier gesammelt. Zu einer Rinne gefaltet hilft es, das gesammelte Pulver quantitativ ins kleine Reagenzglas zu befördern. Erhitzt man das Pulver mit dem Mikrobrenner, so setzt sich an den kälteren Flächen des Reagenzglases bald ein gelbliches Resublimat ab (Abbildung 17).

#### Nachweis von Sulfid nach dem Erhitzen von Pyrit

Während das vom Pyrit abgeschabte schwarze Pulver als Disulfid mit Salzsäure noch nicht reagiert, bildet das kurz erhitze Produkt Schwefelwasserstoffgas, das sich auf einem mit Kupfersulfatlösung getränktem Wattestäbchen als schwarzes Kupfersulfid niederschlägt.

*Material:* Schwarzer Rückstand aus Versuch *Nachweis von Schwefel in Pyrit*, Salzsäure (10%ig), Kupfersulfat-Lösung (5%ig), Wattestäbchen, Pasteurpipette mit Sauger, Reagenzglas 10/75, Mikrobrenner.

*Durchführung:* Der kurz erhitze Rückstand aus Versuch *Nachweis von Schwefel in Pyrit* wird im Minireagenzglas mit zwei Tropfen Salzsäure (10%ig) versetzt. Ein mit Kupfersulfatlösung getränktes Wattestäbchen wird in das Reagenzglas gehalten. Es bildet sich augenblicklich schwarzes Kupfersulfid.

#### Modellversuch zur Funkenbildung:

##### Verbrennung von Pyrit in reinem Sauerstoff

Erhitzt man den pulverförmigen Rückstand von Versuch *Nachweis von Schwefel in Pyrit* kräftig und düst aus einer 20mL-Spritze mittels Nadel reinen Sauerstoff auf das stark erhitze Material, so verbrennt das noch vorhandene Sulfid mit starker Funkenbildung zum Oxid. Die geringe Menge Sauerstoff wird am besten mittels Low-Cost-Gasentwickler durch katalytische Zersetzung von Wasserstoffperoxid an Braunstein-Katalysatortabletten hergestellt [35,36].



Abbildung 18:  
Funkensprühende Oxidation von erhitztem Pyrit-Abrieb in reinem Sauerstoff.

Im Reagenzglas, das dabei zerstört wird, bildet sich letztlich rotes Eisen-III-oxid.

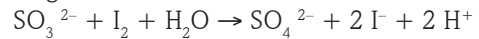
*Material:* Rückstand von Versuch *Nachweis von Schwefel in Pyrit*. in einem Minireagenzglas, Wäscheklammer aus Holz als billigen und perfekt passenden Reagenzglashalter, Mikrobrenner, 20mL-Spritze, gefüllt mit reinem Sauerstoff

*Durchführung:* Der Rückstand von Versuch *Nachweis von Schwefel in Pyrit* wird mit dem Mikrobrenner kräftig erhitzt. Nun düst man aus der 20mL-Spritze reinen Sauerstoff auf die erhitzte Masse. Das Sulfid verbrennt mit heftiger Funkenbildung zum Oxid (Abbildung 18).

#### Nachweis von Schwefeldioxid beim Rösten von Pyrit und nach der Verbrennung von Pyrit in reinem Sauerstoff

Bei der Reaktion von Eisensulfid mit Sauerstoff entsteht Schwefeldioxid und Eisen-III-oxid. Schwefeldi-

oxid wirkt auf elementares Iod in wässriger Lösung reduzierend. Auf einem angefeuchteten Wattestäbchen entsteht Hydrogensulfid bzw. Sulfit, das mit Iod reagiert:



Ein Wattestäbchen, getränkt mit Iod-Kaliumiodid-Lösung wird entfärbt, wenn man es in das Reagenzglaschen hält, in dem der Versuch *Verbrennung von Pyrit in reinem Sauerstoff* durchgeführt wurde. Auf diese Weise kann Schwefeldioxid im Röstgas in geringen Spuren detektiert werden, ohne dass es dabei zu einer Geruchsbelästigung kommt

*Material:* Reagenzglas mit Rückstand aus Versuch *Verbrennung von Pyrit in reinem Sauerstoff*, Iod (krist.), Kaliumiodid, dest. Wasser, Wattestäbchen, Becherglas (25 mL).

*Durchführung:* Einige Kristalle Iod werden mit Hilfe von etlichen Kristallen Kaliumiodid in einem kleinen Becherglas in wenig Wasser komplex gelöst. Zwei Wattestäbchen werden mit dieser Lösung getränkt. Ein Stäbchen taucht man tief in das Reagenzglaschen, in dem kurz zuvor Pyrit in reinem Sauerstoff abgeröstet wurde. Das braune Iod wird zu farblosem Iodid reduziert (Abbildung 19).

#### Funkenschlagen aus Feuerstahl und Silex

Feuerstahl und Feuerstein gibt es für spartanische Outdoor-Freaks im Online-Versandhandel [23]. Während man mit einer Feile vom käuflichen Feuerstahl keine heiß glühenden Partikel abschlagen kann, gelingt dies mit dem scharfkantigen Flint recht gut.

*Material:* Feuerstahl, Silex, ev. Pyrowatte als „Zunder“.

*Durchführung:* Man hält den Feuerstahl so, dass man mit der scharfen Kante des Feuersteins im sehr flachen Winkel feinste Späne abschlagen kann, die bei genügend Aktivierungsenergie an der Luft verbrennen. Das Entfachen von Feuer mit diesen Funken gelingt modellhaft mit etwas Geduld und Pyrowatte. Mit dem kurzen Flash der Pyrowatte lassen sich dann auch Feuerzeugbenzin-Dämpfe entzünden, wenn ein

Abbildung 19: Detektion von Schwefeldioxid nach dem Erhitzen von Pyritpulver in reinem Sauerstoff: Schwefeldioxid reduziert Iod zu farblosen Iodid.

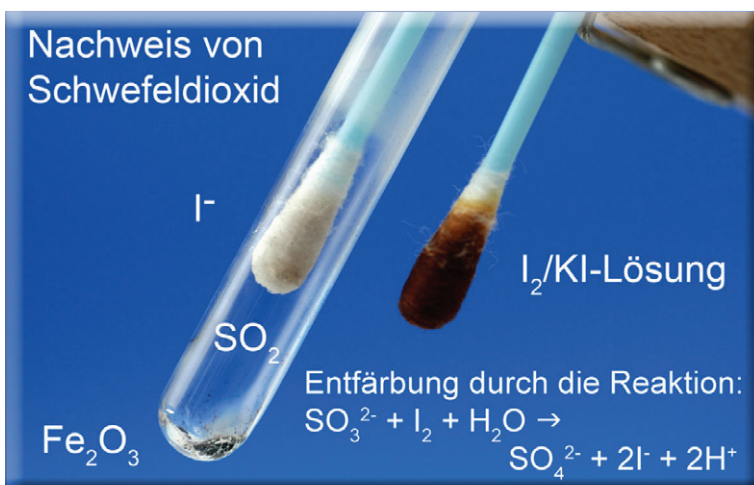


Abbildung 20: Funken aus Feuerstahl.

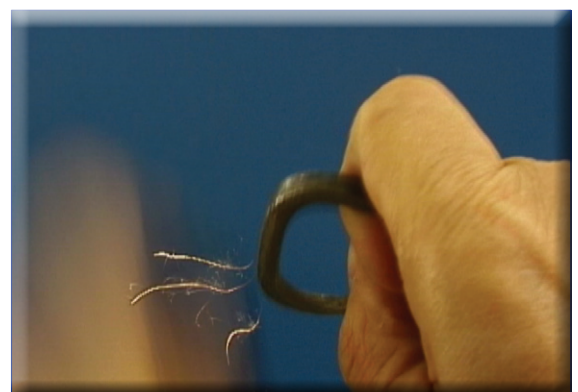




Abbildung 21: Feuerbohren mit Bohrmaschine, Hartholzdübel und Weichholzstück.

Stück Benzin getränkte Baumwollwatte daneben positioniert ist (Abbildung 20).

#### Feuer durch Bohren (Fire drills)

Reibholzmethoden waren weltweit verbreitet. Sehr ausführlich beschrieben sind die verschiedenen Varianten in [37]. Das Prinzip des Feuerbohrens ist einfach. Ein hölzerner Bohrstock wird auf unterschiedliche Weise (nur mit den flachen Händen, mit Hilfe von Bändern, mittels Schnurbogen) möglichst rasch in einem Bohrloch hin und her gedreht und angepresst. In einem präparierten Schlitz des Bohrloches sammelt sich feinstes Bohrmehl, das bei entsprechender Reibungswärme zu Glimmen beginnt (nach [37] bei etwa 290-340°C). Wie mühsam die Methode ist und war, kann man erahnen, wenn man zum Drehen des Holzbohrers im Modellversuch moderne Hilfsmittel einsetzt. Mittels Bohrmaschine mit entsprechender Drehzahl (kein Akkuschauber!) lassen sich mit einem eingespannten Hartholzdübel in einem Bohrloch Temperaturen erzeugen, wo bereits eine deutliche Rauchentwicklung auftritt. Zum Glimmen bringt man das schwarze Bohrmehl allerdings mit dieser Methode noch nicht.

*Material:* 10 mm Hartholzdübel (Baumarktware), Bohrmaschine, Bohrfutterschlüssel, Weichholzbrett.

*Durchführung:* Der Hartholzdübel (Durchmesser 1 cm) wird in das Bohrfutter der Maschine eingespannt und auf das Weichholzstück aufgesetzt. Bei hoher Drehzahl und entsprechendem Anpressdruck bildet sich eine Vertiefung, aus der nach kurzer Zeit dichter Rauch aufsteigt (Abbildung 21).

#### Feuer durch Druck (Fire syringes, Fire piston)

Die Ursprünge der auch später in Europa erzeugten Feuerpumpen (DuMontier, 1770, siehe oben) sind wahrscheinlich im Raum Burma, Malaysia, Indochina,

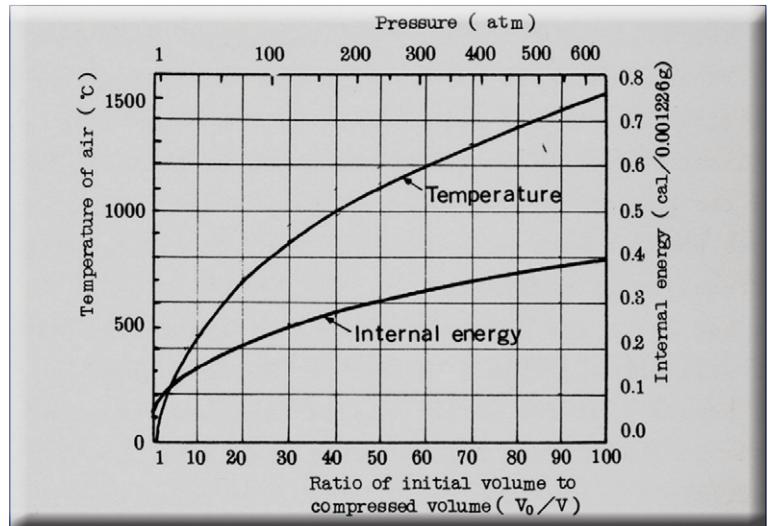


Abbildung 22: Änderung der Temperatur und inneren Energie von Luft bei Druckerhöhung [38].

Philippinen zu finden [37] und bestanden zur Gänze aus exakt gearbeitetem Holz.

Das Prinzip ist wieder einfach: Bei möglichst adiabatischer Kompression von Luft erwärmt sich diese beträchtlich: Verdichtet man die Luft in einem Kolben auf ein Fünftel, so steigt die Temperatur auf 285°C, verdichtet man auf ein Zehntel beträgt die Temperatur bereits 463°C.

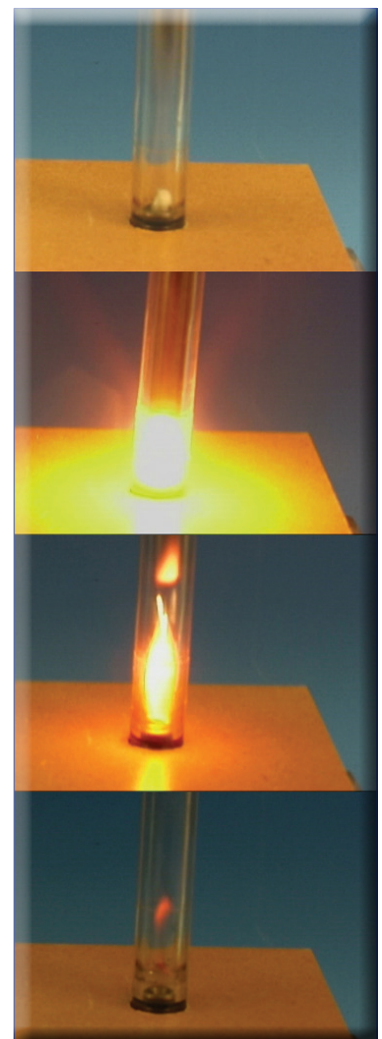
Erhöht man den Druck von 1 bar auf 20 bar (mit 5% des ursprünglichen Volumens), resultieren daraus rechnerisch 698°C (bei einer Ausgangstemperatur von 20°C; Abbildung 22).

Das Prinzip dieser starken Erwärmung wird bei modernen Dieselmotoren genutzt. Direkt einspritzende Dieselmotoren weisen ein Verdichtungsverhältnis von 24 bis 30:1 auf.

*Material:* Fire piston (fire syringe), zu beziehen z.B. bei opentip: Fire Syringe Kit, Onlinshop 101 First Street Cambridge, MA 02141 (\$ 34,30 exkl. shipping) [39] oder bei American Educational Products LLC [40] (um \$ 41,25 (exkl. shipping); Pyrowatte (10 g um 8,40 € exkl. Porto, Bezugsquelle: Jedinat Zaubershop, D-51503 Rösrath [41].

*Durchführung:* Ein winziges Stück Pyrowatte (3 mm Durchmesser) wird auf dem Stahlzylinder der

Abbildung 23: Feuerpumpe Filmbilder.



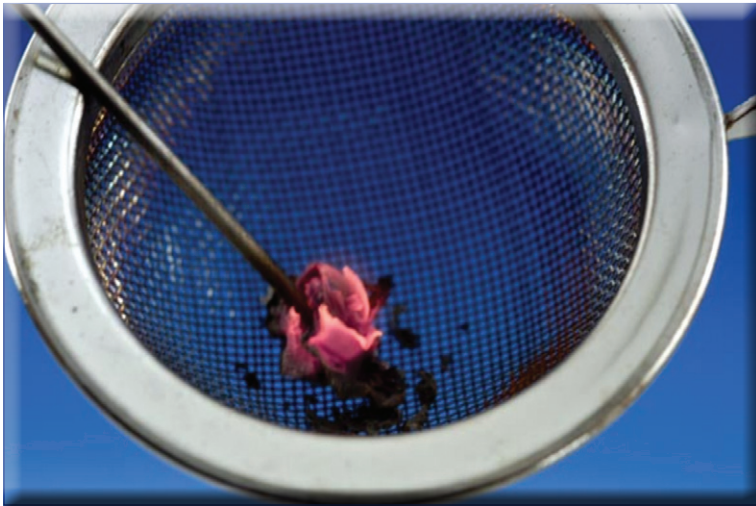


Abbildung 24:  
Wasserstoff  
brennt am  
Pt-Katalysator.

geöffneten Feuerpumpe positioniert. Der Pumpenzylinder wird bei ausgezogenem Stempel aufgesetzt. Durch rasche Kompression lässt sich die Pyrowatte leicht zünden. Vorsicht! Man beginnt mit möglichst winzigen Pyrowatte-Stücken, um die Wirkung der Deflagration auf den Kolben zu testen. Erst wenn man sicher ist, dass der wieder hoch geschleuderte Stempel noch unter Kontrolle ist, kann man die „Dosis“ etwas steigern. (Abbildung 23).

Das Zünden gelingt auch mit normaler Watte, die den Fire-Pistons beigelegt sind. Weit besser visualisierbar und viel verlässlicher funktioniert das Experiment allerdings mit Pyrowatte.

#### Modellversuch zum Döbereiner-Feuerzeug

Wasserstoff entzündet sich an feinst verteiltem Platin, das aus geringen Mengen Hexachloroplatin(IV)-säure einfach selbst hergestellt werden kann, indem man ein mit Platinat-Lösung getränktes Stück Papiertaschentuch in einem Teesieb (Teebrüher) verascht [42].

*Material:* Hexachloroplatin(IV)-säure-Hexahydrat (z.B. VWR Nr. ALFA 42815.03), Papiertaschentuch oder Filterpapier (Größe etwa 5 x 3 cm), 25mL-

Abbildung 25:  
Funken gibt es  
nur an der Luft.

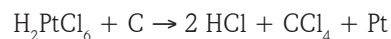


Becherglas, dest. Wasser, Pinzette, Spatel, Brenner, Teesieb (z. B. Teebrüher von Fackelmann); H<sub>2</sub> in 20mL-Spritze mit abgestumpfter Nadel (hergestellt z. B. im Low-Cost-Gasentwickler aus Zn und HCl wie u.a. in [35, 42, 43] beschrieben).

#### Durchführung:

a) Herstellung des Katalysators: Einige Kristalle Hexachloroplatin(IV)-säure werden in 2 bis 3 mL Wasser gelöst. Die gelbe Lösung wird in ein Stück Papiertaschentuch bzw. Filterpapier gesaugt und über den heißen Brennerabgasen vorgetrocknet (Pinzette verwenden!). Das trockene Papier wird nun in eine Teebrühzange befördert und über der nicht leuchtenden Bunsenflamme verkohlt bzw. verascht, bis ein nicht mehr schwindender grauer Film aus feinst verteiltem Platin zurückbleibt.

#### Schematische Reduktion:



Die geschlossene Teebrühzange verhindert, dass der wertvolle, federleichte Katalysator von der Brennerflamme weggeblasen wird (Abbildung 24).

b) Modellversuch zum Döbereiner-Feuerzeug: 20 mL Wasserstoff werden in einer Einweg-Spritze gesammelt und mittels abgestumpfter Nadel bei geöffnetem Teebrüher direkt auf den Katalysator geleitet. Das Platin beginnt sofort aufzuglühen; der aus der Kanüle austretende Wasserstoff entzündet sich.

*Hinweise:* Das Aufglühen kann mittels Videokamera auch großen Auditorien vorgeführt werden. Der einmal hergestellte Katalysator ist kein Verbrauchsmaterial. Nach längerer Lagerung des Katalysators ist es notwendig, im Lauf der Zeit adsorbierte Stoffe durch kurzfristiges Erhitzen zu desorbieren, um die gewünschte Aktivität zu erhalten.

#### Kein Funke ohne Sauerstoff

Cereisen-Mischmetall (Auer-Metall) gibt es auch in Zeiten der Piezotechnik noch immer in verschiedensten Ausführungen, vom Billigfeuerzeug bis zum Gasanzünder bzw. Outdoor-Fire-Starter. Ersatz-Stifte für Feuerzeuge sind unter der Bezeichnung „Feuersteine“ bzw. „Flints“ in allen Tabakläden erhältlich.

Werden vom Cereisen-Mischmetall winzige Partikel (mittels Reibrad etc.) abgeschabt, reicht die Reibungswärme aus, dass diese Partikel an der Luft mit heller Funkenbildung verbrennen. Umgekehrt gibt es trotz intensiver Reibung keine Funken, wenn die abgeschabten Partikel keinen Sauerstoff vorfinden. In Kohlendioxid-Atmosphäre funktioniert der „Flint“ nicht.

*Material:* Sicherheitsgasanzünder (z.B. von Rothenberger), 100mL-Becherglas, Gasdruckkorkenzieher [44] Bezugsquelle: z.B. Aero Pull Luftkorkenzieher mit Sodakapseln um 29,95 € [45]

*Durchführung:* Ein kleines Becherglas wird durch Luftverdrängung mit Kohlendioxid gefüllt. Steht ein mit Sodakapseln beschickter Gasdruck-Korkenzieher

zur Verfügung, gibt es Kohlendioxid für diese Zwecke auf Knopfdruck; Abbildung 25).

Der Sicherheitsgasanzünder wird abwechselnd an der Luft und dann in Kohlendioxid-Atmosphäre betätigt. Funken gibt es nur an der Luft.

### Feuerzeug-Zündsteine – chemisch untersucht

Auer-Zündsteine für Feuerzeuge bestehen heute zu etwa 80% aus so genanntem Cer-Mischmetall, rund 20% Eisen, 2% Magnesium, 0,5% Zink [50]. In [31] ist das Verhältnis von Cer-Mischmetall zu Eisen mit ca. 70% zu 30% angegeben.

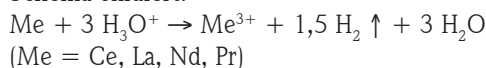
Cer-Mischmetall enthält hauptsächlich Cer, in abnehmender Häufigkeit Lanthanum, Neodym und Praseodym, Eisen nur in Spuren (Abschnitt *Schlagen, Bohren, Reiben*). Irrtümlicherweise wird in [51] der Gehalt an Eisen in Cer-Mischmetall mit 30% angesetzt.

Die Mittleren Atommassen der Seltenerdmetalle im Cer-Mischmetall sind sehr ähnlich: Cer: 140,115u; Lanthanum: 138,9u; Neodym: 144,24u, Praseodym: 140,9u.

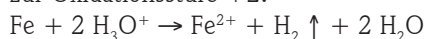
Unter Berücksichtigung der prozentuellen Verteilung der vier Seltenerdmetalle im Cer-Mischmetall lässt sich eine „Mittlere Molmasse“ dieser Legierung errechnen:

$$0,5 \cdot 140,115 \text{g} + 0,3 \cdot 138,9 \text{g} + 0,15 \cdot 144,24 \text{g} + 0,05 \cdot 140,9 \text{g} = 140,41 \text{g}$$

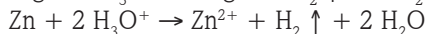
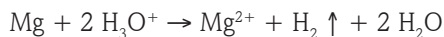
Chemisch reagieren diese Seltenerdmetalle ganz analog gemäß ihrer Stellung im Periodensystem. In Salzsäure werden sie z. B. als sehr unedle Metalle unter heftiger Wasserstoffbildung nach folgendem Schema oxidiert:



Das im Zündstein enthaltene Eisen oxidiert dabei zur Oxidationsstufe +2:



Ebenso verhält sich das enthaltene Magnesium bzw. das Zink:



Wenn man den Gehalt an Magnesium bzw. Zink in den Zündsteinen genau kennt, so kann man mit nur zwei gemessenen Größen das Verhältnis Cer-Mischmetall und Eisen in den Zündsteinen abschätzen. Es muss nur die Menge an generierbaren Wasserstoff aus einem Zündstein mit bekannter Masse eruiert werden.

Es gibt zwei Unbekannte. Deshalb müssen auch zwei Gleichungen formuliert werden.

**Material:** Original Auermet-Zündsteine (aus dem Tabakladen), Reagenzglas 16/160, Reagenzglasständer, Weichgummistopfen 18D mit drei abgestumpften Kanülen 1,4/40 mm, Silikonschlauch ca. 25 cm, (8mm Durchmesser), 2mL-Spritze, 20mL-Spritze, 400mL-

Becherglas, 60mL-Spritze, Temperaturmessgerät, HCl (halbkonzentriert), Waage (Genauigkeit mind. 0,01g)

**Durchführung:** Die Masse M des Zündsteins lässt sich mit einer analytischen Waage bestimmen. Auch mit einer weniger empfindlichen Waage sind Messungen möglich, weil die Toleranzen der Zündsteine so gering sind, dass man z. B. 10 Zündsteine abwägen und das Ergebnis durch 10 dividieren kann. Derartige Massenbestimmungen ergaben für Auer-Met Zündsteine  $M = 0,124 \text{g}$ .

Rechnerisch muss sich die Masse M des Zündsteins (abzüglich Mg- bzw. Zn-Anteil) aus folgender Beziehung ergeben:

„Mittlere Molmasse“ von Cer-Mischmetall x Molanteil von Mischmetall + Molmasse von Eisen x Molanteil von Eisen = M

$$M = 140,41 \text{g} \cdot m + 55,85 \text{g} \cdot n = 0,124 \text{g} \text{ (abzüglich Mg- und Zn-Anteil)}$$

2% Magnesium = 0,0025g; 0,5% Zink ergeben  $6,2 \cdot 10^{-4} \text{g}$ . Die Masse an Cer-Mischmetall und Eisen in einem Zündstein beträgt somit durchschnittlich 0,121g. Deshalb gilt:

$$140,41 m + 55,85 n = 0,121$$

Beim Auflösen von Zündsteinen in Salzsäure bildet 1 Mol Ce (wie die anderen Seltenerdmetalle im Mischmetall) genau 1,5 Mol Wasserstoff. Ein Mol Eisen bzw. ein Mol Magnesium (u. 1 Mol Zn) reagieren zu je einem Mol Wasserstoff (siehe Gleichungen oben)

Deshalb muss gelten:

$1,5 m + 1 n = y$  (= Molanteil an gebildetem Wasserstoff aus einem Zündstein abzüglich der Molmenge an Wasserstoff von Magnesium und Zink stammend)

Dieser Molanteil y an Wasserstoff lässt sich aus einer einfachen Volumenbestimmung ermitteln. Entsprechend der allgemeinen Gasgleichung  $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$  muss Druck und Temperatur bekannt sein, um den



Abbildung 26: 38 mL Wasserstoff aus 1 Zündstein mit der Masse von 0,124 g.

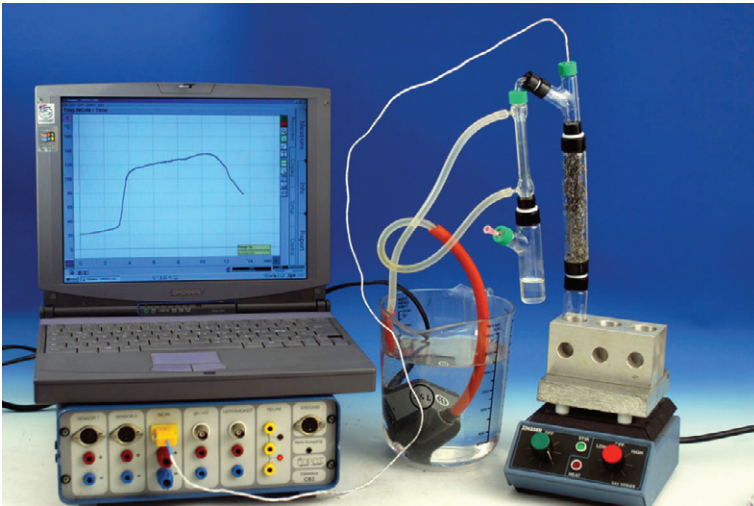


Abbildung 27: Microscale-Fraktionierung mit Kühlmittelkreislauf.

molaren Anteil errechnen zu können. Der aus dem Magnesium bzw. Zink gebildete Wasserstoff ist zu berücksichtigen.

2% Mg in einem Zündstein mit einer durchschnittlichen Masse von 0,124g sind 0,0025g oder  $1,0 \cdot 10^{-4}$  Mol Magnesium, das auch dieselbe Molmenge Wasserstoff liefert.

0,5% Zn (Masse  $6,2 \cdot 10^{-4}$  g Zn) im Zündstein produzieren  $9,5 \cdot 10^{-6}$  Mol Wasserstoff.

$T = \text{Temperatur} = 15^\circ\text{C} = 288\text{K}$

Druck  $p = 101\,500\text{ Pa}$  (1032 hPa Luftdruck abzüglich 1700 Pa Wasserdampfpartialdruck bei  $15^\circ\text{C}$ , weil Wasser als Sperrflüssigkeit verwendet wird)

$R = \text{Gaskonstante } 8,31$

Ein Zündstein mit bekannter Masse wird ins Reagenzglas gegeben, das Reagenzglas wird mit dem Gummistopfen verschlossen. Eine Kanüle im Stopfen

wird mit einer 2mL-Spritze bestückt, in der sich genau 2 mL halbkonzentrierte Salzsäure befinden. Auf die zweite Kanüle wird der Silikonschlauch gasdicht aufgeschoben. Auf die dritte Kanüle wird eine 20mL-Spritze gasdicht aufgesetzt. In dieser Spritze befinden sich 10 mL Luft.

An der Seite der 60mL-Spritze, ganz nahe dem Spritzenboden, wird mit einem Messer ein kleiner Schlitz geschnitten, so dass der Silikonschlauch gerade in die Spritze hinein geschoben werden kann.

Taucht man nun die Spritze samt Schlauch in ein Becherglas mit Wasser, so kann man durch mehrmaliges Pumpen fast alle Luftblasen aus dem System entfernen. Nun wird Wasser angesaugt, indem man den Spritzenstempel genau auf die 60mL-Markierung bringt. Durch Einpressen von Luft aus der 20mL-Spritze in das geschlossene System wird Wasser aus dem Silikonschlauch verdrängt bis Luftbläschen in der 60mL-Spritze aufsteigen. Auf diese Weise kann mit Hilfe der 20mL-Spritze der Meniskus in der senkrecht gehaltenen 60mL-Spritze auf eine bestimmte Ausgangsposition (z. B. 8mL) exakt einjustiert werden. Presst man nun aus der 2mL-Spritze die vorgegebene Menge an Salzsäure (genau 2mL) rasch ins Reagenzglas, so werden in der 60mL-Spritze weitere 2 mL Luft gesammelt. Der Zündstein löst sich unter Wasserstoffentwicklung rasch auf. Das in der 60mL-Spritze gesammelte Volumen an Wasserstoff ist gut ablesbar, wobei die Ausgangsposition des Meniskus (10mL) zu berücksichtigen ist.

Beim wiederholten Lösen von Zündsteinen der Fa. Auer-Met mit einer durchschnittlichen Masse von 0,124 g (Abbildung 26) kann mit entsprechender Häufigkeit ein Volumen  $V$  von durchschnittlich 38 mL Wasserstoff ermittelt werden. Unter Berücksichtigung des Partialdruckes von Wasser als Sperrflüssigkeit bei  $15^\circ\text{C}$  und unter Berücksichtigung des Drucks im Behältnis (Luftdruck) errechnen sich mit Hilfe der allgemeinen Gasgleichung  $0,00161\text{ Mol H}_2$ .

Wenn man von dieser Menge den molaren Wasserstoffanteil stammend von Magnesium und von Zink abzieht, ergibt ein Molanteil an Wasserstoff (stammend aus Cer-Mischmetall und Eisen) von  $y = 0,0015\text{ Mol}$

Deshalb gilt:

$$1,5 m + 1 n = 0,0015$$

Durch Isolieren und Einsetzen von  $m$  in die bereits aufgestellte Gleichung:

$$140,41 m + 55,85 n = 0,121\text{g}$$

erhält man für  $m = 6,55 \cdot 10^{-4}$  bzw. für  $n = 5,2 \cdot 10^{-4}$

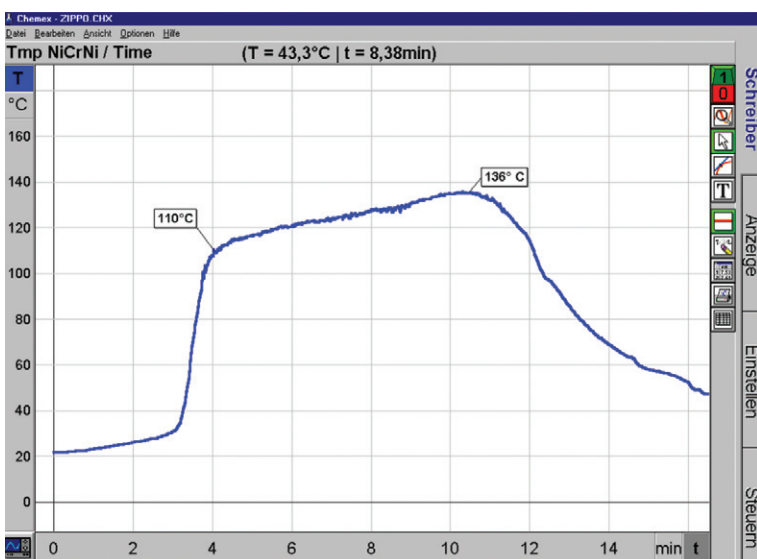
Der Massenanteil an Cer (mit anderen Seltenerdmetallen) beträgt somit rein rechnerisch:

$$M(\text{Cer-Mischmetall}): 140,41\text{g} \cdot 6,55 \cdot 10^{-4} = 0,092\text{g}$$

$$M(\text{Eisen}): 55,85\text{g} \cdot 8,08 \cdot 10^{-4} = 0,029\text{g}$$

Das unter den Vereinfachungen grob ermittelte Verhältnis von Cer-Mischmetall und Eisen in der untersuchten Sorte Zündsteine beträgt somit etwa 76% Cermischmetall : 24 % Eisen.

Abbildung 28: Der Siedebereich von Zippo-Benzin ist sehr eng gesteckt (Chembox-Graphik der Microscale-Fraktionierung).





Durch die definierte Masse der Zündsteine, deren außerordentliche Reaktivität in Salzsäure und die Schlichtheit der Versuchsanordnung ist der experimentelle Teil (Gasvolumen-Messung inklusive Vor- und Nachbereitung) in weniger als 5 Minuten machbar, wobei das Volumen des erzeugten Wasserstoffs doch relativ genau ermittelt werden kann.

*Anmerkung:* Qualitativ kann die Bildung von Wasserstoff einfach im Reagenzglas durchgeführt werden, indem man das gebildete Gas an der Reagenzglasöffnung entzündet.

Die gelösten Zündsteine eröffnen auch eine ganze Reihe von Möglichkeiten, qualitative Untersuchungen anzustellen [51, 52].

### Feuerzeugbenzin – Siedekurve

Originales Feuerzeugbenzin (z.B. Zippo Lighter Fluid) ist ein so genanntes Siedegrenzen-Benzin. Der Docht eines Benzinfeuerzeugs muss einerseits ausreichend Benzin-Dämpfe entwickeln, damit die vom Reibrad und Flint produzierten Funken auf ein zündfähiges Gemisch treffen, andererseits darf das Benzin nicht so flüchtig sein, dass es bei der Lagerung verdampft. Das Zippo-Datenblatt [46] weist folgende (gaschromatographisch ermittelte) Verbindungen auf: Heptan, Octan, Methylcyclohexan, Nonan, Xylen, Hexan, Benzen, Cyclohexan, Toluol. Mit einer fraktionierten Destillation lässt sich dieser relativ enge Schnitt an Kohlenwasserstoffen von den Mengenverhältnissen weiter einschränken, wobei wegen der Brennbarkeit des untersuchten Stoffgemisches im Microscale-Maßstab gearbeitet wird. Um die Vorteile dieser Destillation im 5 bis 10 mL Maßstab nutzen zu können, wird das Kühlmittel mit einer Aquarienpumpe im Kreislauf geführt. Als Kolonnenfüllung fungiert ein Putzstahldraht [47, 48] (Abbildung 27).

*Material:* Zinsser-Minilabor (Halbmikro-Glasbaukasten), Zinsser-Magnetheizrührer, Scheuerspirale (Putzstahldraht) als Füllkörper, Chembox mit Software Chemex, Computer oder Notebook, Aquarienpumpe, Zippo-Feuerzeugbenzin.

*Durchführung:* Die Destillationsapparatur wird wie abgebildet zusammengeschaubt. Vorgelegt werden mindestens 5, maximal 10 mL Zippo-Benzin. Ein Mini-Rührfisch sorgt für ein gleichmäßiges Sieden. Als sehr effiziente Kolonnenfüllung fungiert ein Stück Putzstahldraht [48]. Der kleine Liebig-Kühler kann wegen schwer beherrschbarer Druckverhältnisse mit Fließwasser nicht sicher betrieben werden. Deshalb wird der Kühler mittels Aquarienpumpe mit Wasser im Kreislauf versorgt. Um eine Erwärmung des Kühlwassers zu verhindern, sind im Vorratsbehälter etwa 1,5 Liter Wasser vorzulegen. Auf diese Weise könnte die Temperatur des kreisenden Kühlwassers bei Bedarf (im Falle von niedrig siedenden, brennbaren Komponenten) auch mit Eis niedrig gehalten werden (Abbildung 28).

Die fraktionierte Destillation zeigt, dass die flüchtigen Anteile des Feuerzeugbensins etwa zwischen 113 und 133°C (+/- 3°C) liegen. Höher bzw. tiefer siedende Kohlenwasserstoffe liegen in nennenswerter Menge nicht vor (Abbildung 28). Zippo-Benzin muss somit großteils aus Octan (Kp: 125°C) bzw. Octanisomeren bestehen [49].

### Siedegrenzenbenzin – ein einfacher Test

Dass im Feuerzeugbenzin keine höhersiedenden Kohlenwasserstoffe (Öle) enthalten sind, lässt sich auch mit einem Filterpapier mit der Fettfleckprobe zeigen. Material: Zippo-Feuerzeugbenzin, Filterpapier.

Durchführung: Tropft man etwas Zippo-Feuerzeugbenzin auf Filterpapier, so verdunstet es zwar langsam, aber es verdunstet rückstandslos.

### Feuerzeugbenzin:

#### Dämpfe innerhalb der Explosionsgrenzen

Die Tatsache, dass Octan (mit einem niedrigen, definierten Dampfdruck von 0,0147 bar bei 20°C) einen wesentlichen Anteil im Zippo-Benzin haben muss, lässt auch einen Explosions-Versuch zu, bei dem das equilibrierte Benzin-Luft-Gemisch in einem verschlossenen Behältnis bei 20°C immer innerhalb der Zündgrenzen liegen muss. Der niedrige Dampfdruck von Feuerzeugbenzin erspart das sonst bei derartigen Versuchen übliche Tropfenzählen. Das Benzin-Luftgemisch kann im verschlossenen System nicht zu „fett“ werden.

Eine Auflistung des notwendigen Materials und eine detaillierte Beschreibung des Experimentes ist bereits mehrfach publiziert und auch im Internet zugänglich [49].

CLB

### Literatur

- [1] V. OBENDRAUF: Mit Köpfchen und Reibfläche – Microscale-Experimente mit Zündhölzern, CLB 06-2010, S. 240-255
- [2] <http://classics.mit.edu/Aristophanes/clouds.html> (Stand: 10. 04. 2010)
- [3] T. MOMMSEN, Römische Geschichte 1. Buch, 2, Kapitel: Die ältesten Einwanderungen in Italien; [http://gutenberg.spiegel.de/?id=5&xid=3739&kapitel=4&cHash=aabfdafd6achap02#gb\\_found](http://gutenberg.spiegel.de/?id=5&xid=3739&kapitel=4&cHash=aabfdafd6achap02#gb_found) (Stand: 10. 04. 2010)
- [4] [http://info-antike.de/Vesta\\_Vestalin.htm](http://info-antike.de/Vesta_Vestalin.htm) (Stand: 10. 04. 2010)
- [5] <http://www.mlhanas.de/Greeks/Mirrors.htm> (Stand: 10. 04. 2010)
- [6] H. MÜLLER-KARPE, Grundzüge früher Menschheitsgeschichte, gebundene Ausgabe, Theiss, 1998
- [7] G. ISAAC, Early Hominids and Fire at Chesowanja, Kenya, Nature 296 (1982): p. 870
- [8] C. K. BRAIN, A. SILLEN, Evidence from the Swartkrans cave for the earliest use of fire, Nature, 336 (1988), p. 464-465
- [9] Dr. DICK STAPERT, Dept. of Archaeology RUG-Faculty of Arts, University of GRONINGEN, Niederlande, persönliche Mitteilung
- [10] V. BARNOUW, An Introduction to Anthropology: Physical An-

- thropology and Archaeology, Vol. 1, Homewood, Illinois, The Dorsey Press, 1982 p. 143
- [11] J. A. J. GOWLETT, *Ascent to Civilization*, New York, McGraw-Hill, Inc., 1993, p. 56
- [12] <http://www.unesco.org/ext/field/beijing/whc/pkm-site.htm> (Stand: 10. 04. 2010)
- [13] S. WEINER et al, Evidence for the Use of Fire at Zhoukoudian, China, *Science* 281 (1998) p. 251-253
- [14] T. Liu, M. DING, Discussion on the age of 'Yuanmou Man', *Acta Anthropologica Sinica* 2 (1983), p. 40-48
- [15] [http://www.krapina.com/neandertals/index\\_en.htm](http://www.krapina.com/neandertals/index_en.htm) (Stand: 10. 04. 2010)
- [16] [http://digital.library.cornell.edu/k/kmoddl/pdf/032a\\_016.pdf](http://digital.library.cornell.edu/k/kmoddl/pdf/032a_016.pdf) (Seite 602) Stand 10. 04. 2010
- [17] D. STAPERT, L. JOHANSEN, *Antiquity*, Vol 73 No. 282 (1999) p. 801 - 812
- [18] <http://www.iceman.it/de/node/51> (Stand: 10. 04. 2010)
- [19] [http://findarticles.com/p/articles/mi\\_hb3284/is\\_n269\\_v70/ai\\_n28675605/](http://findarticles.com/p/articles/mi_hb3284/is_n269_v70/ai_n28675605/) (Stand: 10. 04. 2010)
- [20] <http://www.mayhemltd.com/antiq-fire.htm> (Stand: 10. 04. 2010)
- [21] W. HEIN, F. TROMMER, „...brennt wie Zunder!“ Steinzeitliche Feuererzeugung im Experiment, *Eiszeitwerkstatt, Experimentelle Archäologie, Museumsheft 2, Urgeschichtliches Museum Blaubeuren* (1995) S. 73 - 77
- [22] M. BAETZ, *Das Feuerwerksbuch von 1420, Faksimile mit Übertragung in modernes Deutsch*, Survival-Press, Books on Demand GmbH (2001)
- [23] <http://www.ragweedforge.com/cat-misc.html#strickers> (Stand: 20. 04. 2010)
- [24] [http://www.archive.org/stream/historyoffireand002589mbp/historyoffireand002589mbp\\_djvu.txt](http://www.archive.org/stream/historyoffireand002589mbp/historyoffireand002589mbp_djvu.txt) (Stand: 10. 04. 2010)
- [25] [http://www.arborsci.com/prod-Fire\\_Syringe-893.aspx](http://www.arborsci.com/prod-Fire_Syringe-893.aspx) (Stand: 10. 04. 2010)
- [26] [G. BRANDES, R. JARSCHHEL, *Feuer und Flamme – Interessantes vom Feuerzeug*, VEB Sachbuchverlag Leipzig (1988)
- [27] Ad van WEERT, *Faszinierende Feuerzeuge; Die Geschichte des Feuerzeugs – Vom Schwefelhölzchen zum Designobjekt*. Universitätsdruckerei und Verlag H. Schmidt, Mainz (1995)
- [28] O. KRÄTZ, *Historische chemische Versuche*, Aulis Verlag Deubner & Co KG, Köln, 1987, S. 109
- [29] T. PIEGLER, *Feuer aus Schleiz*, Verlag videel, Niebüll, (2001)
- [30] <http://www.althofen.at/welsbach.htm> (Stand: 10. 04. 2010)
- [31] J. FALBE, M.REGITZ (Hrsg.): *CD Römpp Chemie Lexikon – Version 1.0*, Stuttgart/New York: Georg Thieme Verlag, 1995
- [32] G. W. BROESAN, *1000 Feuerzeuge*, G.Broesan-Edition, Schallstadt (1995)
- [33] J. FLANAGAN, *Collector's guide to cigarette lighters*, Collector Books, A Division of Schroeder Publishing Co., Inc. (1995)
- [34] <http://www.chemieunterricht.de/dc2/pyrit/pyritv02.htm> (Stand: 10. 04. 2010)
- [35] V. OBENDRAUF, Experimente mit Gasen im Minimaßstab, *ChiuZ* 30 (1996), 118-125
- [36] V. OBENDRAUF, Low-Cost-Versuche mit SO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>S, *Chem. Sch. (Salzbg.)* 11 (1996), Nr. 1, S. 12-15
- [37] W.N. WATSON, *Methods of Fire Making Used by Early Man*, *JChemEd*, 16 (1939), S. 36-45
- [38] T. SHIMIZU, *Fireworks, The Art, Science and Technique*, Pyrotechnica Publications, Austin, Texas 1996
- [39] <http://www.opentip.com/Toys-Kids-Baby/Fire-Syringe-Kit-p-1235256.html> (Stand: 10. 04. 2010)
- [40] <http://www.amep.com/searchresultsdetail.asp?cid=1785> (Stand: 10. 04. 2010)
- [41] [http://www.jedinat-zaubershop.de/shop/show/show\\_kat/de/Pyroartikel.htm](http://www.jedinat-zaubershop.de/shop/show/show_kat/de/Pyroartikel.htm) (Stand: 10.04.2010)
- [42] V. OBENDRAUF, *Low Cost Gas Experiments for Small Scale Hands On Experiments*, 16th ICCE 2000, Budapest, plenary lecture, *Book of Abstracts*, p. 8-15
- [43] V. OBENDRAUF, *Gasexplosionen in der Low-Cost-Kanone*. In: *Chemisches Feuerwerk* (Hrsg.:Nick, Parchmann, Demuth), Aulis Verlag Deubner, Köln 2001, S. 37-47
- [44] V. OBENDRAUF, *Lachgas auf Knopfdruck*, *Chem.Sch. (Salzbg.)* 16 (2001), Nr. 2, S. 4-11
- [45] *Aero Pull Luftkorkenzieher mit Sodakapseln*, Bezugsquelle: Vino et Deco, Preis: 29,95 €, <http://www.vinoetdeco.de/index.php> (Stand: 10. 04. 2010)
- [46] [http://www.nafaa.org/ZIPPO\\_MSDS.pdf](http://www.nafaa.org/ZIPPO_MSDS.pdf) und [http://ilrc.ucf.edu/sample\\_detail.php?sample\\_id=35](http://ilrc.ucf.edu/sample_detail.php?sample_id=35) (Stand: 10. 04. 2010)
- [47] V. OBENDRAUF, *Die Zierbrunnenpumpe im Kühlkreislauf*, *Chem.Sch.(Salzbg.)* 13 (1998), Nr. 3, S. 16-17
- [48] V. OBENDRAUF, *Der Topfreiniger als Füllkörper*, *Chem.Sch. (Salzbg.)* 11 (1996), Nr. 4, S. 2-9
- [49] V. OBENDRAUF, *Feuerzeugbenzin im Arbeitstakt*, *Chem.Sch. (Salzbg.)* 15 (2000), Nr. 3, S. 8-12 bzw. [http://www.vcoe.or.at/cs/files/cus\\_benzin\\_2000\\_3.pdf](http://www.vcoe.or.at/cs/files/cus_benzin_2000_3.pdf) (Stand: 20. 04. 2010)
- [50] [http://www.treibacher.com/downloads/Zuendsteine\\_Original\\_Auermetall\\_D.pdf](http://www.treibacher.com/downloads/Zuendsteine_Original_Auermetall_D.pdf) (Stand: 10. 04. 2010) bzw. telefonische Auskunft der Fa. Treibacher Auermet Produktionsges.m.B.H., A-9330 Treibach-Althofen
- [51] W.GLÖCKNER, W. JANSEN, R.G.WEISSENHORN (Hrsg.), *Handbuch der experimentellen Chemie, Sekundarbereich 2, Band 3/I: Analytische Chemie I: Qualitative Analyse*, Aulis Verlag Deubner, Köln 2002
- [52] F.C. HENTZ, Jr, G.G. LONG, *Lighter Flint Chemistry*, *JChemEd* 53 (1976), p 651

#### Bildquellenverzeichnis:

**Die im Folgenden gelisteten Bilder stammen aus verschiedenen Internet-Quellen und wurden in den Bildtexten mit röm. Ziffern von I bis XII gekennzeichnet (Stand: März 2010)**

Bild I: <http://www.mythentor.de/griechen/prometheus.htm>

Bild II: <http://thealligatoronline.com/?article/84>

Bild III: <http://www.donsmaps.com/tools.html>

Bild IV: [http://mlab.taik.fi/Mulli/html/media/valokuva/e\\_tya283\\_21.html](http://mlab.taik.fi/Mulli/html/media/valokuva/e_tya283_21.html)

Bild V: [http://www.archaeologie.zh.ch/internet/bd/arv/kaz/de/kaz/\\_51.html](http://www.archaeologie.zh.ch/internet/bd/arv/kaz/de/kaz/_51.html)

Bild VI: <http://members.aye.net/~bspn/fire.html>

Bild VII: [http://www.aaawt.com/html/bee\\_ads/jun\\_07/bee\\_gallery1.html](http://www.aaawt.com/html/bee_ads/jun_07/bee_gallery1.html)

Bild VIII: <http://www.gnegel.de/feuerstein.htm>

Bild IX: <http://goinggear.com/images/ropelighter.jpg>

Bild X: <http://www.gnegel.de/feupneumatisch.htm>

Bild XI: <http://www.althofen.at/welsbach.htm>

Bild XII: [http://sammeln.shop.ebay.ch/Feuerzeuge-/9830/i.html?\\_dmd=2&\\_sop=16](http://sammeln.shop.ebay.ch/Feuerzeuge-/9830/i.html?_dmd=2&_sop=16)

# Wesseling und die Petrochemie

## Von der Gerberei zu den Kunststoffen – Rheinuferbahn als Verbindung

Georg Schwedt, Bonn

Von römischer Besiedlung (Funde von Weihaltären) über die erste urkundliche Erwähnung 820 (als Siedlung eines Wasilio) bis zum Pipelineverbund mit Rotterdam, Wilhelmshaven und dem Ruhrgebiet sowie Standorten der Firmen LyondellBasell, Evonik Degussa und Shell heute reicht die Geschichte der Stadt Wesseling am Rhein südlich von Köln. Ein beeindruckender Blick in die Industrielandschaft bietet sich dem Reisenden zwischen Köln und Bonn aus der Rheinuferbahn, der heutigen Straßenbahnlinie 16.



### Beginn der Industrialisierung

Der kleine Ort zwischen Köln und Bonn war um 1700 nur als Gespannwechselstelle für die Treidelschiffahrt auf dem Rhein bekannt. Eine erste Keimzelle im beginnenden Industriezeitalter war die 1793 errichtete Gerberei. 1794 wurde Wesseling durch französische Truppen besetzt und kam nach 1804 zu Preußen. 1843 entstand eine Bleiweißfabrik in der Clarenburg. 1848/49 führten Unruhen durch den Aufstand der Treidler (Rheinhalben), die ihr Gewerbe durch die aufkommende Dampfschiffahrt gefährdet sahen, zur Verlegung des Bürgermeisteramtes nach Hersel. 1880 gründeten Heinrich und Franz Zimmermann eine *Chemische Fabrik* (ab 1905 *Chemische Fabrik Wesseling*). Sie beschäftigten sich mit der Verwertung von Gasreinigungsmassen und bildeten damit den Ursprung der heutigen *Evonik Degussa* im Norden der Stadt. 1901 wurde die Rheinwerft in Betrieb genommen. Im Gelände der Fabrik befindet sich heute das Rheinforum als Ort unterschiedlicher Veranstaltungen der Stadt. Am ehemaligen Gebäude der Fabrik befindet sich eine Gedenktafel mit folgendem Text (s. Abb. 1): „1793/1794 erbaut war das Haus von 1821-1849 Amtssitz des Bürgermeisters von Hersel. 1880 erwarben es die Brüder Zimmermann, die Begründer der Chemischen Fabrik Wesseling. Seit 1919 diente es der ‚Rheinbraun‘ als Bürogebäude. Heute ist es im Besitz der Stadt Wesseling.“

Mit dem Bau der Rheinuferbahn wurde 1904 begonnen. 1972 erfolgte die Verleihung der Bezeichnung Stadt, am 1. Januar 1975 wurde Wesseling in die Stadt Köln eingemeindet. Durch eine erfolgreiche Klage erhielt Wesseling jedoch am 1. Juli 1976 seine Selbstständigkeit wieder zurück. Heute wohnen in Wesseling (mit den Ortsteilen Wesseling-Mitte, Keldenich, Berzdorf und Urfeld) etwa 36 Tausend Menschen. Die Stadt bietet ca. 8000 Arbeitsplätze, von denen deutlich mehr als die Hälfte auf die chemische Industrie entfallen.

### Die Rheinland Raffinerie Werk Wesseling

1937 entstand in Wesseling die Union Rheinische Braunkohlen Kraftstoff AG (UK). Aus heimischer Braunkohle sollten im Rahmen der Autarkiebestrebungen des nationalsozialistischen Deutschen Reiches synthetische Treibstoffe produziert werden. Die für das *Bergius-Pier-Verfahren* eingesetzte Braunkohle wurde im nahe gelegenen Rheinischen Braunkohlenrevier abgebaut (im Tagebau Berrenrath und in der Grube Vereinigte Ville). Dort wurde die Braunkohle getrocknet und aufbereitet und mit der Querbahn

#### Der Autor

Der Buchautor und Mitherausgeber der CLB, Prof. Dr. Georg Schwedt, war von 1987 bis zu seiner Emeritierung 2006 Professor für Anorganische und Analytische Chemie an der Technischen Universität Clausthal. Jetzt lebt er in Bonn und widmet sich in vielfacher Weise der Aufgabe, die Naturwissenschaften den Menschen nahe zu bringen.



Abbildung 1: Ehemaliges Gelände der Chemischen Fabrik Wesseling – heute Rheinforum. Gebäude rechts mit Gedenktafel (s. Text; Fotos: Schwedt).



Abbildung 2:  
Einfahrt zur  
Rheinland Raffi-  
nerie im Süden  
von Wesseling.

bzw. der „Schwarzen Bahn“ von Berrenrath nach Wesseling transportiert. Für das produzierte Benzin wurde der Rhein als Transportweg für die Tankschiffe genutzt.

Das Bergius-Pier-Verfahren ist nach den beiden physikalischen Chemikern Friedrich *Bergius* (1884-1949; Chemie-Nobelpreis 1931) und Matthias *Pier* (1882-1865; Chemiker in der BASF) benannt. Die Kohlehydrierung zu Benzin (auch als „Kohleverflüssigung“ bezeichnet – heute auf Erdöl umgestellt) beruht auf Forschungen von Bergius zur katalytischen Hochdruckhydrierung. In dem von Pier entwickelten speziellen Verfahren wird Braunkohle mit Schwerölen zu einem Brei (mit 50-60 % Feststoffanteil) angeteigt. Als Katalysatoren werden Wolfram- und Molybdänsulfide verwendet. In großen Reaktionsöfen wird das Gemisch bei Drücken von 200 bis 700 bar und 480 °C mit eingepresstem Wasserstoff zur Reaktion gebracht. So ließen sich aus einer Tonne Kohle und 100 Kubikmeter Wasserstoffgas etwa 600 kg Benzin gewinnen. Zur Herstellung des Wasserstoffs aus Wassergas (Gemisch aus Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff nach  $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$ ) benötigte man zusätzlich Koh-

Abbildung 3: Blick  
auf die Anlagen  
der Rheinland  
Raffinerie vom  
Rheinufer.



le, so dass aus insgesamt 4 Tonnen Kohle 1 Tonne Benzin produziert wurde.

1941 wurde mit der Produktion von Benzin in Wesseling-Süd begonnen. 1942 wurden 250 000 Tonnen hergestellt. Im Juli und Oktober 1944 wurden die Anlagen mehrmals bombardiert und ab Ende des Jahres 1944 war das Werk stillgelegt.

Nach dem Zweiten Weltkrieg verbot der Alliierte Kontrollrat die Produktion von Treibstoffen. Daher nutzte die Union-Kraftstoff AG (UK) die Hydrieranlagen zur Herstellung von Ammoniak nach dem *Haber-Bosch-Verfahren* für die Düngemittelindustrie. Ab 1949 konnten wieder Treibstoffe hergestellt werden, wofür als Basis jedoch Erdöl eingesetzt wurde. Zusätzlich wurde nach einem im Unternehmen entwickelten Verfahren, dem *Peukert-Hilberath-Verfahren*, Methanol produziert, durch welches sich die UK in den 1960er Jahren eine führende Stellung auf dem Weltmarkt sicherte. Die Rohölkapazität stieg von 250 000 auf jährlich mehrere Millionen Tonnen. Ab 1985 wurden auch Düsentreibstoffe und ab 1986 Schmierstoffe produziert.

1989 wurden Teile der UK (Verarbeitung und Vertrieb) in die DEA Mineralöl AG eingebracht. Die Deutsche Erdöl-AG (DEA) ist eine Tochtergesellschaft des 1908 in den USA gegründeten Mineralölkonzerns Texaco, der 1989 37 000 Beschäftigte hatte. Sie nannte sich zunächst Deutsche Texaco AG (Sitz in Hamburg). Die Muttergesellschaft Texaco wurde 1901 in Beaumont (Texas) als Texas Fuel Company gegründet und fusionierte im Jahre 2001 mit der Chevron Corp. (bereits 1875 entstanden) zur Chevron/Texaco. Die Chevron Corp. ist einer der weltweit größten Ölkonzerne (Hauptsitz San Ramon/Kalifornien), der in 180 Ländern der Welt aktiv ist. Die verbliebenen Aktivitäten der UK wurden in der RWE-DEA AG zusammengeführt. Der Schwerpunkt des UK-Werkes Wesseling liegt in der Herstellung hochwertiger Mineralölprodukte und petrochemischer Grundstoffe. Die RWE war 1898 als Rheinisch-Westfälische Elektrizitätswerk AG durch die bereits vorhandenen Firmen Elektrizität-AG vormals W. Lahmeyer & Co und die Deutsche Gesellschaft für elektrische Unternehmungen entstanden, um zunächst die Stadt Essen mit Elektrizität zu versorgen. 1902 ging die Mehrheit an der RWE an August Thyssen und Hugo Stinnes (mittels eines Konsortiums unter Beteiligung der Deutschen Bank, der Dresdner Bank und der Disconto-Gesellschaft) über. Auf dem Gelände der Stinnes-Zechen entstand auch das erste Elektrizitätswerk. Danach expandierte die Gesellschaft rasch und entwickelte sich als heutige RWE AG zu einem Holdingsunternehmen mit den Konzernbereichen Energie, Bergbau und Rohstoffe sowie Mineralöl und Chemie.

In der wechselvollen Firmengeschichte erfolgte schließlich im Jahre die Gesamtübernahme (nach einem Joint-Venture 2002) des Raffinerie-Werkbetriebes in Wesseling durch die Shell Deutschland Oil GmbH als Rheinland Raffinerie, Werk Wesseling. Der

Markenname Shell bedeutet im Englischen Muschel (auch Logo des Unternehmens). Als Kuriositätengeschäft wurde die Firma 1833 im Londoner Eastend durch Marcus Samuel gegründet, der mit dekorativen Muscheln als Importware aus Fernost handelte. Seine zwei Söhne entwickelten die Firma zu einem Import-Export-Handel, welcher sich dem Transport von Kerosin zu Beleuchtungszwecken zuwandte. Ab 1890 baute das Unternehmen unter dem Firmennamen The Shell Transport and Trading Company Öltankschiffe, ab 1897 durch die Förderung und Raffinierung von Öl erweitert. Die Kammuschel wurde so zum Logo des Unternehmens. 1907 schloss sich der Niederländer Henri Deterding mit seiner Petroleum-Firma (60 % Anteile) mit M. Samuels Firma zusammen. Das niederländische Unternehmen nannte sich nun Royal Dutch Petroleum Company – 2005 wurden beide Firmen als Royal Dutch Shell mit Firmensitz in Den Haag vereinigt.

### Von der Chemischen Fabrik Wesseling zu Evonik Degussa

Der Chemiker Heinrich Zimmermann, der sich mit der Reinigung von Leuchtgas beschäftigte, und sein Bruder Franz Zimmermann stellten am 29. Mai 1880 ein Konzessionsgesuch zur Anlage einer Fabrik „*behufs Anfertigung chemischer Präparate*“ auf dem Gelände der früheren Heymann'schen Papierfabrik – am 3. Januar 1881 wurde ihnen unter zahlreichen Auflagen die Konzession erteilt. Aus den Abfallprodukten der Kokereien an der Ruhr ließ sich gelbes Blutlaugensalz gewinnen – als Ausgangsprodukt für das „Berliner Blau“ – und auch Kaliumcyanid für die Cyanidlaugerei in der Gold- und Silbergewinnung. 1893 wurde der gesamte Betrieb auf den Sandberg verlegt. Es gab im 19. Jahrhundert immer wieder Proteste von Bürgern – so u.a. in einem Brief an die Kölnische Zeitung vom 27. Mai 1882:

„Sonderbarerweise hat die Polizeibehörde stillgeschwiegen dazu, dass diese Fabrik in der unmittelbaren Nähe des Rheines und dicht an der Köln-Mainzer Chaussee einen riesigen Berg Rückstände von der Gasreinigungsmasse anhäufte, der große Mengen Schwefel enthält und dessen geradezu erstickender, stinkender Dunst besonders bei Regenluft die Passanten dieser sehr verkehrsreichen Chaussee stark belästigt.“

Nach 1893 expandierte die Fabrik, deren Leitung Josef Zimmermann nach dem Tod seines Vaters Heinrich Zimmermann übernahm. 1900 wurde der Bau einer Schwefel- und Salpeterfabrik beantragt – mit wiederum zahlreichen Einsprüchen. Trotzdem wurde am 12. Juni 1901 die Genehmigung durch den Königlichen Minister für Handel und Gewerbe erteilt. Eine entscheidende Veränderung trat 1905 ein. Durch Vermittlung der *Degussa* (1873 als Deutsche Gold- und Silber-Scheideanstalt vormals Roess-



Abbildung 4: Blick auf die gegenüber der Rheinland Raffinerie Wesseling in Lülsdorf am rechten Rheinufer gelegenen Anlagen.

ler in Frankfurt am Main gegründet) vereinigten sich die bisherigen größten Konkurrenten, die Firmen H. & F. Zimmermann sowie L. Vossen & Co. in Neuß (mit je 37 %) unter Beteiligung der Degussa (mit 12 %) zur *Chemischen Fabrik Wesseling AG* (CFW). 1909 arbeiteten 100 Menschen in der Fabrik.

Nach dem Zweiten Weltkrieg verlagerten sich die Schwerpunkte der Produktion auf Schwefelsäure und auch auf Eisenoxidpigmente. Zur Zeit des Nationalsozialismus übernahm 1940 die Degussa 51 % des Aktienkapitals. 1943 wurde eine Extraktionsanlage zur Gewinnung von Schwefel in Betrieb genommen, in der man kriegsbedingt fehlende Arbeitskräfte durch französische Kriegsgefangene ersetzte. Bereits im Zweiten Weltkrieg wurde die Produktion von Verstärkerfüllstoffen für die Gummiindustrie aufgenommen – so im September 1943 das Produkt Silteg AS 5, ein spezielles Aluminiumsilikat. Nach dem Krieg konnte die Produktion in dem weitgehend unzerstört gebliebenen Gebäuden ab 1947 mit teils neuen Produkten (Schädlingsbekämpfungsmittel – Basis: Gasreinigungsmasse, Schwefel und Cyan) fortgeführt werden; 1959 wurde das Unternehmen zu 100 % von der Degussa übernommen – und so zur Zweigniederlassung Wesseling. Zu Beginn der

Abbildung 5: Blick von der Rheinpromenade in Wesseling auf die Industrieanlagen (Evonik und LyondellBasell) in Richtung Köln.





Abbildung 6:  
Anlagen der  
Evonik Degussa.

1950er Jahre errichtete die Degussa unmittelbar neben der CFW eine Blausäureanlage, die 1953 in Betrieb genommen wurde. Die Blausäure wurde aus den teilweise von der Union Rheinische Braunkohlen Kraftstoff AG (UK) gelieferten Produkten Methan und Ammoniak gewonnen. 1957 ging die BMA-Anlage in Betrieb (Blausäure aus Methan und Ammoniak). Blausäure wurde für das Vorprodukt Cyanurchlorid (2,4,6-Trichlor-1,3,5-triazin – farbloses cyclisches Trimeres des Chlorcyans  $\text{Cl-CN}$ ) zur Synthese von optischen Aufhellern sowie von Unkrautvernichtungsmitteln benötigt. Anlagen für weitere Produkte wie Methylmethacrylat (MMA) wurden errichtet. Im Rahmen von Produktionserweiterungen kam es auch zur Herstellung von Methionin – beispielsweise als Zusatz für Tierfutter. 1978 entstand eine Produktionsanlage zur Herstellung von Zeolithen als Phosphatersatzstoffen in Waschmitteln - bis 2001 in Betrieb. Die Herstellung von

Abbildung 7: Blick aus der Straßenbahnlinie Bonn-Köln U16 in das Werksgelände mit chemischer Großtechnik in Wesseling-Nord bzw. Köln-Godorf.



„Blaufarben“ endete 2002. Bereits durch die Übernahme der Degussa und der STEAG (1937 als Steinkohlen-Elektrizitäts AG in Lünen gegründet – seit 2003 vollständig zum RAG-Konzern) war ein weltweit diversifizierter Montan-, Energie- und Chemiekonzern entstanden. Seit dem 12. September 2007 führt das Unternehmen einen neuen Namen, der infolge der Umstrukturierung des Mutterkonzerns RAG (Ruhrkohle AG, 1968 als Konsolidierungsunternehmen der deutschen Steinkohleförderung gegründet), zu der die Degussa gehörte, *Evonik-Degussa* lautet – als Tochter der *Evonik Industries*, wobei Evonik im Unterschied zu den historischen Namen ein reines Kunstwort ist. Die Geschäftsfelder Chemie, Energie und Immobilien der RAG wurden 2006 ausgegliedert. Da der Name RAG zu sehr mit Bergbau und Kohle verbunden war (und im Englischen *rag* auch Lumpen bedeutet!), erfolgte die genannte Umbenennung. Die Basisrohstoffe in Wesseling von heute sind Methan, Ammoniak, Schwefel und Wasserglas. Die wichtigsten Verkaufsprodukte sind u.a. PMMA (Polymethacrylat)-Lackperlen (z. B. für Straßenmarkierungsfarben, Containerlacke), Methionin (als Aminosäure in der Tierernährung), Ultrasil (Silica-Produkte als Verstärker für Kautschuk, z.B. für Autoreifen), Sident (Silica für Zahnpasta).

### Dow Chemical mit einer Polypropylenanlage in Wesseling

Die Dow Chemical Company wurde 1897 von Herbert Henry Dow in US-Staat Michigan zur Gewinnung von Chloriden und Bromiden aus Solelagerstätten unterhalb von Midland gegründet. Ab der 1930er Jahre begann Dow Chemical mit der Produktion von Kunstharzen – u.a. Ethylcellulose (1935) und Polystyrol (1937). Nach dem Zweiten Weltkrieg expandierte das Unternehmen ins Ausland und ist seit 1959 auch in Deutschland vertreten – zunächst in Vertriebsniederlassungen mit der Hauptverwaltung in Frankfurt am Main. Nach der Deutschen Wiedervereinigung wurden Teile der Buna-Werke und der Olefinwerke Böhlen erworben und die Union Carbide (2001) übernommen. In Wesseling gelangte 2001 Dow Chemical in den Besitz einer modernen Polypropylenanlage an der Rodenkirchener Straße als zweiter im deutschen und sechster Anlage im internationalen Dow-Verbund (als Niederlassung der Dow Olefinverbund GmbH). Die globale Produktionskapazität von Polypropylen beträgt damit etwa 1,2 Millionen Tonnen pro Jahr. Die Union Carbide wurde 1898 in West Virginia gegründet. 1939 fusionierte sie mit der Firma Bakelite (gegründet von Leo Baekeland, einem Pionier auf der Gebiet der Kunststoffentwicklung). Mit der Produktion von Polyethylen begann die Union Carbide 1997. Am 6. Februar 2001 wurde sie (und damit der Standort in Wesseling) zu 100 % von Dow Chemical übernommen.

## Von den Rheinischen Olefinwerken zu LyondellBasell

Am 27. August 1953 gründeten die BASF und Shell gemeinsam die Rheinischen Olefinwerke – ROW. Sie verarbeiten das Erdölprodukt Naphta (Leichtbenzin), das heute aus unterirdischen Rohrleitungen von den benachbarten Raffinerien bezogen wird, in Crackern (bei Temperaturen von ca. 850 °C) zu Ethylen und Propylen. Diese Monomere werden anschließend polymerisiert. Die aus Polyethylen hergestellten Produkte vertrieben die beiden Firmen jeweils mit eigenen Markennamen. In der Mitte der 1990er Jahre erfolgte eine weltweite Neuordnung des Kunststoffgeschäfts.

1997 entstand als Joint Venture von BASF und Shell die *Elenac GmbH* (Sitz in Kehl und Straßburg) zur Produktion und zum Vertrieb von Polyethylen (PE). Die PE-Pilotanlagen und auch die PE-Forschung der BASF in Ludwigshafen sowie die Rheinischen Olefinwerke in Wesseling wurden in der *Elenac GmbH* zusammengeführt.

Als *Targor GmbH* mit Sitz in Mainz entstand als ebenfalls Joint Venture von BASF und Hostalen PP (Hoechst) ein Unternehmen zur Produktion und zum Vertrieb von Polypropylen. Beide Unternehmen führten in der *Targor GmbH* Produktions- und Forschungsaktivitäten zusammen (darunter auch den Chemiepark Knapsack der ehem. Hoechst AG).

1998 übernahm die *Elenac GmbH* die *Hostalen GmbH* (Tochtergesellschaft der ehem. Hoechst AG) und damit Produktionsstandorte u.a. in Frankfurt am Main und in Münchsmünster.

Am 1. Oktober 2000 wurden die *Elenac GmbH*, die *Targor GmbH* und *Montell* (PP-Aktivitäten der Shell AG) unter dem Namen *Basell* als Joint Venture von BASF und Shell vereinigt. Durch die Fusionen entstanden zahlreiche Überschneidungen in den Tätigkeitsfeldern. Im Jahre 2005 führten dann Verhandlungen von BASF und Shell Chemicals zum Verkauf von *Basell* an *Nell Acquisition*, einer Tochtergesellschaft des Unternehmens *Access Industries*, New York. Als Verkaufspreis wurden 4,4 Milliarden Euro genannt.

Im Juli 2007 kündigte *Basell* bereits die Übernahme des US-Wettbewerbers *Lyondell Chemical* für 19 Milliarden US-Dollar an, eine Unternehmens, dass zuvor durch Fusion der ehemaligen Firmen *Millenium Chemical* und *Equistar* entstanden war. Ende November 2007 erfolgte die Fusion und es entstand dadurch die *LyondellBasell Industries*. Nach der *BASF* und der *DOW Chemical Company* ist dieses Unternehmen nun der drittgrößte unabhängige Chemiekonzern weltweit.

Durch die Turbulenzen der weltweiten Finanz- und in Folge Wirtschaftskrise geriet *LyondellBasell Industries* in Schieflage – verursacht durch den Umsatzeinbruch und die enorme Schuldenlast, bedingt den die weitgehend kreditfinanzierte Übernahme der *Lyondell* Unternehmensteile 2007. Im Januar 2009



Abbildung 8: Ein weiterer Blick aus der Straßenbahnlinie Bonn-Köln U16 in das Werksgelände mit chemischer Großtechnik.

suchte *LyondellBasell* daher Schutz unter dem Chapter 11-Schirm (Verfahren nach amerikanischem Insolvenzrecht) für seine amerikanischen Gesellschaften und beantragte im weiteren Verlauf auch für zwei europäische Holdinggesellschaften die Teilinsolvenz. Im April 2010 konnte das Chapter 11-Verfahren erfolgreich und restrukturiert beendet werden. Die deutschen Standorte der *LyondellBasell*, vor allem auch Wesseling, überstanden das Verfahren weitgehend unbeschadet – ohne Anlagenschließungen und betriebsbedingte Kündigungen. *LyondellBasell* ist heute im Besitz von über 300 institutionellen Investoren. Noch im Jahr 2010 ist der Gang an die New Yorker Börse geplant.

Die Industriegeschichte der drei großen Chemieunternehmen in Wesseling stellt ein Spiegelbild der globalen Industriegeschichte nicht nur in Deutschland dar. Die einmalige Lage zwischen Köln und Bonn am Rhein vermittelt schon durch die großräumigen Anlagen ein Bild chemischer Großtechnik, sowohl am Tage als ganz besonders in der Nacht. **CLB**

### Literatur

- Joest, Hans-Josef: Kraftakte. Ein halbes Jahrhundert Union Kraftstoff in Wesseling, Econ, Düsseldorf/Wien/New York 1987
- Drösser, Wolfgang: Wesseling, Berzdorf, Keldenich, Urfeld, Geschichte – Bilder, Fakten, Zusammenhänge, Wesseling 2008
- Hansen, Antje: Degussa Standort Wesseling (Festschrift zum 100-jährigen Jubiläum), Bochum 2005
- Basell Polyolefine GmbH/Braun, Henri (Hrsg.): 1953-2003 Standort Wesseling. Mit *Basell* der Zukunft verpflichtet, *Basell Polyolefine GmbH*, Wesseling 2003.

# Sensoren mit Graphen: Ein Molekül reicht

Jugend forscht 2010: Anwendungen von Graphen mit schulischen Mitteln erstellt

Luca Banszerus und Michael Schmitz, Bad Münstereifel

Seit der Entdeckung des Graphens im Jahre 2004 durch ein britisches Forschungsteam ist Graphen eines der aktuellsten Forschungsgebiete der Festkörperphysik und der Nanotechnologie. Bei Graphen handelt es sich um eine atomar dünne Schicht  $sp^2$ -hybridisierten Kohlenstoffs, also um genau eine Basalebene des Graphits, von der man vor der Entdeckung nicht glaubte, dass sie existieren könnte. Graphen eignet sich durch seine riesige Oberfläche und eine extrem hohe Ladungsträgermobilität perfekt für sensorische Anwendungen aus dem physikalischen, chemischen und biologischen Bereich.

Im Verlauf unserer Jugend forscht-Arbeit ist es uns gelungen, monolagige Graphen-Flakes von über 100 Mikrometern Länge auf einem Si/SiO<sub>2</sub>-Wafer herzustellen. Wir entwickelten zudem ein neues Verfahren, um die Flakes in der Schule – ohne die für uns nach wie vor unmögliche Kontaktlithographie – elektrisch zu kontaktieren. Zudem fanden wir eine optische Methode zur Bestimmung der Lagenanzahl eines Graphenflakes. Mit der neuen Kontaktierungsmethode bauten wir verschiedene Graphen-Devices mit für uns bisher unerreichter Qualität, darunter FETs und Gassensoren.

Auf dem Wettbewerb wollten wir diverse Gassensoren auf Graphenbasis sowie einen verbesserten Graphen Feldeffekttransistor vorstellen, die wir ausschließlich mit schulischen Mitteln herstellen und untersuchen. Trotzdem sollen ihre Eigenschaften deutlich besser sein als in unserer Jugend forscht-Arbeit von 2008. Außerdem sollen unsere neuen Methoden es den Schulen ermöglichen, mit geringem finanziellem Aufwand in die Nanotechnologie einzudringen.

## Eigenschaften des Graphens

Von Graphit weiß man, dass die Eigenschaften stark anisotrop sind. So ist innerhalb einer Basalebene eine extrem gute elektrische und thermische Leitfähigkeit

### Die Autoren

Luca Banszerus (oben) und Michael Schmitz sind die Bundessieger für die beste interdisziplinäre Arbeit des diesjährigen Wettbewerbs Jugend forscht. Beide waren bereits 2008 zusammen mit Tobias Kaufmann Bundessieger in der Kategorie „originellste Arbeit“. Sie stammen aus Bad Münstereifel und besuchen dort das St. Michael-Gymnasium. Nach dem Abitur in diesem Jahr wollen beide Physik studieren, Michael in Aachen, Luca gerne in den USA – oder auch an der RWTH Aachen.

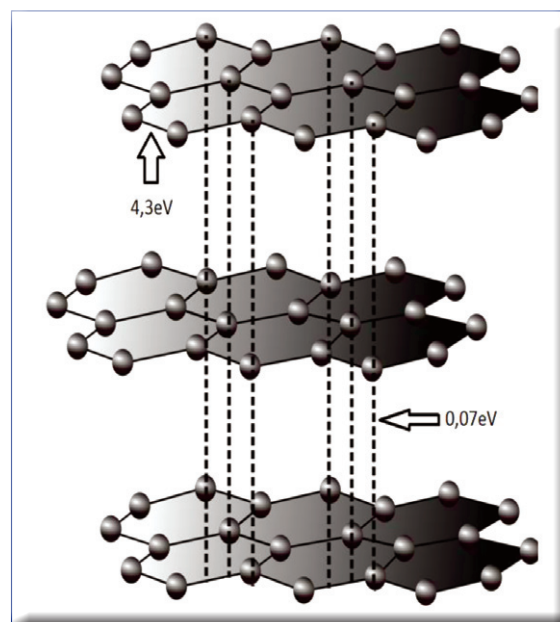
gegeben, während Graphit orthogonal der Basalebenen thermisch und elektrisch isoliert. Außerdem fällt auf, dass natürliches Graphit relativ einfach in Flocken aufzuspalten ist, was bedeutet, dass man die Basalebenen leicht voneinander trennen kann.

Diese Richtungsabhängigkeit der Eigenschaften lässt sich durch die Bindungsenergien im Graphit relativ einfach erklären. Die Bindungsenergie innerhalb einer Basalebene beträgt 4,3 eV, während die orthogonalen Van-der-Waals Kräfte zwischen den Basalebenen nur 0,07 eV betragen (Abbildung 1).

Mit den Bindungsenergien lassen sich einige Eigenschaften des Graphens erklären. Viel wichtiger ist jedoch, dass sie die Herstellungsmethode für Graphen aus Graphit erklären. Durch die Verteilung der Bindungsenergien wird klar, dass sich die Basalebenen relativ einfach voneinander trennen lassen, aber auch, dass die Basalebenen in sich eine sehr große Stabilität aufweisen. Deshalb funktioniert die „Scotch-Tape“-Methode, bei der man Graphit mittels Tesafilm entlang der Basalebenen aufspaltet und nach mehrmaliger Ausdünnung auf ein Substrat drückt. Bei der Aufspaltung entlang der Basalebenen spielt Sauerstoff, der in dem Graphit interkaliert, eine wichtige Rolle.

Das Graphen besitzt ebenfalls einige Eigenschaften des Graphits, wie zum Beispiel die gute thermische und elektrische Leitfähigkeit; allerdings kann damit

Abbildung 1: Bindungsenergien im Graphit (Abb.: Anton (rp)).





nicht die extrem hohe mittlere freie Weglänge erklären. Sehr anschaulich wird dieses Phänomen jedoch, wenn man bedenkt, dass sich über den gesamten Graphen-Kristall ein einziges  $\pi$ -Molekülorbital ausbreitet, das heißt, dass die elektrischen Eigenschaften des Graphens durch die  $\pi$ -Elektronen bestimmt sind. Hieraus wird nun auch klar, weshalb im Graphen ballistische Leitungsvorgänge auftreten. Aufgrund des sehr günstigen Verhältnisses von Oberfläche zu Volumen eignet sich Graphen sehr gut als Sensor. Bereits ein einziges Gasmolekül kann die elektrischen Eigenschaften des Graphens stark verändern und damit detektiert werden.

An dem Tight-Binding-Modell des Graphens (Abbildung 2) sieht man, dass sich das Valenzband und das Leiterband an den sechs K-Punkten und K'-Punkten mit einer verschwindenden Bandlücke von 0 eV berühren. Für die Anwendung des Graphens als Halbleitermaterial ist es jedoch nötig, eine künstliche Bandlücke zu erzeugen. Die Fermikante befindet sich im Graphen genau an den K-Punkten und K'-Punkten der Dispersionsrelation und kann durch verschiedene Substrate, Gase oder ein angelegtes Feld erhöht, beziehungsweise abgesenkt werden. Ein weiteres hochinteressantes Phänomen ist das lineare Verhalten von  $E(p)$  bis  $E \approx 2,8$  eV, so dass zur Beschreibung eines Elektrons im Graphen nicht die Schrödinger-Gleichung, sondern die Dirac-Gleichung verwendet wird.

## Herstellung von Graphen

Bereits in unserer ersten Jugendforscht-Arbeit von 2008 verwendeten wir die Scotch-Tape-Methode zur Herstellung von Graphen-Flakes. Bei dieser Methode wird natürliches Graphit auf Tesafilm gedrückt

Abbildung 2: Tight-Binding-Modell des Graphens.

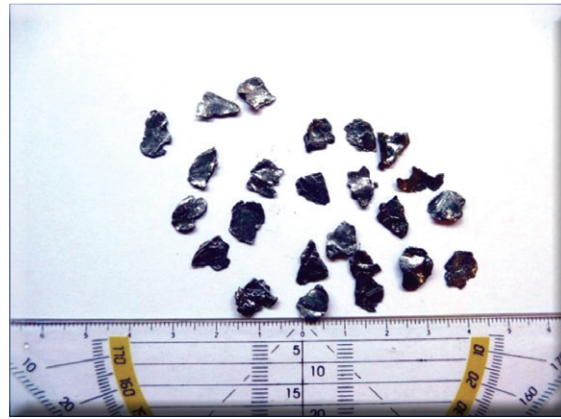
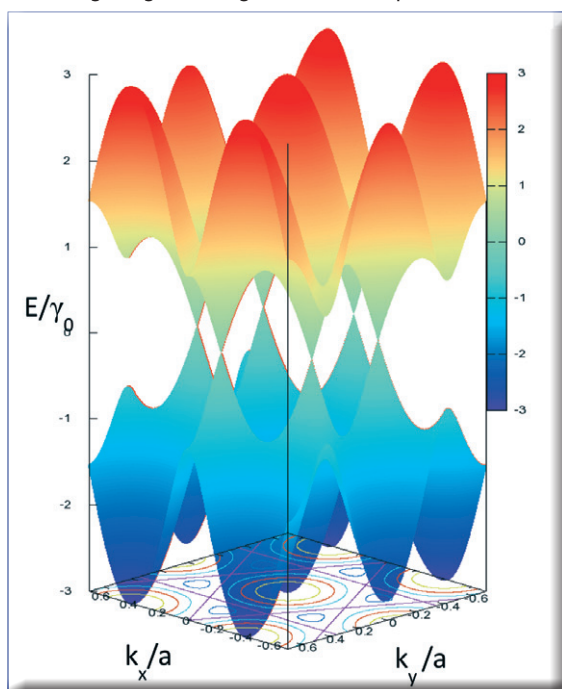


Abbildung 3a:  
Natürliche  
Graphit-Flocken.

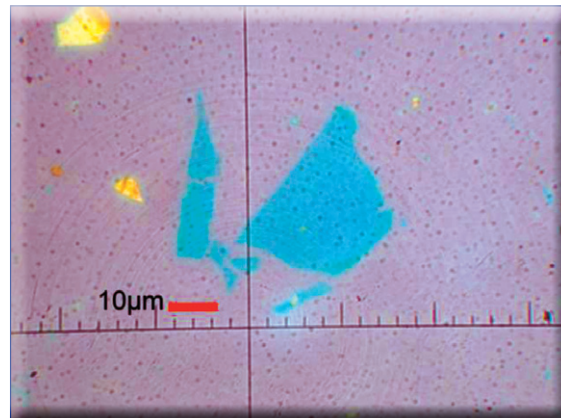


Abbildung 3b:  
2008 war dies  
ein gutes Flake  
(Multilayer).

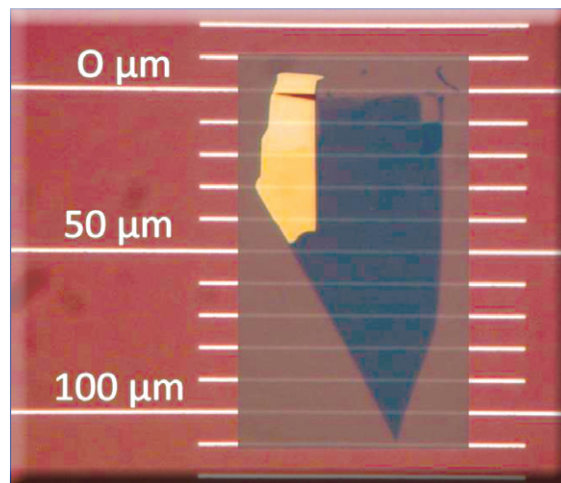
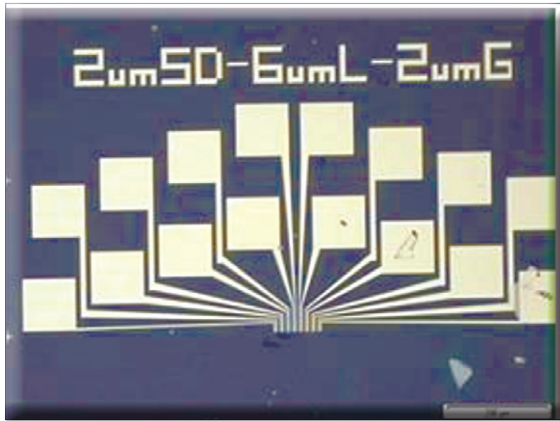


Abbildung 3c:  
2009 hergestellter  
Fewlayer.

und mehrmals ausgedünnt, indem man den Tesafilm faltet und wieder abzieht (Abbildungen 3a, b und c). Nach der Ausdünnung wird der Tesafilm auf ein Si/SiO<sub>2</sub>-Substrat gedrückt, um so Graphen durch Interferenzeffekte sichtbar zu machen. Bei diesem Verfahren bleiben viele Graphitbröckchen und Multilayer, aber auch Graphen-Monolayer auf dem Substrat haften.

Mittels Aceton und IPA wird das Substrat noch von Klebstoffrückständen befreit. Mit einem Auflichtmikroskop kann man nun nach Graphen suchen und es anschließend elektrisch kontaktieren. Noch vor zwei Jahren schafften wir es gerade einmal, Graphen-Flakes von etwa 20 x 30 μm herzustellen. Diese mussten mittels optischer Lithographie und Metalldeposition kontaktiert werden. Da diese Verfahren sehr teuer

Abbildung 4:  
Lithographie.



und in der Schule nicht durchführbar sind, suchten wir dieses Jahr nach einer Alternative, mit der man eine kontaktierte Graphen-Probe in jeder Schule herstellen kann. Damit wir überhaupt eine Chance hätten, die Flakes zu kontaktieren, müssten diese erst einmal größer werden. Schon 2008 stellten wir fest, dass die Graphen-Flakes bei natürlichem Graphit größer wurden als bei industriell gefertigtem Graphit. Wir suchten also gezielt nach natürlichem Graphit mit möglichst großen Kristallstrukturen. Im Internet wurden wir nach langen Recherchen tatsächlich fündig und konnten Graphit mit Kristallstrukturen von bis zu 1 mm kaufen. Durch dieses Graphit wuchsen unsere Flakes nochmals auf 60-80  $\mu\text{m}$  Länge an. Anschließend nutzten wir noch die Interkalation, also die Einlagerung von  $\text{O}_2$  in Graphit, die die Schichten schon fast selbstständig trennt, indem wir bei der Ausdünnung und dem Transfer auf das Substrat vorher Sauerstoff auf das Klebeband leiteten. Damit gelang es uns, sehr dünne Flakes von bis zu 110  $\mu\text{m}$  Länge herzustellen. Mit dieser Flakegröße war es nun zumindest theoretisch möglich, Graphen in der Schule zu kontaktieren. Es fehlte jedoch immer noch eine geeignete Methode, metallische Kontakte an die Flakes anzubringen.

### Kontaktierung von Graphen

Wir suchten nun eine autonome und vor allem günstige Methode, Graphen elektrisch zu kontaktieren, sodass wir nicht mehr auf eine teure und in der Schule undurchführbare Lithographie (Abbildung 4) einer Probe angewiesen waren. Es lief also darauf hinaus, einen Kontakt direkt an das Graphen zu bringen. An diesem Ansatz scheiterten wir während unserer er-

Abbildung 5:  
Kontaktierungs-  
apparat 2008.



sten Arbeit. Es war uns unmöglich, Graphen direkt mit Nadeln zu kontaktieren, da wir diese nicht spitz genug herstellen konnten – geschweige denn sie Mikrometer-genau zu manipulieren oder einen konstanten Kontakt aufrecht zu halten. Selbst für die 10 mal größeren Lithographien mussten wir auf eine extrem sperrige Kontaktierungsapparatur inklusive Schwingungs-dämpfendem Untergrund zurückgreifen (Abbildung 5).

Diese Apparatur von 2008 besitzt ein Auflichtmikroskop, um die Probe zu sehen, und zwei weitere Mikroskope, die über ihre Objektive Nadeln sehr fein in X-, Y- und Z-Richtung steuern können.

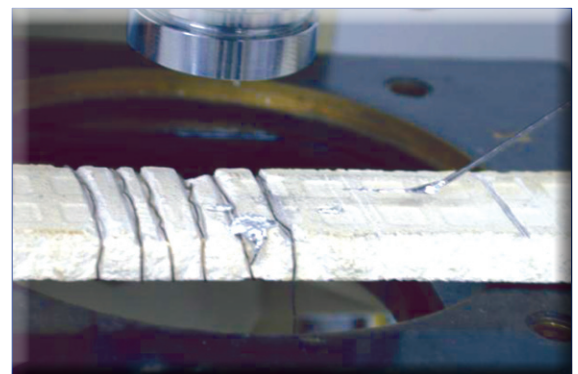
Zuerst versuchten wir, mit dieser Apparatur feine Spuren aus Silberleitlack zu ziehen. Allerdings mussten wir schnell feststellen, dass das Lösungsmittel viel zu schnell verdunstete und die Spuren etwa 40  $\mu\text{m}$  breit waren. Damit war eine zweiseitige Kontaktierung eines Flakes nicht möglich. Außerdem war fraglich, ob der Silberleitlack, der aus vielen kleinen Silberpartikeln bestand, für unsere Zwecke geeignet wäre.

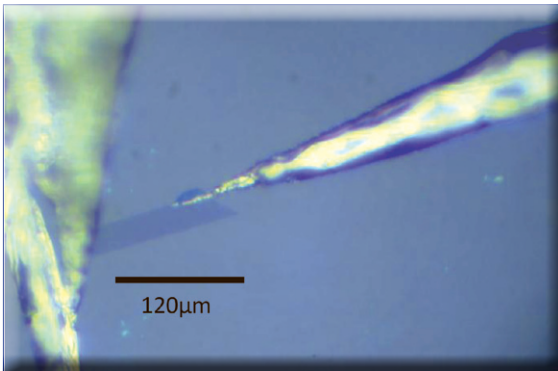
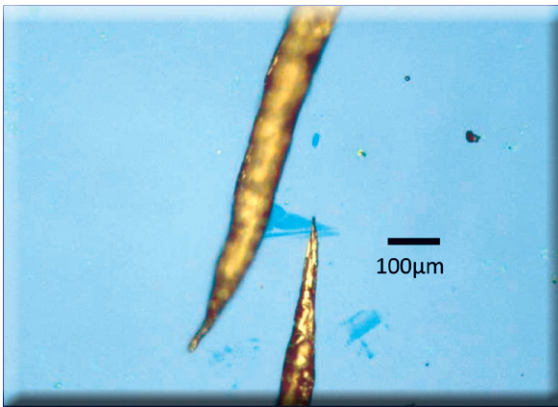
Anschließend stellten wir uns eine scheinbar „blöde“ aber doch entscheidende Frage: Wieso kann man das Graphen nicht einfach anlöten? Mit einem normalen Lötkolben ginge das sicher nicht, aber unter dem Mikroskop könnte man die Probe erhitzen und mit den Kontaktnadeln löten.

Wir bauten uns also aus einer Badezimmerkachel und einem Konstantendraht eine Probenheizung. Mit einem digitalen Thermometer kontrollierten wir die Temperatur. Zunächst schmolzen wir auf einem Deckgläschen Lötzinn und versuchten damit, Drähte zu ziehen. Durch das Flussmittel im Lötzinn war es jedoch nicht möglich, da das Lötzinn so Kügelchen ausbildete. Zudem waren wir mit der Temperatur bereits relativ nah an dem kritischen Wert von 320  $^{\circ}\text{C}$ , bei dem sich das Graphen entweder aufrollt oder mit Sauerstoff reagiert.

Damit war klar, dass wir ein anderes Material zum anlöten brauchten. Es sollte eine Schmelztemperatur von unter 200  $^{\circ}\text{C}$  besitzen und relativ gut auf Glas haften.

Abbildung 6: Indium auf Heizung.





Abbildungen 7a und b: Indiumkontakte am Graphen.

Unter den Metallen besitzen Zinn und Indium relativ niedrige Schmelzpunkte. Indium hat jedoch den Vorteil, dass es sehr gut auf Glas haftet. Deshalb beschlossen wir das Löten mit einem Stück Indiumdraht zu versuchen, dass wir noch in unserer Sammlung besaßen. Wir schmolzen den Draht auf einem Glas-träger zu einem Tropfen zusammen. Aus dem Indiumtröpfchen ließen sich schon bei 170°C sehr feine Drähte ziehen (Abbildung 6). Wenn das Indium aus dem Tropfen gezogen wird, kühlt es ab und erhärtet, sodass man Drähte über mehrere Zentimeter Länge ziehen kann. Uns fiel auf, dass die Drähte eine Spitze von unter einem Mikrometer besitzen, wenn sie abreißen. Deshalb zogen wir keine Indiumspuren auf das Graphen, sondern zogen einen Indiumdraht aus dem Tropfen und schmolzen ihn genau auf dem Flake wieder auf. So ließen sich sehr feine Indiumkontakte auf dem Graphen aufbringen (Abbildung 7a, b).

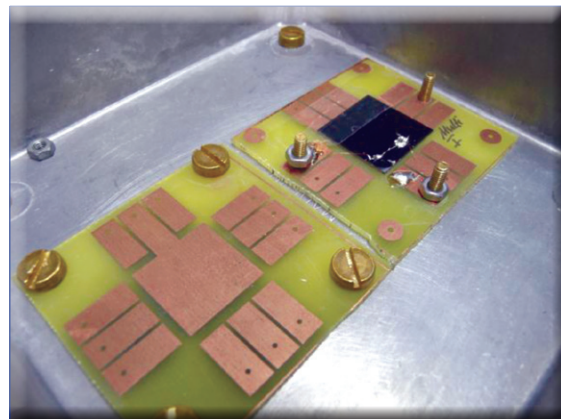
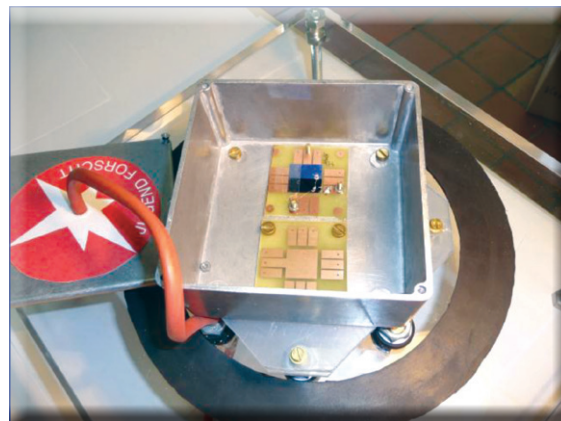
Damit hatten wir es tatsächlich geschafft. Wir hatten die Lithographie, die es bis dato unmöglich machte, kontaktiertes Graphen in der Schule herzustellen, umgangen. Ein weiterer Vorteil der Indiumkontakte ist, dass sie an den Enden sehr dick werden, sodass man die Enden problemlos mit Leitsilber kontaktieren kann. Damit konnten wir sogar auf unsere Kontaktapparat verzichten, die uns damals nur einen sehr instabilen Kontakt auf der Lithographie ermöglichte.

Infolge unserer neuen Kontaktierungsmethode entstand die Idee einer völlig neuartigen und simplen Kontaktierungsapparatur. Die neue Apparatur sollte wesentlich kleiner als die alte sein und möglichst

schnelles, störungsfreies Kontaktieren jedweder Probe gewährleisten. Weiterhin sollte die Kontaktierung möglichst so erfolgen, dass die Probe dabei keinem Verschleiß ausgesetzt würde. Wir hatten früher immer das Problem, dass Lithographien nur eine bestimmte Anzahl von Kontaktierungen überstanden bis sie zerkratzt und unbrauchbar waren. Ideal wäre es also, den Kontakt nicht erst auf der Probe, sondern möglichst davor und zwischen verschleißfreien Materialien herzustellen. Wir entwarfen eine Kupferplatine, die als Probenträger dienen sollte (Abbildungen 8a und b).

Auf die große Kupferfläche in der Mitte wird der Wafer mit der Probe fest fixiert, gleichzeitig dient die Fläche als Backgate-Kontakt für die FET-Versuche. Das Substrat ist mit 2 cm Kantenlänge breiter als der Backgate-Kontakt. Von den angelöteten Indiumdrähten wird mit Leitsilber ein fester Kontakt zu den Kupferkontaktpads hergestellt. Jede Probe erhält also einen eigenen Probenträger, auf den sie fest verbaut wird und auf dem jeglicher Verschleiß am Graphen selber oder an den Indiumkontakten ausgeschlossen ist.

Die einzelnen Kontaktpads können dann durch Schrauben angefahren werden. Durch diesen Aufbau ließ sich die Größe des Messaufbaus minimieren und ein extrem stabiler Kontakt mit dem Graphen herstellen, sodass der vorher benötigte schwingungsfreie Tisch überflüssig wurde. Nun hatten wir es also geschafft, den gesamten Herstellungsprozess bis zur Kontaktierung so zu optimieren, dass er mit minimalem Aufwand in der Schule betrieben werden kann.



Abbildungen 8a und b: Messaufbau und Kontaktmasken.

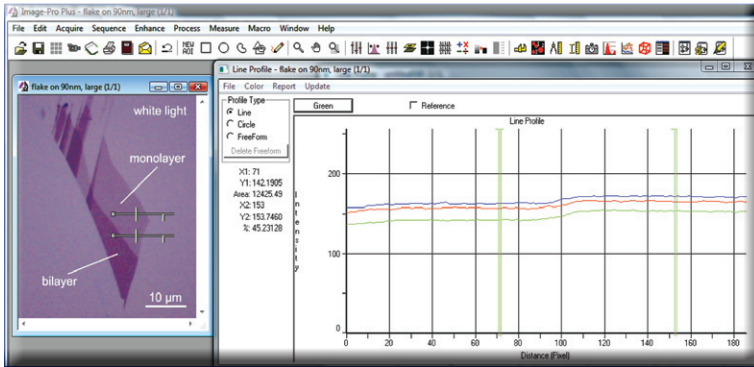
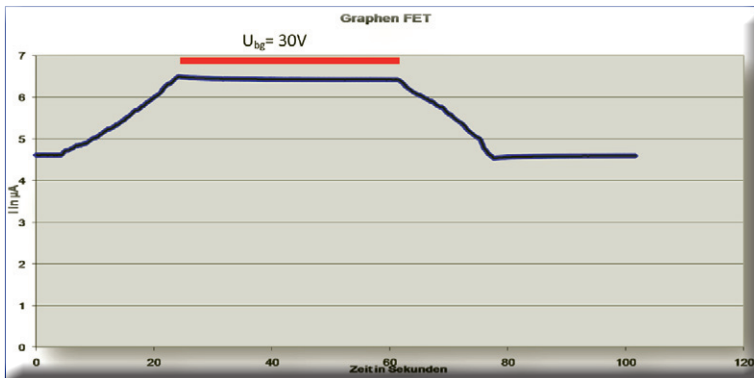


Abbildung 9: Intensitätsmessung Graphen.

Abbildung 10: Graphen-Feldeffekt unseres Transistors ohne Abzug des Kontaktwiderstandes.



Damit war uns eines unserer Ziele, das Graphen nun endgültig auch für den Schulunterricht greifbar zu machen, gelungen. Nun wurde es Zeit, sich den elektrischen Messungen am Graphen zu widmen.

### Nachweisen von Monolayern

Mit ein wenig Erfahrung und einem guten Mikroskop kann man einen Monolayer relativ leicht identifizieren. Um jedoch explizite Aussagen machen zu können, mussten wir ein Verfahren entwickeln, mit dem man die Monolayer optisch charakterisieren kann. Gra-

phen wird auf den Wafern durch eine Interferenz der Wellen sichtbar, die am Graphen, dem SiO<sub>2</sub> und am Silizium reflektiert werden. Der dadurch entstehende Kontrast ist hauptsächlich von der Schichtdicke des SiO<sub>2</sub> und der Anzahl an Graphenlagen abhängig.

$$C_1 = \frac{I_{\text{Graphen}} - I_{\text{Substrat}} \times 100}{I_{\text{Substrat}}}$$

Mit einer Bildanalysesoftware messen wir die Intensität des Substrates und die des Flakes (Abbildung 9). Die prozentuale Abweichung der Intensitäten liegt bei Monolayern auf 90nm SiO<sub>2</sub> zwischen 5 und 8 Prozent.

Diesen Wert haben wir mit Fotos abgeglichen, die von Firmen, die Graphen-Monolayer verkaufen, ins Internet gestellt werden. Es zeigt sich, dass der Kontrast einer beliebigen Lagenzahl immer ein ganzzahliges Vielfaches des Monolayerkontrasts ist. Für einen Bilayer ist so zum Beispiel ein Kontrast probenabhängig zwischen 10 und 20 Prozent zu erwarten. Dies ist eine kosten- und aufwandsfreie Methode, Monolayer zu beweisen, ohne von einem Institut beispielsweise eine Ramanspektroskopie anfertigen zu lassen, was für uns nicht in Frage kam und beim Herstellen von Graphen zeitraubend und unpraktisch ist.

### Der Graphen-FET

Das Prinzip eines Feldeffekt-Transistors beruht auf der Verdrängung von Ladungsträgern aus dem Leitungsband eines Stoffes. Durch ein elektrisches Feld wird sowohl die Ladungsträgerdichte als auch die Ladungsträgermobilität eingeschränkt, wodurch der Widerstand des Stoffes steigt.

Da das Graphen eine sehr hohe Ladungsträgerdichte und Ladungsträgermobilität und nur eine verschwindende Bandlücke besitzt, konnte beim besten Graphen-FET, der bis heute demonstriert wurde, nur eine Stromänderung um den Faktor sechs erzeugt werden. Unser FET kann nach Abzug des Kontaktwi-

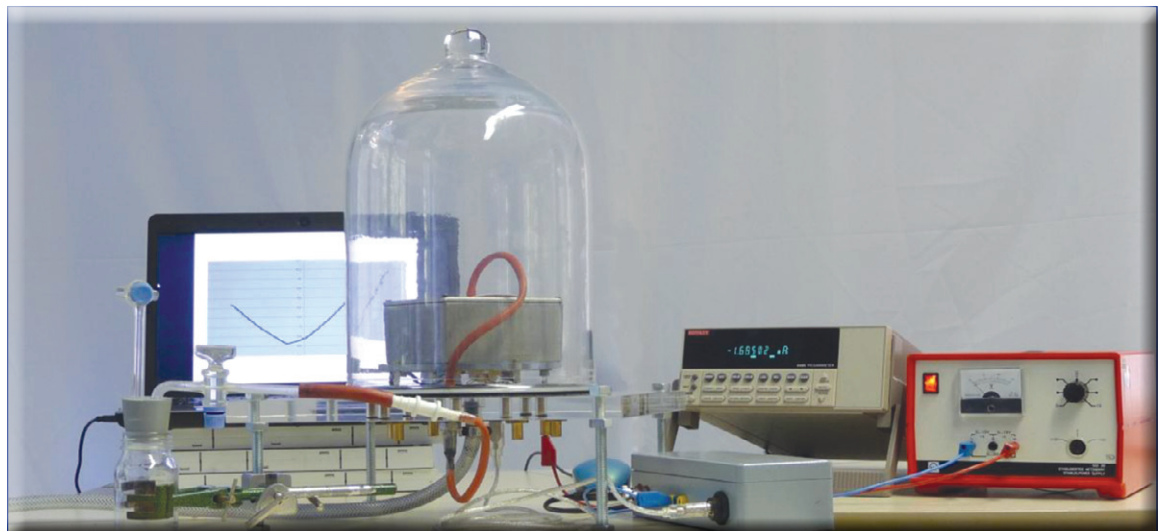


Abbildung 11: Messaufbau.

derstandes mittlerweile eine intrinsische On-Off-Ratio von etwa vier verzeichnen (Abbildung 10).

Eine umfassende Verbesserung unserer Messungen erreichten wir bereits durch die neue Kontaktierungsweise, die endlich einen festen Kontakt bot. Ungeschirmt liegen Stromschwankungen inzwischen nur noch im zweistelligen Nanoamperebereich. Da an Graphen bei einer anliegenden Drain / Source Spannung von 30 mV ein probenspezifischer Strom zwischen 0,5 und 10  $\mu\text{A}$  fließt, ist diese Ungenauigkeit für eine ungeschirmte Messung bereits mehr als tolerabel und um Welten genauer als die alte Nadel-Kontaktierung.

Um die Schwankungen noch weiter zu vermindern, was für die Detektierung kleinster Konzentrationen notwendig ist, bauten wir eine Probenkammer aus Metall, die auf der einen Seite für eine gute Schirmung sorgte, und auf der anderen Seiten klein genug war, um wiederum in einer Vakuumblocke Platz zu finden (Abbildungen 11 und 12).

Eine regelbare Atmosphäre ist nötig, da in der Raumluft viele Gase enthalten sind, die sich als Adsorbate ans Graphen binden und so zum Beispiel während einer Feldeffektmessung zu nicht feldeffektbedingten Stromschwankungen führen. Zudem realisierten wir eine Messelektronik, die Stromänderung und Gate-Spannung synchron aufzeichnen kann.

Neben dieser grundsätzlichen Verbesserung der Messtechnik gibt es noch andere Ansätze den Feldeffekt generell zu verstärken.

Der Literatur lässt sich entnehmen, dass es möglich ist, eine künstliche Bandlücke von bis zu 0,5 eV im Graphen zu erzeugen, wenn man es in Sub-10 nm-Streifen, den Graphene-Nanoribbons schneidet. Allerdings ist diese Auflösung nur mit einem Elektronenstrahlolithographen oder einem elektrochemischen Ätzverfahren mittels STM möglich.

Für uns war es unmöglich, eine Elektronenstrahl-Lithographie zu erhalten. Allerdings bot sich für uns die Möglichkeit, eine STM-Ätzung<sup>1</sup> am Praktikums-STM der RWTH Aachen auszuprobieren, da unser Betreuungslehrer Herr Stein noch Kontakt zu einem ehemaligen Schüler dort hatte.

Bei dem Ätzverfahren wird zwischen Graphen und STM-Spitze ein Potenzial von etwa 2,5 V angelegt.

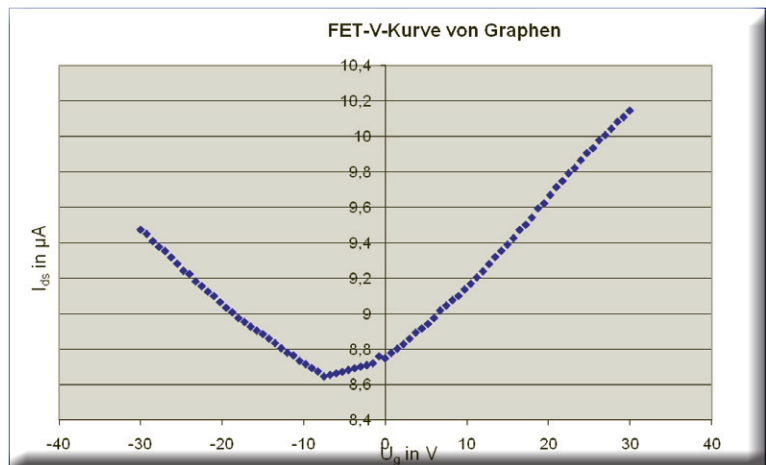


Abbildung 12: Charakteristische V-Kurve im Graphen.

Nun kann man mit der STM-Spitze die gewünschte Struktur in das Graphen ätzen. Beim STM-Ätzen ergibt sich ein Problem daraus, dass beim Ätzen das leitende Graphen auf dem  $\text{SiO}_2$  weggeätzt wird und die Spitze bis tief in das Substrat nachgeregelt wird. Daher konnten wir unsere ersten Ätzversuche nur auf HOPG, einem hochorientiertem Graphit, vergleichbar mit Graphen, machen. Auf dem HOPG konnten wir nach der Optimierung der Ätzparameter, wie zum Beispiel die Geschwindigkeit der Spitze, gezielt Strukturen im Bereich von wenigen Nanometern ätzen (Abbildung 13). Um eine Ätzung auch auf Graphen zu realisieren, ist es notwendig anstatt eines STM ein EFM, also ein Rasterkraftmikroskop mit leitender Spitze, zu benutzen. Wir hofften, bis zum Wettbewerb Strukturen in einen Monolayer geätzt zu haben, bestenfalls sogar Graphene-Nanoribbons.

<sup>1</sup> Bei der STM-Ätzung handelt es sich um einen elektrochemischen Prozess, bei dem der Kohlenstoff mit dem dünnen Wasserfilm unter dem Graphen zu  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2$  reagiert.

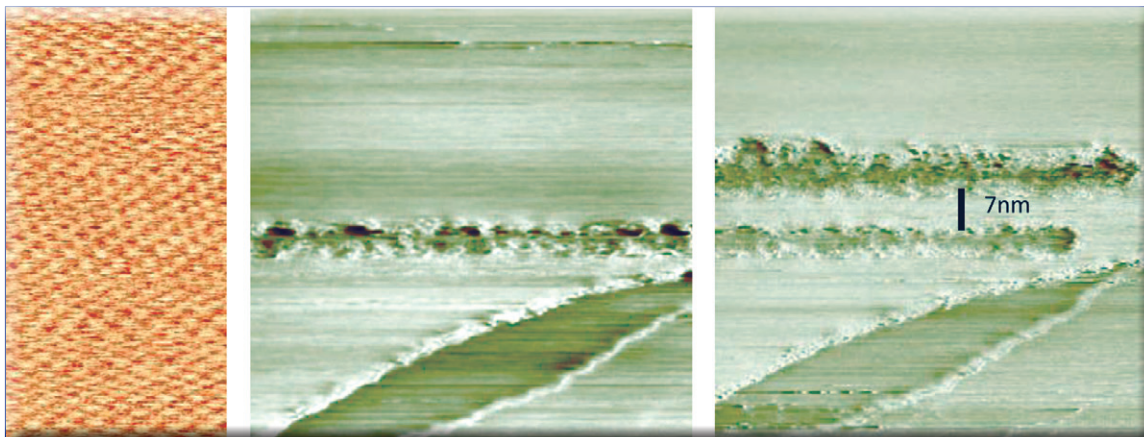


Abbildung 13: HOPG unter dem STM: links atomare Auflösung, mittig und rechts selbstgeätzte Strukturen im HOPG.

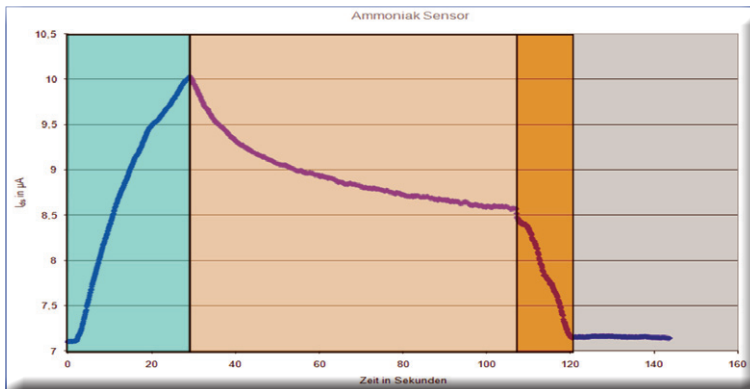
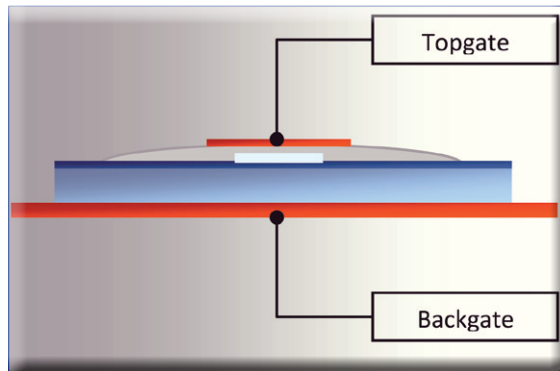
Abbildung 14:  
Double gated FET.

Abbildung 15: Ammoniak-Messung.

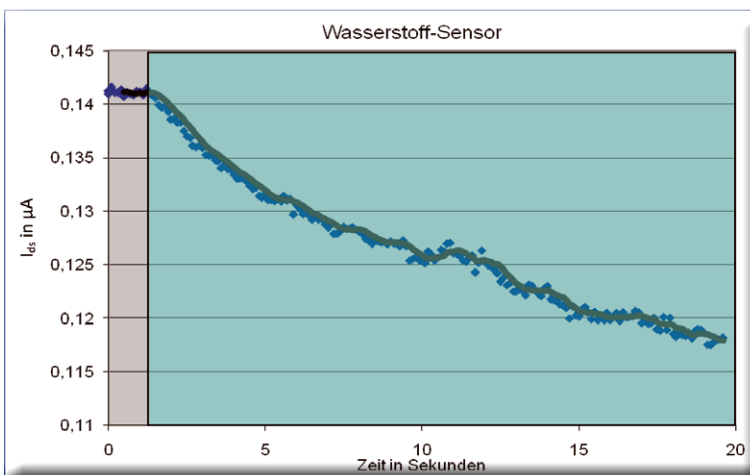
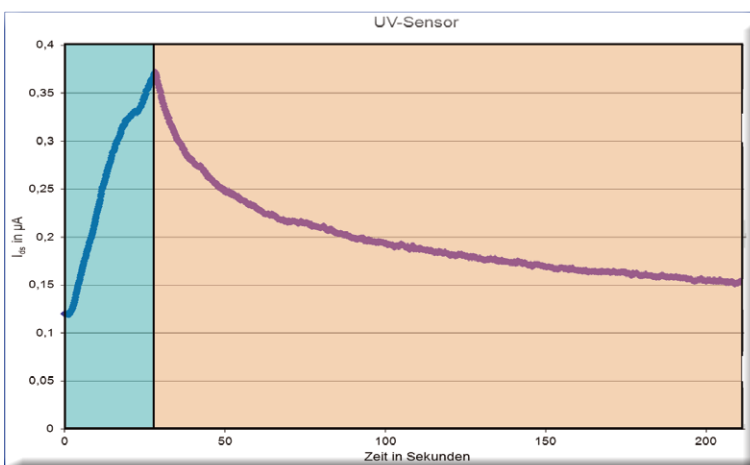


Abbildung 16: Wasserstoffsensoren auf Graphenbasis.

Abbildung 17: „UV-Sensor“ auf Graphenbasis.



Eine weitere Methode, den Feldeffekt zu verstärken, ist es, ein weiteres Gate auf dem Graphen aufzubringen (Abbildung 14). Durch diese zwei Felder soll die Ladungsträgermobilität noch weiter eingeschränkt werden. Zudem ist zu erwarten, dass ein weiteres Substrat auf dem Graphen die Mobilität der Ladungsträger leicht einschränkt und durch Defekte das  $\pi$ -Molekülorbital lokal zerstört.

Für uns stellte sich nun als erstes die Frage, wie man eine weitere möglichst dünne isolierende Schicht auf das Graphen aufbringen kann. Dazu verwendeten wir ein in der Halbleiterindustrie gängiges Verfahren: Spincoating. Beim Spincoating werden auf die zu beschichtende Probe ein paar Tropfen Lack getropft. Da die Probe bereits rotiert, verteilt der Lack sich durch die Zentrifetalkraft gleichmäßig und dünn auf der Probe. Wir bauten unseren Spincoater aus einem herkömmlichen Magnetrührer, bei dem wir den Rührfisch in eine Probenhalterung einbauten, sodass die Probe im Magnetfeld rotierte. Wir probierten verschiedene Sprühlacke und gelöste Kunststoffe aus. Sprühlack erwies sich dabei als sehr effektiv, da er eine gleichmäßige und relativ dünne Schicht hinterließ. Allerdings hatten wir bei vielen Lacken das Problem, dass sie in Aceton löslich waren, da wir das Topgate am leichtesten mit Silberleitlack auftragen konnten, und dieser den Lack wieder auflöste und das Graphen kurzschloss.

Am besten geeignet erschien uns ein in Wasser löslicher Kunststoff. So einen fanden wir zufällig in einem Lösungsmittelfreien Alleskleber. Wir verdünnten ihn mit Wasser und coateten eine dünne Schicht auf eine Graphenprobe auf. Diese konnten wir nun mit Leitsilber kontaktieren, ohne dass die Beschichtung gelöst wurde.

Obwohl wir so eine isolierende Schicht auf das Graphen aufbringen konnten, gibt es noch Probleme eine Elektrode auf das Top-Dielektrikum aufzubringen. Die Indiumkontakte ragen aus dem Lack heraus und schließen das Graphen kurz. Bis zur Präsentation der Arbeit auf dem Wettbewerb wollen wir diese Probleme gelöst haben.

### Sensorische Eigenschaften des Graphens

Aufgrund des sehr geringen Eigenrauschens und der Struktur des  $\pi$ -Molekülorbitals eignet sich Graphen besonders gut für sensorische Zwecke, sogar für die Detektierung einzelner Gasmoleküle. Wir haben es uns zum Ziel unserer Jugend forscht-Arbeit gemacht, die sensorischen Eigenschaften des Graphens mit schulischen Mitteln zu untersuchen.

Wir wollten zuerst die bereits in der Literatur veröffentlichten chemischen Sensoren nachbauen, um etwas Erfahrung in der Graphen-Sensorik zu sammeln.

Zuerst bauten wir also einen Ammoniak-Sensor aus einem Graphendevise. Die Ammoniakmoleküle sollten dabei auf das Graphen adsorbieren und den Widerstand verändern. Nachdem wir unseren Mess-

aufbau für die Gasmessungen optimierten, indem wir eine provisorische Kammer mit einer Vakuumglocke bauten, konnten wir tatsächlich beobachten, wie das Ammoniakgas erst auf das Graphen adsorbierte (blaue Phase) und anschließend erst im Vakuum (beige Phase) und dann unter Sauerstoffspülung (orange Phase) desorbierte (Abbildung 15). Diese Messung zeigt bereits das sensorische Potenzial des Graphens auf.

Wir haben inzwischen weitere Gassensoren auf Graphenbasis gebaut. Wir detektierten Stickstoffdioxid,  $\text{CH}_4$  und  $\text{H}_2\text{O}$ . Einen ähnlich starken Ausschlag wie bei Ammoniak konnten wir bei Wasserstoff feststellen (Abbildung 16).

Einen sehr interessanten Effekt entdeckten wir, als wir Auswirkungen von Licht auf das Graphen untersuchten. Bei kurzwelligem UV-Licht ( $\gamma = 254\text{nm}$ ) verzeichneten wir einen kontinuierlichen Stromanstieg (Abbildung 17). Aus der langsamen, gasähnlichen Desorptionsphase schlossen wir, dass es sich nicht um einen direkten physikalischen Effekt handeln konnte. Stattdessen ist es wahrscheinlich, dass das UV-Licht Sauerstoffmoleküle aufspaltet und somit Ozon entsteht.

Dieses adsorbiert auf dem Graphen und verändert die Ladungsträgerkonzentration. Somit können wir indirekt kurzwelliges UV-Licht mit Graphen nachweisen.

## Großflächige Herstellung des Graphens mittels CVD

Damit Graphen den Schritt aus der Grundlagenforschung machen kann, ist es notwendig, von der Kontaktierung einzelner Flakes dazu überzugehen Graphen in einer Top-down Methode großflächig abzuscheiden und anschließend zu strukturieren.

Die großflächige Herstellung von Graphen wird derzeit durch chemische Gasphasenabscheidung (CVD) auf verschiedenen Metallsubstraten realisiert. Das Metall dient dabei nicht nur als Substrat, sondern auch als Katalysator. Die Erfahrung hat gezeigt, dass Kupfer sich besonders gut zur Synthese von monolagigem Graphen eignet, da die Kohlenstofflöslichkeit im Kupfer relativ gering ist, sodass sich beim Auskühlen der Probe keine zweite Lage Graphen bildet. Genau wie bei der Nanoröhrchensynthese wird ein Methan/Wasserstoff/Argon Gemisch über das beheizte (etwa  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ ) Substrat geleitet. Bei der hohen Temperatur zersetzt sich das Methan, und der Kohlenstoff scheidet sich  $\text{sp}^2$ -hybridisiert auf dem Kupfer ab. Der Wasserstoff dient als Reduktionsmittel für das Kupfer und das Argon als inertes Verdünnungsgas.

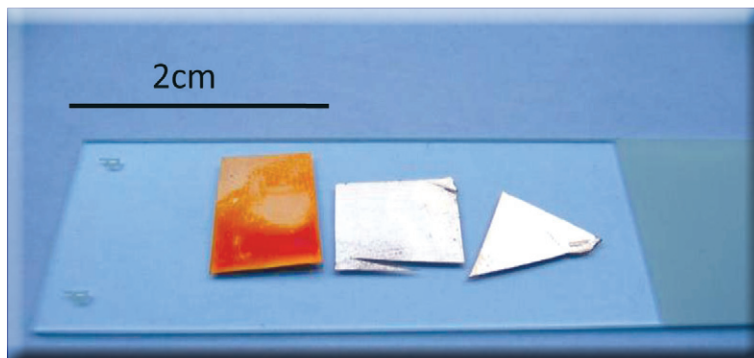


Abbildung 18: Oxidationstest: v.l.n.r. oxidiertes Stück Kupferblech; Kupferblech mit CVD-Graphen; Referenzstück Kupfer.

Bei unserem Versuchsaufbau benutzten wir ein Quarzrohr als CVD-Reaktor, das wir einfach mit einem Bunsenbrenner erhitzen. Da wir keine Flowmeter zur Regulierung der Durchflussgeschwindigkeiten der verschiedenen Gase besaßen, benutzten wir einen Standzylinder, der mit einem mit Wasser gefülltem Ausgleichsgefäß verbunden war um unsere Reaktionsgase im richtigen Verhältnis<sup>2</sup> anzumischen.

Die relativ ungenaue Regulierung der Temperatur und Durchflussgeschwindigkeiten erwiesen sich aufgrund der Katalysatorfunktion des Substrates als unproblematisch. Äußerst schädlich ist jedoch Restsauerstoff im System, der zum Beispiel durch das Totvolumen von Kolbenproben in den Standzylinder gelangt. Zwar liegen wir mit unserem Gemisch weit unter der Explosionsgrenze von Wasserstoff und Methan; allerdings reagiert das abgeschiedene Graphen sofort mit dem Sauerstoff zu  $\text{CO}_2$ . Nach mehreren Versuchen und der Optimierung unseres Versuchsaufbaus gelang es uns tatsächlich, Graphen auf einem Kupferblech herzustellen. Dies wiesen wir zunächst dadurch nach, dass wir das komplett mit Graphen bedeckte Stück Kupferblech zusammen mit einem Stück unbehandeltem Kupferblech auf eine  $270\text{ }^\circ\text{C}$  heiße Heizplatte legten. Nach wenigen Minuten war das unbehandelte Stück Kupfer stark oxidiert, während das mit Graphen beschichtete Stück oxidfrei blieb (Abbildung 18).

Das Graphen wirkt auf dem Kupfer als Oxidationsschutz, da es die Kupferoberfläche komplett bedeckt. Für eine elektrische Anwendung des CVD-Graphens ist es notwendig, das Graphen vom Kupfer auf ein isolierendes Substrat zu übertragen. Ideal wären dazu unsere  $\text{Si/SiO}_2$ -Wafer, da sie eine FET-Anwendung ermöglichen und das Graphen unter einem Auflichtmikroskop sichtbar machen. Der Transport von Graphen wird mit Hilfe von Polymeren<sup>3</sup>, die als Zwischensubstrate dienen, realisiert. Das Polymer wird in einem Lösungsmittel gelöst aufgegeben und auf einer Heizplatte ausgehärtet. Anschließend wird das Kupferblech mit einer  $\text{Fe(III)Cl}$ -Lösung weggeätzt. Das Polymer, an dem das Graphen nun haftet, wird nun

<sup>2</sup> Für unsere Versuche verwendeten wir eine Mischung von  $\text{Ar:H}_2:\text{CH}_4 \approx 93:2:5$

<sup>3</sup> Wir benutzen 1g PMMA gelöst in 25ml Chlorbenzol

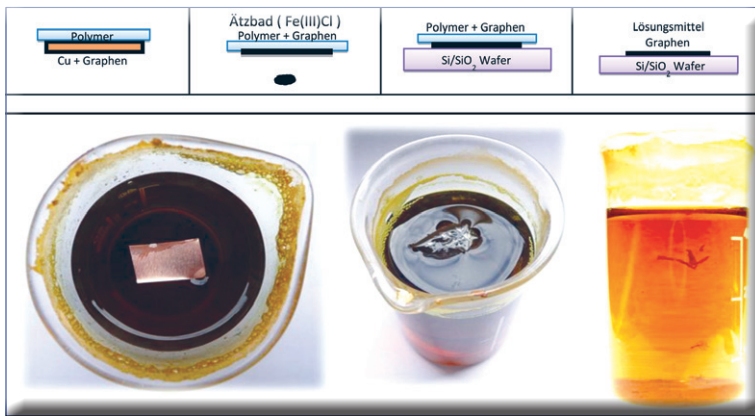


Abbildung 19: Schematische Darstellung des Transports von CVD-Graphen.

auf einen Si/SiO<sub>2</sub>-Wafer aufgeschmolzen und anschließend mit Aceton gelöst (Abbildung 19).

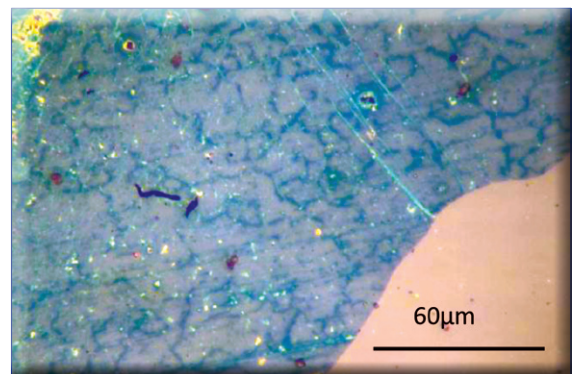
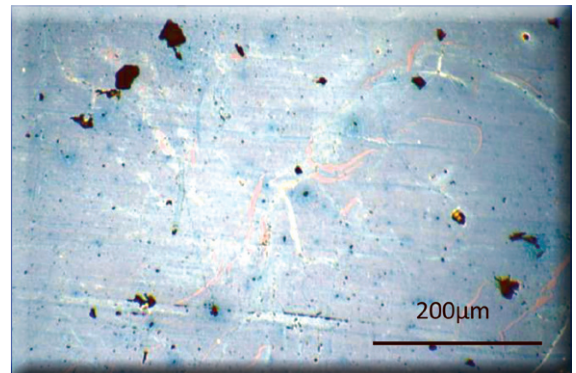
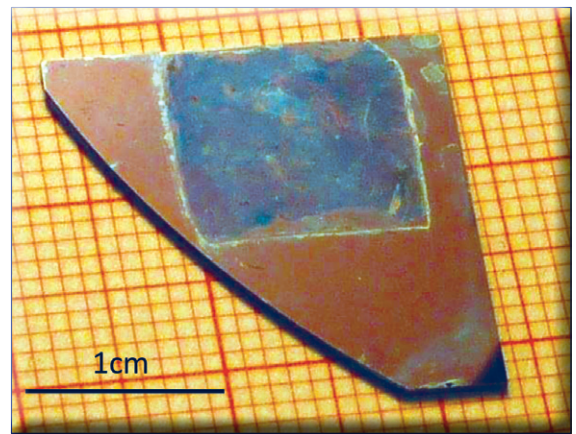
Nach der Übertragung des Graphens von Kupfer auf die Wafer war es möglich, das Graphen zu untersuchen. Überraschend war für uns, dass man bereits mit dem bloßen Auge eine für Graphen typische Färbung auf dem Wafer erkennen konnte. Bei genauer Beobachtung unter dem Mikroskop stellten wir fest, dass wir das Graphen in relativ guter Qualität übertragen konnten. Allerdings weist das CVD Graphen viele Falten auf, da es von einem sehr rauen Kupferblech auf die viel glatteren Wafer übertragen wurde (Abbildungen 20a, b und c).

Um zu verifizieren, dass es sich bei der Schicht, die man unter dem Mikroskop sieht um Graphen handelt, baten wir ein Institut der RWTH Aachen, unsere Proben mit einem REM zu untersuchen (Abbildung 21); dort fertigte man sogar ein Ramanspektrum unserer Probe an (Abbildung 22).

Anhand dieser Messungen kann man davon ausgehen, dass es sich tatsächlich um Graphen handelt. Die REM-Aufnahmen zeigen deutlich eine gefaltete, aber filmartige Struktur. Bei dem Ramanspektrum fiel zwar der D-Peak, der ein Maß für die Defekte im Graphen ist, sehr hoch aus und aufgrund der Breite des 2D-Peaks lässt sich die Lagenzahl nicht genau bestimmen, allerdings sagt der vorhandene G-Peak aus, dass es sich um ein sp<sup>2</sup>-hybridisiertes Kohlenstoffallotrop handeln muss. In Kombination mit den REM-Aufnahmen liegt es nahe, dass es sich tatsächlich um Graphen handelt. Um jedoch einen weiteren Beweis zu liefern, kontaktierten wir das CVD-Graphen und wiesen damit Ammoniak nach (Abbildung 23).

### Fazit

Wir haben unser Hauptziel, elektrisch kontaktierte Graphen-Bauteile mit rein schulischen Mitteln herzustellen und elektrisch zu kontaktieren, erreicht. Für die in der Schule undurchführbare optische Lithographie und die Metalldeposition haben wir eine



Abbildungen 20a, b und c: CVD-Graphen mit dem bloßen Auge und unter dem Auflichtmikroskop.

Methode gefunden, mit der sich auf einem Wafer fast beliebig viele Flakes kontaktieren lassen. Zudem sitzt der Kontakt sicherer denn je, und der Messaufbau ist handlicher und robuster. Der Feldeffekttransistor funktioniert inzwischen wesentlich stabiler und zuverlässiger als zuvor. Wir haben einige sensorische Eigenschaften des Graphens mit schulischen Mitteln erforscht. Zu guter Letzt können wir einen Monolayer optisch sehr zuverlässig identifizieren, beziehungsweise verifizieren.

Indem wir in der Schule ein Verfahren realisierten, mit dem man Graphen auf beliebig großen Flächen herstellen kann, haben wir die Möglichkeit geschaffen, weitere potentielle Anwendungsgebiete des Graphens, zum Beispiel als Oxidationsschutz oder als transparente Elektrode, in der Schule zu erforschen. **CLB**



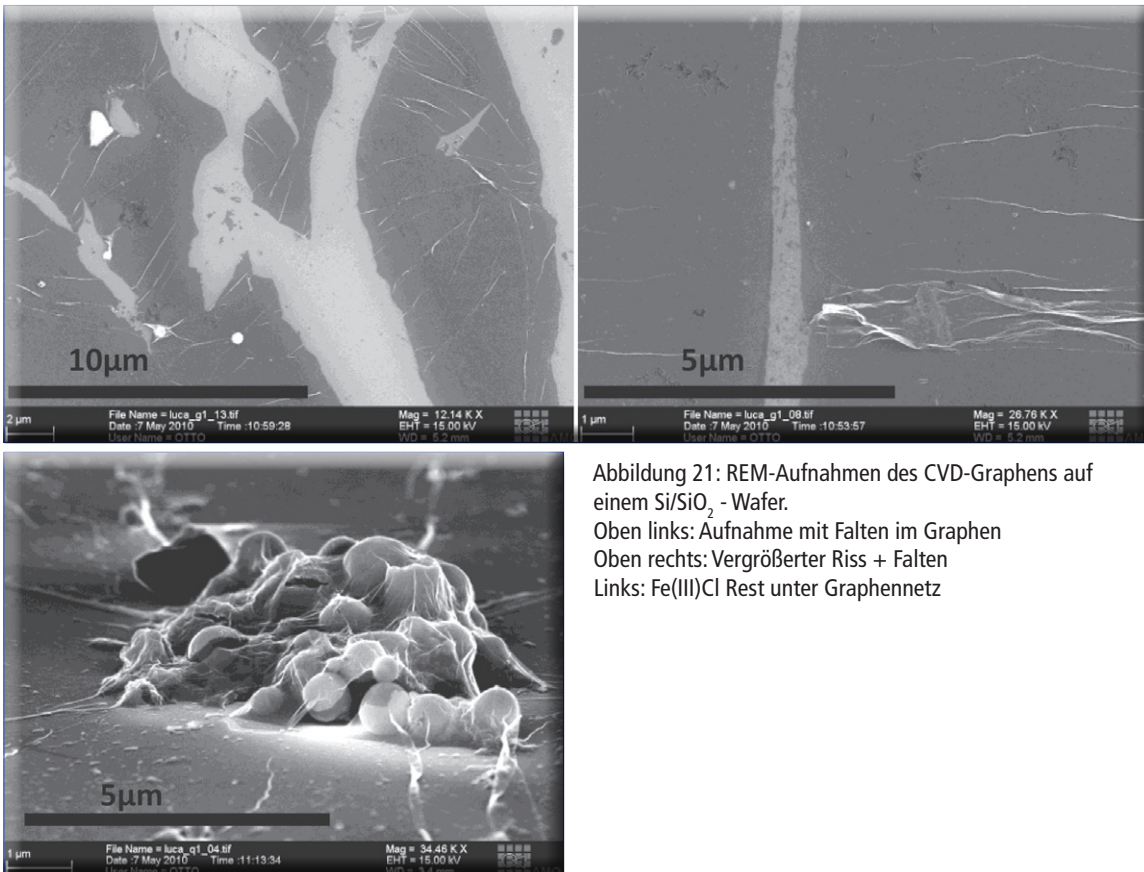


Abbildung 21: REM-Aufnahmen des CVD-Graphens auf einem Si/SiO<sub>2</sub>-Wafer.

Oben links: Aufnahme mit Falten im Graphen

Oben rechts: Vergrößerter Riss + Falten

Links: Fe(III)Cl Rest unter Graphennetz

#### Danksagung

Wir danken unserem Betreuungslehrer Herrn Walter Stein für die vielen Stunden, die er mit uns im Physikraum verbracht hat. Wir danken Herrn Dr. Ingo Braun für das Auflichtmikroskop, ohne das wir kein Graphen hätten sehen können. Wir danken Herrn Tobias Plötzing und Herrn Christopher Matheisen vom Institut für Halbleitertechnik der RWTH Aachen für die Möglichkeit, an dem STM messen zu können. Wir danken Herrn Martin Otto von der AMO GmbH in Aachen für die Raman-Spektroskopie, sowie die REM-Aufnahmen unseres Graphens. Weiterhin danken wir auch Herrn Egbert Hiemann vom Institut für Halbleiter- und Mikrosystemtechnik der Technischen Universität Dresden für die großzügige Spende von Si/SiO<sub>2</sub>-Wafers.

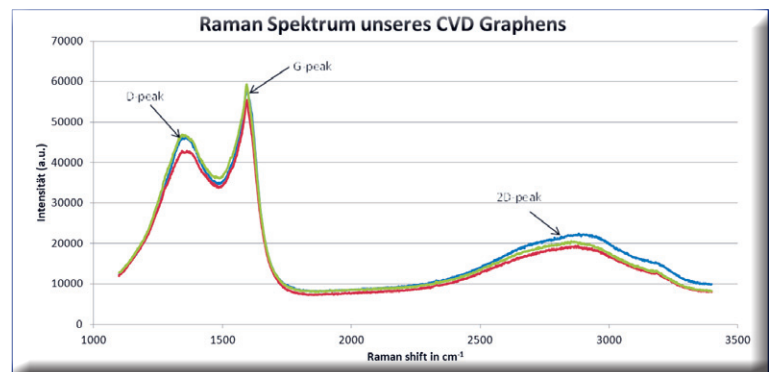
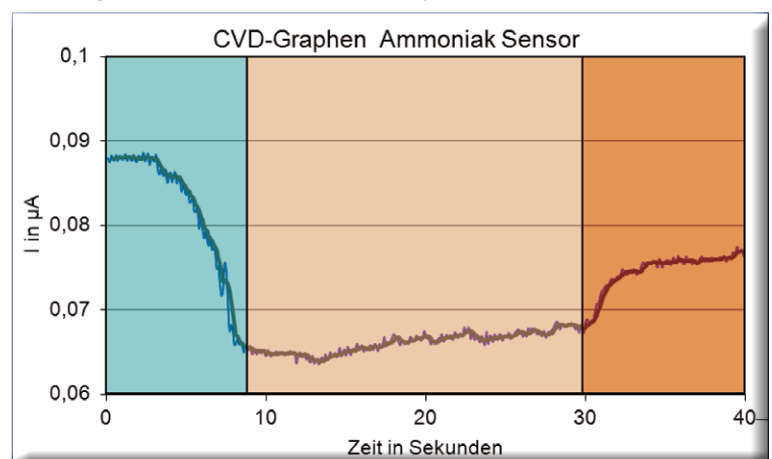


Abbildung 22: Ramanspektrum des CVD Graphens.

#### Literatur

- [1] <http://arxiv.org/ftp/cond-mat/papers/0702/0702595.pdf>
- [2] <http://www.rsc.org/chemistryworld/News/2007/July/30070703.asp>
- [3] [http://onnes.ph.man.ac.uk/nano/Publications/Naturemat\\_2007Review.pdf](http://onnes.ph.man.ac.uk/nano/Publications/Naturemat_2007Review.pdf)
- [4] [http://onnes.ph.man.ac.uk/nano/Publications/RMP\\_2009.pdf](http://onnes.ph.man.ac.uk/nano/Publications/RMP_2009.pdf)
- [5] <http://arxiv.org/pdf/0806.1662>
- [6] <http://grapheneindustries.com/>
- [7] <http://arxiv.org/abs/0705.0259>
- [8] <http://www.youtube.com/watch?v=rphiCdR68TE>
- [9] <http://en.wikipedia.org/wiki/Graphene>
- [10] <http://www.jufo.stmg.de/2008/Graphen/Graphen.pdf>
- [11] <http://bucky-central.me.utexas.edu/RuoffsPDFs/193.pdf>
- [12] <http://bucky-central.me.utexas.edu/RuoffsPDFs/204.pdf>

Abbildung 23: Ammoniaksensor auf CVD-Graphenbasis.



# CLB

Chemie in Labor und Biotechnik

Die beliebten Fragen aus dem CLB-Memory gibt es auch als Buch (244 Seiten mit ca. 80 Abbildungen; ISBN 3-9810449-0-8). Hier stehen Antworten und ausführliche Erläuterungen dazu. Die Themen werden zudem durch einen geschichtlichen Rückblick und Randinformationen in einen Gesamtzusammenhang eingeordnet. Karikaturen von Ans de Bruin lockern die harte Arbeit beim Lösen der Fragen auf.

Preis je Buch: 24,50 Euro incl. MWSt. und Versand.

## Alles Repetito – oder was???

Maren Bulmahn • Rolf Kickuth

Dieses Buch gibt Einblicke in die Chemie und angrenzende Naturwissenschaften in Form von Einführungen in verschiedene Gebiete, Fragen und den dazugehörigen Antworten. Es wendet sich an alle, die Grundlagenwissen festigen wollen. Oberstufenschüler mit Schwerpunkt Chemie/Naturwissenschaften, Auszubildende, Schüler an technischen Fachschulen und auch Studenten in den ersten Semestern von Chemie und Biologie, insbesondere auch in den Bachelor-Studiengängen, können Geleertes wiederholen und vertiefen, aber auch Neues erfahren. Wer seit Jahren im Labor steht, dem macht es Spaß, sein Wissen kurzweilig zu überprüfen und auf dem neuesten Stand zu halten. So haben es die CLB-Leser berichtet, die diese Art von Fragen aus der Zeitschrift kennen. Über 100 Abbildungen und Tabellen erleichtern das Verständnis des Textes; gelegentlich unterbricht ein Comic den Ernst des Stoffes.

ISBN 3-9810449-0-8



9 783981 044904

Bulmahn  
Kickuth

Alles Repetito – oder was???

Rubikon

## Alles Repetito – oder was???

fragt der Bachelor die Laborantin



Maren Bulmahn • Rolf Kickuth

### Abo-Bestellcoupon

JA, ich möchte die CLB abonnieren. Ich erhalte als persönlicher Abonnent die CLB zunächst für ein Jahr (= 12 Ausgaben) zum Preis von 104,00 Euro zzgl. Versandkosten (Inland: 13,60 Euro, Ausland: 24,40 Euro). Das Abonnement verlängert sich automatisch um ein weiteres Jahr, wenn es nicht bis acht Wochen vor Ende des Bezugsjahres gekündigt wird.

Datum / 1. Unterschrift

Name / Vorname

Widerrufsrecht: Diese Vereinbarung kann ich innerhalb von 20 Tagen beim Agentur und Verlag Rubikon Rolf Kickuth, Bammertaler Straße 6–8, 69251 Gaiberg, schriftlich widerrufen. Zur Wahrung der Frist genügt die rechtzeitige Absendung des Widerrufs. Gesehen, gelesen, unterschrieben. Ich bestätige die Kenntnisnahme des Widerrufsrechts durch meine 2. Unterschrift.

Straße / Postfach

Land / PLZ / Ort

Datum / 2. Unterschrift

Telefon oder e-Mail

**FAX-Hotline: 06223-9707-41**

**Für 104,00 Euro pro Jahr (incl. 7 % MWSt., zzgl. Versandkosten) erhalten Sie als persönlicher Abonnent monatlich die CLB mit dem MEMORY-Teil (Firmen- und Bibliothekenabos mit Sonderpreis; siehe [www.clb.de](http://www.clb.de)).**

**Dazu als Abogeschenk das CLB-Buch  
Alles Repetito – oder was???**



Schon toll, unsere Graphen-Hautbeschichtung. Da haben wir zumindest bei Gewitter den Badestrand ganz für uns alleine!

# Kunststoffe aus erneuerbaren Ressourcen

## Jugend forscht 2010: Biotechnologische Milchsäureerzeugung aus Biomasse

Kevin Sifft, Ahrweiler

Bisher ist eine Vielzahl verschiedener Biokunststoffe bekannt. Zu den ältesten zählen Gummi und Celluloid, welches aus Cellulose gewonnen wird. Unter den Neueren findet man unter anderem Poly-Hydroxybuttersäure (PHB), Cellulosetriacetat und viele Polymere auf Stärkebasis. In der folgenden Arbeit wird genauer auf die Erschließung einer neuen Rohstoffquelle eingegangen – exemplarisch am Beispiel der Polymilchsäure (PLA), ein durch Polykondensation oder Ringpolymerisation gewonnenes Biopolymer aus Milchsäure.

In der heutigen Zeit haben Kunststoffe in unserem alltäglichen Leben eine überwältigend große Rolle eingenommen. Sie finden Einsatz in unterschiedlichen Bereichen, vom täglichen Bedarf als Verpackungsmaterial oder Arbeitsgerät über die Verwendung als Werkstoff in der Automobil- oder Luftfahrtindustrie bis hin zum Einsatz als Hightech-Material in der Medizin oder in elektronischen Geräten. Es steht außer Frage, dass der Anteil der Kunststoffprodukte weiterhin steigen wird und, bis auf wenige Ausnahmen, nicht auf sie verzichtet werden kann. Dennoch sollte neben den vielen Möglichkeiten, die neue Werkstoffe bieten, auch beachtet werden, dass immer noch nahezu die Gesamtheit der weltweiten Kunststoffproduktion auf petrochemischen Verfahren basiert. Das führt zu einigen ökologischen Problemen, mit denen man sich in Zukunft verstärkt beschäftigen muss. Kritisiert werden zum einen die Gefahren, die bei Förderung und Transport von Erdöl entstehen. So wird in regelmäßigen Abständen von Tankerunglücken und Umweltkatastrophen berichtet. Im Mittelpunkt der Problematik steht allerdings seit langem das Problem der Entsorgung. Da es

sich bei Kunststoffen um „künstliche“, also naturfremde Stoffe handelt, werden sie meist nicht wie natürliche Materialien zersetzt und mit der Zeit dem Stoffkreislauf wieder hinzugefügt. Somit fallen jährlich große, teilweise umweltschädliche, Abfallmengen an, deren Entsorgung Energie und Geld kostet. Um diesem Problem zu begegnen, wurden in den letzten Jahrzehnten verschiedene Recyclingverfahren entwickelt, sodass heute etwa die Hälfte der Kunststoffabfälle wieder verwertet werden.

Zusätzlich zur Entsorgungsfrage, ist in den letzten Jahren ein weiteres Problem in den Vordergrund getreten. Es gibt mittlerweile pessimistische Prognosen, dass die Erdölreserven vielleicht nicht für die nächsten 50 Jahre reichen. Als Folge würde den Kunststoffen der Rohstoff wegbrechen. Zudem ist die Gewinnung der Grundchemikalien aus Erdöl durch Cracking, bei dem das Öl durch hohen Druck und hohe Temperaturen in die einzelnen Kohlenwasserstoffe gespalten wird, sehr energieaufwändig und somit klimabelastend.

Ein Großteil dieser Probleme ließe sich durch die Herstellung von Kunststoffen aus nachwachsenden Rohstoffen vermeiden. Ihre Produktion ist vom Erdöl unabhängig und sie werden mit der Zeit biologisch abgebaut und somit dem natürlichen Stoffkreislauf wieder zugefügt.

Ihre Herstellung beruht auf Rohstoffen biologischen Ursprungs, zu denen beispielsweise Cellulose, Stärke, Zucker oder Öle gehören. Die Produktionsverfahren sind heutzutage gut genug ausgereift, um viele petrochemische Kunststoffe zu ersetzen.

Bisher ist – wie bereits im Vorspann genannt – eine Vielzahl verschiedener Biokunststoffe bekannt. In der folgenden Arbeit wird genauer auf Polymilchsäure (PLA) eingegangen, ein durch Polykondensation oder Ringpolymerisation gewonnenes Biopolymer aus Milchsäure. PLA ist ohne Additive schnell abbaubar, wasserfest und ein Thermoplast. Besonders hervorzuheben ist, dass Polymilchsäure herkömmlichen Massenkunststoffen wie PET sehr ähnlich ist und deshalb auch mit den bisher in der Industrie üblichen Spritzgussverfahren verarbeitet werden kann.

Neben vielen Vorteilen sind mit der Verwendung nachwachsender Rohstoffe aber auch viele

### Der Autor

Kevin Sifft ist Bundessieger Chemie des diesjährigen Wettbewerbs Jugend forscht. Er wohnt in Bad Neuenahr-Ahrweiler und besucht dort das Peter-Joerres-Gymnasium. Im März dieses Jahres machte er dort sein Abitur (mit den Leistungskursen Chemie, Biologie und Englisch). Nach einem nun anstehenden Freiwilligen Sozialen Jahr in Kambodscha möchte er am liebsten an der Ludwig-Maximilians-Universität in München Chemie studieren.



Gefahren und Umweltbelastungen verbunden. An erster Stelle steht die Konkurrenz zur Verwendung als Nahrungsmittel. Schon eine Erhöhung des Anteils an Biokunststoffen um mehr als 2% würde in den USA zu einem erheblichen Anstieg der Nahrungsmittelpreise führen. In Anbetracht der momentanen Situation, in der etwa ein Siebtel der Weltbevölkerung nicht ausreichend mit Nahrungsmitteln versorgt ist und die Weltbevölkerung stetig wächst, erscheint die Verwendung von Mais oder Kartoffeln als Rohstoff absurd. Daher ist es nicht sinnvoll, Anbauflächen zum alleinigen Anbau für Chemie- oder Treibstoffrohstoffe zu nutzen.

Ökologische Probleme liegen im enormen Dünger- und Pestizidaufwand, der sicherlich nachhaltige Folgen auf örtliche Ökosysteme hat, denn ökonomisch konkurrenzfähig werden nachwachsende Rohstoffe nur bei sehr hoher landwirtschaftlicher Effizienz.

Zuletzt sollte man damit rechnen, dass mit dem steigenden Bedarf an natürlichen Rohstoffen auch die Anbauflächen weltweit wachsen werden. Deswegen sind zum Beispiel Rodungen von Waldgebieten zur Gewinnung weiterer Anbauflächen wahrscheinlich, da sie mit größerer Nachfrage finanzielle Vorteile bringen werden.

Führt man sich diese Argumente vor Augen, ist die Verwendung der Früchte der Pflanzen zur Gewinnung von Zucker, Stärke oder Ölen auf lange Zeit gesehen nicht wirklich optimal. Anders sieht es jedoch mit der Verwendung von Lignocellulose als Ausgangsmaterial aus. Diese fällt in vielen Situationen als Abfall an und ist mengenmäßig das am häufigsten vorkommende Kohlenhydrat. Wenn man cellulosehaltige Materialien biotechnologisch zu Glucose umsetzen könnte, wäre eine große Kohlenstoffquelle erschlossen. So könnte man mithilfe von Cellulasen, einem Enzym, das die Celluloseketten in ihre einzelnen Glucosebausteine spaltet, Stroh, Holz oder auch Altpapier zu einem vergärbaren Zucker umsetzen und diesen als Ausgangsprodukt für die weitere Verarbeitung nutzen. Die durch Enzyme erhaltene Glucose ließe sich durch Milchsäurebakterien zu Milchsäure vergären, welche sich zur normalen Herstellung von Polymilchsäure eignet.

Aus diesem Grund möchte ich mich in dieser Arbeit mit der enzymatischen Umsetzung von Cellulose beschäftigen. Allerdings ist dabei nicht automatisch gegeben, dass sich das so gewonnene Produkt auch durch Fermentation weiterverarbeiten lässt. In Anbetracht dessen, habe ich im zweiten Teil, die Glucoselösung auf ihre Fermentierbarkeit getestet und einige grundsätzliche Versuche zu einer sehr einfach gehaltenen Versuchsreihe zusammen gefasst.

Die darauf folgende Erzeugung des Polymers wird nicht behandelt, da hierzu schon ein ausge-

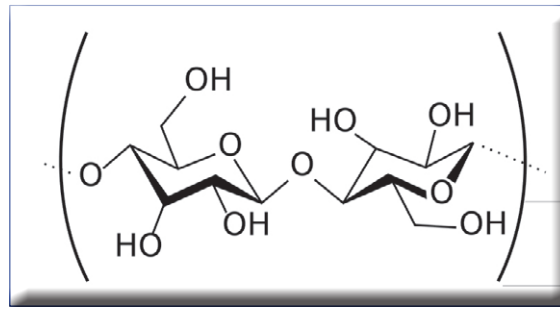


Abbildung 1: Cellulosemolekül.

reiftes technisches Verfahren zur großindustriellen Produktion existiert.

## Umsetzung von Biomasse zu Glucose

### Das Substrat: Cellulose

Cellulose (chemisch  $[C_6H_{10}O_5]_n$ ) kommt in nahezu allen Pflanzenzellen als Gerüstmaterial vor. Damit ist sie die häufigste organische Verbindung auf der Erde. Cellulose gehört zu den Polysacchariden, das heißt sie ist aus etwa 8000-12 000  $\beta$ -D-Glucosemolekülen zusammengesetzt (Abbildung 1).

Die Bindung der Glucosemoleküle erfolgt durch eine 1,4  $\beta$ -glycosidische Bindung. Diese entsteht aus der Reaktion der OH-Gruppe am ersten C-Atom des Moleküls mit der alkoholischen OH-Gruppe am vierten C-Atom eines anderen Glucosemoleküls unter Abspaltung von Wasser. Zuerst reagieren immer zwei Glucosemonomere zum Disaccharid Cellobiose, aus dem sich dann die Celluloseketten zusammensetzen. Die daraus resultierenden Celluloseketten sind dann nochmals untereinander über Wasserstoffbrücken vernetzt, sodass sich fest zusammenhaltende, teilweise kristalline Stränge ausbilden, die Ele-

Abbildung 2: Zusammensetzung der Biomasse.

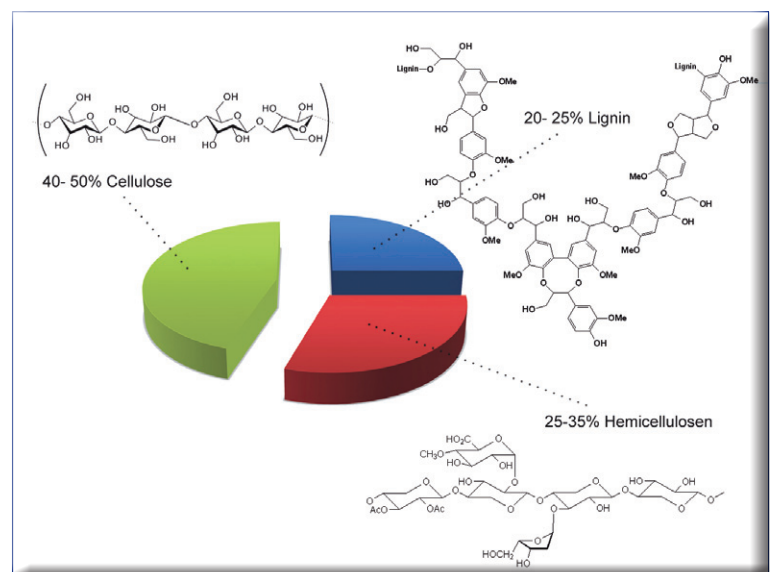
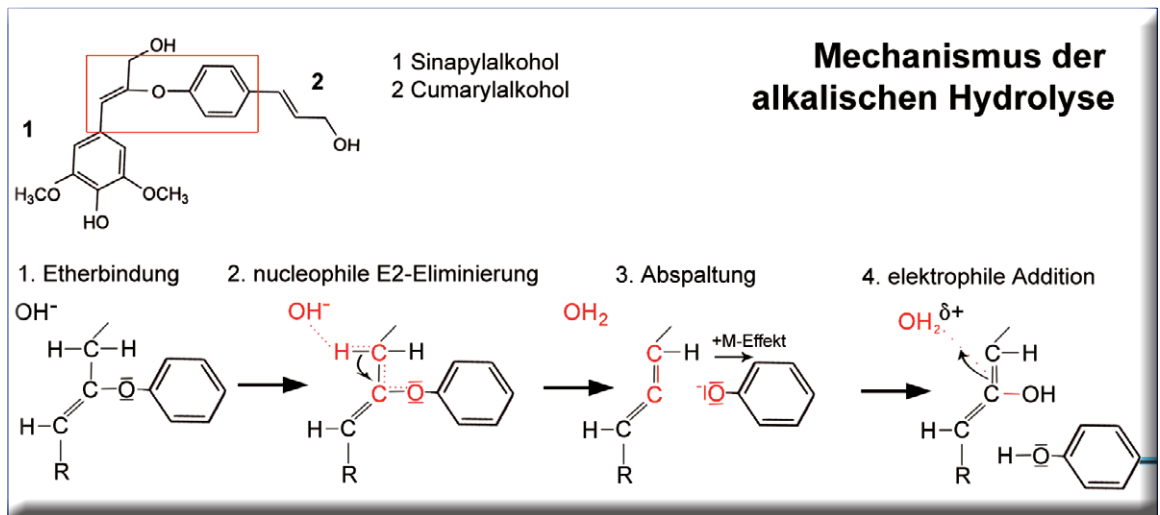


Abbildung 3:  
Spaltung der  
Ligninstruktur mit  
Natronlauge .



mentarfibrillen. Wenn man Cellulose zersetzen möchte, muss der Weg rückwärts beschriftet werden. Durch eine Vorbehandlung lagert sich Wasser zwischen die Ketten und macht die Fibrillen instabil. Danach werden die glycosidischen Bindungen zwischen den Cellobiose einheiten durch Hydrolyse gespalten. Und schließlich trennt man die Untereinheiten weiter in ihre Glucosebausteine auf.

Da dieser Prozess nicht freiwillig abläuft, werden Enzyme benötigt, die die Bindungen durch Hydrolyse auftrennen. Um die Parameter der Reaktion festzustellen und den Versuchsablauf zu testen, wurden zuerst Versuche mit reiner Cellulose als Substrat durchgeführt. Diese ist für die Enzyme einfach umzusetzen und eignet sich als Vergleichsmaterial.

Für diese Versuche verwendete ich Arbocel B600 von der Firma JRS, Rettemaier und Söhne. Substrate mit weiteren, genau bestimmten Inhaltsstoffen waren Vitacel WF101 (25% Hemicellulosen), Arbocel C100 (25% Lignin) und Flitracel EFC 450 (25% Lignin, aber extraktfrei). Darauf folgten Versuche zur Umsetzung von natürlicher Biomasse, welche mit Stroh und Schilf durchgeführt

wurden. Diese Cellulosequellen würden reelle Voraussetzungen am ehesten erfüllen.

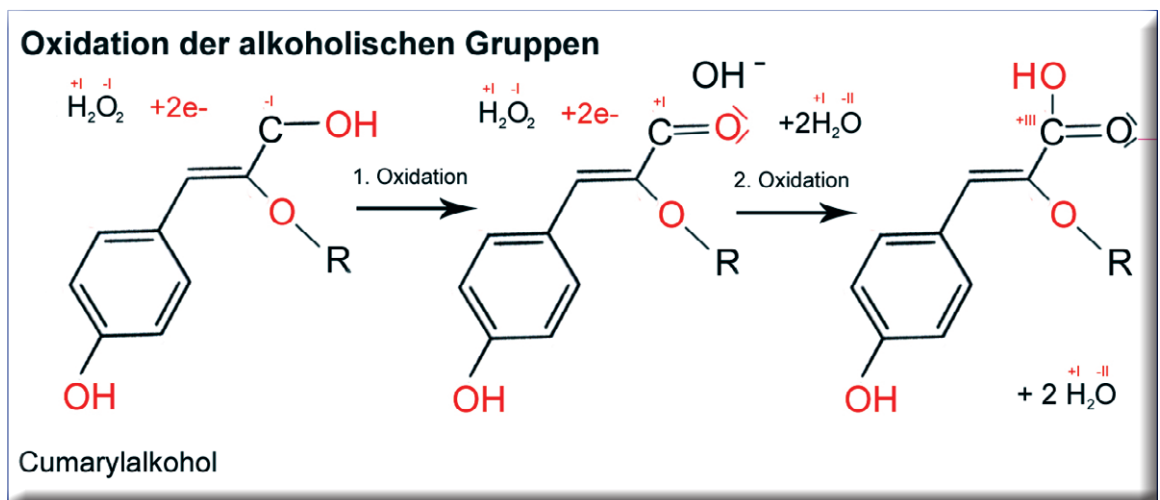
### Lignin-Aufschlussverfahren

Ein Problem bei der enzymatischen Zersetzung der Cellulose stellen jedoch die anderen Bestandteile der Biomasse dar. So sind neben der Cellulose noch Hemicellulosen (aus Xylose, Arabinose und weitere) und Lignin, ebenfalls ein Biopolymer, enthalten. Ihr Gehalt folgt etwa dem Verhältnis 4:3:2 [8] (Abbildung 2).

Die Struktur des Lignins ist sehr fest und umschließt die Celluloseketten, sodass sie für die oberflächlich wirkenden Enzyme keine Angriffsfläche mehr bieten. Deswegen werden hier Aufschlussverfahren benutzt, die auf verschiedenen Mechanismen basieren.

Allen gemeinsam ist jedoch die Wirkung durch Lösung des Lignins in Wasser. Dieses besteht aus drei-dimensional vernetzten aromatischen (oft phenolischen) Molekülen, die wasserunlöslich sind. Das Ziel der Verfahren ist es dementsprechend, diese Bindungen zu lösen und so polare Gruppen zu bilden [24].

Abbildung 4:  
Transformation der funktionellen Gruppen durch Wasserstoffperoxid.



Möglich ist dies durch die „Versuche“ aufgeführte Vorbehandlung. Damit werden die Bindungen entweder durch Hitze und Druck oder chemisch gespalten. Beim Alkali-Verfahren [8] wird Natronlauge verwendet. Diese kann die OH-Gruppen der Phenole deprotonieren und somit polare Gruppen schaffen. Obwohl Phenole Alkohole sind, können sie als Säure fungieren; dies ist auf den +M-Effekt zurückzuführen. So wird die negative Ladung auf das gesamte Molekül übertragen und stabilisiert.

Desweiteren ist die Natronlauge sogar in der Lage, die Etherbindungen zwischen den einzelnen aromatischen Verbindungen des Ligninpolymers zu trennen.

Hauptbausteine sind Cumarylalkohol, Coniferylalkohol und Sinapylalkohol. Nun kann durch das Hydroxid-Ion die Sauerstoffbindung des Ethers wie bei einer Eliminierung entfernt werden [8]. Dabei greift das negative OH-Ion nucleophil am Wasserstoffatom des benachbarten C-Atoms an (Abbildung 3, 2. Schritt). Es bildet sich für einen Moment ein Zwischenzustand aus, bei dem das Wasserstoffatom gleichermaßen mit dem Hydroxid-Ion und dem Kohlenstoffatom verbunden ist. Gleichzeitig wird durch die nun freie Bindungsstelle des Kohlenstoffatoms eine Doppelbindung zum Kohlenstoffatom an der Etherbindung hergestellt.

Dieses Atom hätte nun fünf Bindungen, die es nicht halten kann. Zum gleichen Zeitpunkt spaltet sich das Sauerstoffatom der Etherbindung ab und das Wasserstoffatom verbindet sich mit OH-Ionen zu Wasser (Abbildung 3, 3. Schritt). Zwischen den beiden Kohlenstoffatomen ist eine feste Doppelbindung entstanden.

Das Phenolat-Ion konnte sich nur deswegen abspalten, weil die entstehende negative Ladung gut stabilisiert werden kann. Sie wird durch den +M-Effekt auf den gesamten Kohlenstoffring verteilt, wie es schon zuvor bei der Dissoziation des Wasserstoffprotons geschehen ist. Doch da Alkoholat-Ionen im Vergleich zu Hydroxid-Ionen die stärkeren Basen sind wird das Sauerstoffatom wieder protoniert.

Im folgenden 4. Schritt greift das polare Wassermolekül elektrophil an der C-C-Doppelbindung an und es wird ein Wasserstoffproton addiert. Die nun frei werdende Bindung des zweiten, positiv polaren C-Atoms wird von einem OH-Ion besetzt.

Auch Wasserstoffperoxid kann zur Lösung der Lignine benutzt werden. Es ist aufgrund der einfachen O-O Bindung relativ instabil und zerfällt in Wasser und Sauerstoff. Im Vergleich zum  $H_2O_2$ -Molekül ändert sich die Oxidationszahl des Sauerstoffs im Wassermolekül von -I auf -II. Somit wirkt  $H_2O_2$  als Oxidationsmittel (Abbildung 4). Die alkoholische Gruppe wird zuerst zu einer Aldehydgruppe und daraufhin zur Carboxylgruppe oxidiert. Diese

macht das Molekül wasserlöslich. Eine Spaltung der Etherbindung kann ebenfalls mit starken Säuren als Katalysatoren erreicht werden. Ein Wasserstoffproton greift dabei elektrophil am Sauerstoffatom der Etherbindung an und positiviert dieses.

In Folge dessen spaltet sich ein Rest mit Alkoholgruppe ab und ein Carbokation bleibt am anderen zurück. An dieser Stelle bindet ein Wassermolekül, welches sich spaltet, sodass eine OH-Gruppe an das Carbokation addiert wird. Somit ist der Ether gespalten [24].

### Biokatalysatoren: Enzyme

Die biologische Zersetzung von Cellulose in der Natur basiert auf Enzymen. Diese kommen beispielsweise in Baumpilzen oder im Darm von Termiten vor. Diese Art der Cellulosespaltung kann auch zur technischen Umsetzung von Cellulose zu Glucose verwendet werden. Darauf begründet sich meine Versuchsreihe.

Die Hydrolyse der Cellulose läuft in zwei Teilschritten ab, und es sind mindestens drei verschiedene Enzyme beteiligt (Abbildung 5).

Zuerst werden die langen Celluloseketten an der glycosidischen Bindung in kleinere Einheiten gespalten. Es entsteht das Disaccharid Cellobiose. Dies wird durch die eigentlichen Cellulasen erreicht, zwischen denen aber nochmals in Endo- und Exoglucanasen differenziert wird. Endoglucanasen trennen zuerst die Wasserstoffbrücken zwischen den Celluloseketten, um einzelne spaltbare Ketten zu separieren. Daraufhin spalten Exoglucanasen diese Ketten hydrolytisch in die einzelnen Cellobiose-Moleküle.

Auf diese Reaktion folgt die Zerlegung der Cellobiose in Glucose, welche durch Beta-Glucosidase ermöglicht wird. Zum einen reduziert die Weiterzerlegung der Cellobiose die Produkthemmung

Abbildung 5: Verlauf der enzymatischen Reaktion.

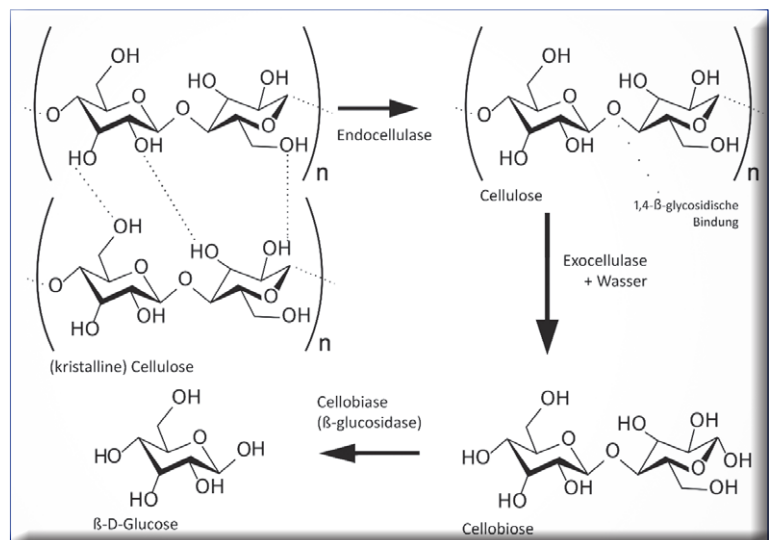
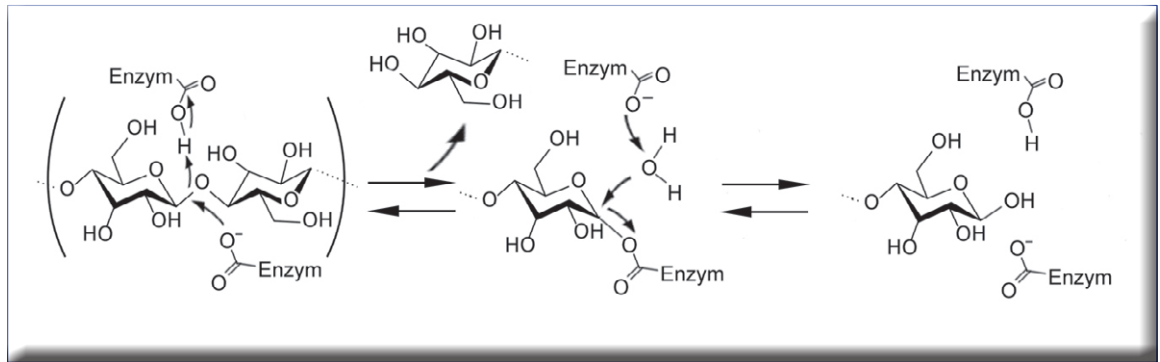


Abbildung 6:  
Wechselwirkungen und Katalyse im Aktiven Zentrum (Abb.: Wikipedia: Cellulase).



der Cellulasen, und zum anderen entsteht Glucose als vergärbarer Zucker. Die Enzyme wirken als biologische Katalysatoren und beschleunigen viele Reaktionen so stark, dass sie überhaupt erst ermöglicht werden.

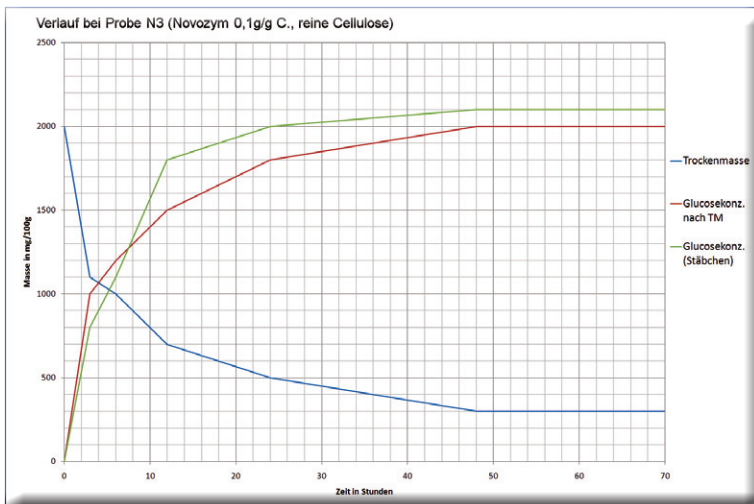
Für die Katalyse ragen funktionelle Gruppen der Aminosäuren in das Aktive Zentrum und treten kurzzeitig in Wechselwirkung mit dem Substrat. Für einen Moment entsteht ein Enzym-Substrat-Komplex. Durch diese Bindungen wird die Aktivierungsenergie der Reaktion erheblich gesenkt [4]. Daraus ergibt sich das Schlüssel-Schloss Prinzip; das bedeutet, dass nur ein bestimmtes Substrat ins Aktive Zentrum des Enzyms passt. Enzyme sind also substratspezifisch. Dies soll am Beispiel der Exoglucanase (Cellulase) genauer beleuchtet werden. Der länglichen Form des Cellulosemoleküls angepasst, bildet ein „Graben“ das Aktive Zentrum des Enzyms. Vorgelagert ist über eine schmale Auswölbung eine Art zweites, reaktives Zentrum. Um die Cellulose passend zu fixieren, liegen in bestimmten Abständen polare Aminosäuren, wie beispielsweise Serin. Diese verfügen über OH-Gruppen, welche Wasserstoffbrücken zu den OH-Gruppen der Cellulose eingehen. Durch diese Passgenauigkeit wird, neben der Fixierung der einzelnen Polymerketten auch gewährleistet,

dass immer genau vier Glucosebausteine der Kette in der Mitte gespalten werden können [13]. Im Aktiven Zentrum liegt eine Vielzahl an verschiedenen Aminosäuren, von denen alle an der Reaktion beteiligt sind. Doch wenige spielen eine elementare Rolle. Während der Hydrolyse wirken im Speziellen die Asparaginsäure und die Glutaminsäure. Beides sind saure Aminosäuren, die über eine zweite, freie Carboxylgruppe verfügen. Diese kann in Wechselwirkung mit dem Substrat treten. Im Ausgangszustand liegt eine Carboxylgruppe deprotoniert und eine protoniert vor. Erstere bildet oft die Asparaginsäure, da ihr  $pK_s$ -Wert mit 3,9 etwas niedriger als der von Glutaminsäure mit 4,3 liegt.

Anhand der Grafik soll die Reaktion etwas genauer beschrieben werden: Das negativ geladene Sauerstoffatom der Carboxylgruppe greift nucleophil die Bindung zwischen dem 1. Kohlenstoffatom des linken Glucosemoleküls und dem Sauerstoffatom der glycosidischen Bindung an (Abbildung 6). Dadurch bindet die Aminosäure an diesen Teil des Cellulosemoleküls und eine Bindungsstelle am Sauerstoffatom wird frei. Über diese negative Ladung greift das Sauerstoffatom das Wasserstoffatom der protonierten Carboxylgruppe an und verbindet sich damit zur endständigen OH-Gruppe. Ein Cellobiosemolekül ist damit freigesetzt, der zweite an der Reaktion beteiligte Rest ist jedoch noch an die Aminosäure gebunden. Jetzt reagiert die zweite, nun negativ geladene  $COO^-$ -Gruppe mit einem Wassermolekül.

Als Rest entsteht ein Hydroxid-Ion, welches wiederum in der Lage ist das erste Kohlenstoffatom des Glucosemoleküls der Cellulosekette nucleophil zu substituieren und dessen Bindung zur funktionellen Gruppe der Aminosäure aufzulösen. Als Folge entsteht auch hier eine endständige OH-Gruppe und beide Aminosäuren liegen wieder im Ausgangszustand vor. Wie der Grafik zu entnehmen ist laufen diese Reaktionen im Gleichgewicht ab. Bei der Hydrolyse liegt das Gleichgewicht weit auf der rechten Seite. Jedoch können die Enzyme keinen Einfluss auf das Gleichgewicht nehmen, sodass nicht beliebig viel Cellulose umgesetzt werden kann. Einzig durch die Entfernung

Abbildung 7:  
Verlauf bei Probe N3.





des Produkts, der Cellobiose und deren Weiterverarbeitung zu Glucose, wird das Gleichgewicht weiter nach rechts verschoben.

Ebenfalls einflussreich auf die Geschwindigkeit sind die Reaktionsbedingungen, wie pH-Wert und Temperatur. In der Regel sollten diese 50°C nicht übersteigen, da solche Temperaturen zur Zerstörung der Proteinstruktur führen würden. In einem gewissen Bereich folgen Enzyme der RGT-Regel, die Reaktionsgeschwindigkeit verdoppelt. In meinen Versuchen verwendete ich Enzyme von Novozym und Genencor. Die Produkte von Novozym nennen sich Celluclast 1.5L (Cellulase) und Novozym 188 ( $\beta$ -Glucosidase). Bei beiden handelt es sich um verdünnte Enzymlösungen.

Für Novozymes Enzyme sind ein pH-Wert von 4,8, 50 °C und ein Mischungsverhältnis von 5:1 optimale Bedingungen [23]. Die Enzymkonzentration beträgt durchschnittlich 0,1 g/g Cellulose, wird in meinen Versuchen aber stark variiert. Das von Genencor vertriebene Enzym nennt sich Accelerase 1000 und benötigt eine ähnliche Reaktionsumgebung. Allerdings sind hier alle drei Enzyme bereits miteinander vermischt [20]. Erstaunlicherweise gibt der Hersteller die Konzentration mit 0,5 g/g Cellulose an, was mir außergewöhnlich hoch erschien. Auf Nachfrage jedoch sagte man, dass die Enzymmischung schon sehr stark verdünnt sei. In meinen Versuchen sollten aber auch deutlich geringere Konzentrationen Wirkung zeigen.

## Versuche

In der Versuchsreihe wurden zuerst die Parameter und Bedingungen des Prozesses untersucht. Dazu wurden genau identifizierte Cellulosemehle als Substrat verwendet. So erhoffte ich Aufschluss über die Einflüsse von Konzentration, pH-Wert, Temperatur und Gehalt an Holzstoffen auf die Aktivität der Enzyme zu erlangen. Dann wurden die erhaltenen Erkenntnisse auf natürliche Biomasse als Substrat angewandt. In dieser Versuchsreihe spielte die Vorbehandlung der Substrate eine elementare Rolle. Ein Ziel dieser Versuchsreihen war es, den Prozess so effizient und schnell wie möglich zu gestalten. In erster Linie jedoch galt es zu beweisen, dass auch aus Biomasse gewonnene Cellulose zu einem hohen Prozentsatz in Glucose umwandelbar ist und dementsprechend als Alternative zu stärke- oder zuckerhaltigen Früchten in Frage kommt.

### Arbeitsschritt 1: Das Pretreatment

Durch das „Pretreatment“ (=Vorbehandlung) werden die Lignin- und Hemicelluloseketten, die die Cellulosestränge umgeben und nicht durch die Cellulase gespalten werden können, aufgebrochen und entfernt. Diese Vorbehandlung ist

also ein wichtiger Schritt, um Lignocellulose von beispielsweise Stroh, Schilf oder Reisstroh aufzuschließen und damit nutzbar zu machen (siehe Abschnitt „Lignin-Aufschluss“).

Oftmals wird in der Literatur [25] vom Steam-Exposure-Verfahren gesprochen. Dabei handelt es sich um eine kurzzeitige Erhitzung auf 200 °C unter hohem Druck. Allerdings erscheint mir diese Methode energieineffizient. Folgende Pretreatments fanden in meiner Arbeit Anwendung:

**Erhitzen im Dampfdrucktopf:** Dabei werden 10g der Probe mit 160 ml Wasser für 60 min im Dampfdrucktopf gekocht. Durch den hohen Druck (bis 2 bar) können auch Temperaturen über 100 °C erreicht werden. Damit kommt diese Methode dem obigen Steam-Explosion-Verfahren am nächsten. Der Vorteil liegt im Verzicht auf Chemikalien, sodass eine aufwändige Reinigung nicht mehr nötig ist. Es kann aber alternativ 1% Schwefelsäure hinzugefügt werden, welche die Reaktion beschleunigen soll.

**AFEX:** 10 g der Probe werden mit 2-%iger Ammoniaklösung versetzt und für 3 Stunden bei 90 °C erwärmt. Daraufhin wird die Probe gewaschen [25]. Auch hier ist es das Ziel, den Wirkungsgrad der Hitzebehandlung zu erhöhen.

**Alkali-Mikrowelle:** Als energiesparende Alternative könnte sich die Erwärmung durch Mikrowellenstrahlung erweisen. Hierbei werden 10 g einer Probe in 160 ml 1-%iger Natronlauge für 60 min bei 270 Watt erwärmt [28]. Versuchsweise wurde noch eine Behandlung durch Schwefelsäure im Anschluss erprobt. Denkbar wäre es, die Probe zuerst 30 min mit Schwefelsäure und folgend 30 min mit Natronlauge zu erhitzen. In jedem Fall aber sollte man die Masse nach der Behandlung auswaschen und trocknen.

**Alkali-Wasserstoffperoxid-Verfahren:** Dieses Verfahren ist noch effektiver. Es werden 10 g Biomasse und 1,6g NaOH in 160ml 0,5-%ige  $H_2O_2$ -Lösung gegeben. Dieser Ansatz wird für 36 Stunden bei 50 °C ruhen gelassen und daraufhin gewaschen. Dieses Verfahren eignet sich auch als effektive Ergänzung im Anschluss an die Mikrowellenerwärmung.

### Arbeitsschritt 2: Die Hydrolyse

Das aus Schritt 1 erhaltene Material wird nun zusammen mit Enzymen und Pufferlösung angesetzt. Dazu füllt man 100 ml destilliertes Wasser in eine Duran-Flasche und gibt 2 g Trockenmasse (Gewicht nach der Vorbehandlung) des Probenmaterials hinzu, sodass eine 2-%ige Suspension entsteht. Dieser Mischung wird in Folge 1ml eines Acetatpuffers (pH 4,8) zugefügt und der Versuchsansatz im Wasserbad auf dem Magnetrührer erhitzt. Die Temperatur sollte sich bei 50 °C einstellen und eine Zeit lang konstant bleiben, bevor die Enzyme, gegebenenfalls in verdünnten Lösungen hinzuge-

geben werden. Die Konzentrationen lassen sich aus Tabelle 1 entnehmen.

### Arbeitsschritt 3: Messung des Glucosegehaltes

Nach dem Starten der Hydrolyse muss die Temperatur möglichst konstant bei 50 °C gehalten werden. Dabei sollte ständig gerührt werden. Nach 3, 6, 12, 24, 48 und 72 Stunden wurden Proben entnommen und ihr Glucosegehalt bestimmt. Da die Messung des Glucosegehaltes mit normalen analytischen Methoden (HPLC, Photometer oder elektrisches Blutzuckermessgerät) sehr aufwändig und teuer ist, entwickelte ich meine eigene Messmethode: Ich verwendete handelsübliche Glucosesteststicks zum Messen des Glucosegehaltes im Urin für Diabetiker. Diese basieren auf einem enzymatischen Test und zeigen das Ergebnis auf zwei Farbfeldern an.

Nun könnte man diese Farbfelder mit der Vergleichsskala vergleichen und so Rückschlüsse auf den Glucosegehalt ziehen. Leider ist die Skala zu ungenau. Deswegen legte ich eine Eichreihe mit festgelegten Glucosekonzentrationen an und fotografierte die Teststäbchen bei immer gleichem künstlichem Licht und gleichem Hintergrund bei identischen Kameraeinstellungen. Mit Hilfe dieser Fotos lässt sich die genaue Farbe der Teststäbchen im Computer (Photoshop) auslesen. So erhält man für einen ausgewählten Farbkanal (am besten Grünkanal) einen Farbwert zwischen 255 und 0. Anhand dieser Werte lässt sich in einem Diagramm der Farbwert gegen eine bestimmte Glucosekonzentration auftragen. So lässt sich die Farbe des Teststäbchens also deutlich genauer bestimmen. Mithilfe des erhaltenen Graphen kann man auch neuen Farbwerten einen Wert zuordnen.

Diese Methode erlaubt die Messung der Konzentration bis auf etwa 100 mg/100 g genau. Obwohl ich zu wichtigen Versuchen mehrere

Messungen durchführte vermute ich eine Genauigkeit von etwa 10 %, also 200 mg/100 g. Dies ist zwar keine besonders hohe Genauigkeit, aber es ermöglicht die Erkennung von Tendenzen und mir das Ziehen wichtiger Schlüsse (Tabelle 2).

Verlässlicher ist die Bestimmung der Resttrockenmasse. Die aus der Biomasse entstandene Glucose ist wasserlöslich und läuft beim Filtrieren ab. Bei dem Rest im Filter handelt es sich um die noch nicht umgewandelte Cellulose. Zieht man diese vom Ausgangswert ab, erhält man den Wert der bereits umgewandelten Cellulose. Da ein Mol Cellulose 162g und ein Mol Glucose 180 g ( $C_6H_{10}O_5$  (Cellulose) +  $H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6$ ) wiegt, muss man den erhaltenen Wert wiederum mit 1,11 multiplizieren, um die Masse der entstanden Glucose zu bestimmen. Allerdings kann es sich dabei auch um andere entstandene Zucker handeln. Diese Methode ist durch die hohe Anzahl der Proben sehr aufwändig, wurde aber zum Teil als Vergleich durchgeführt (Tabelle 2).

Beispiel.: [2 g (Anfangsgewicht) – 0,4 g (Resttrockenmasse)] · 1,11 = 1,77 g (Glucose).

## Ergebnisse

### Versuche zu Enzymkonzentration und Versuchsbedingungen

Das Ziel dieser Versuche bestand darin, das Verhalten der Enzyme und die Auswirkung von Enzymkonzentration und Versuchsbedingungen auf deren Aktivität genauer zu untersuchen. Dafür wurde reine Cellulose als Substrat und Vergleichsmaterial verwendet. Die Enzyme von Novozymes müssen zuerst vermischt werden. Dabei stellte sich heraus, dass ein Verhältnis Celluclast/Novozym 188 von 5:1 optimal ist (Versuch N4). Ein höheres Verhältnis sollte nicht gewählt werden, da Novozym 188 mit 32 Euro/kg der teuerste Be-

Tabelle 1:  
Auflistung der  
Versuche.

Versuchsnummer	Cellulosequelle	Enzymkonzentration in g/g Cellulose	Vorbehandlung (Pretreatment)
Versuche mit Novozymes Enzymen			
Standard Substrat reine Cellulose			
N0	reine Cellulose (Arbocel B600)	Celluclast 1.5L 0,1 Novozym 188 0,025	ohne
Bestimmung der Enzymkonzentration			
N1	reine Cellulose (Arbocel B600)	Celluclast 1.5L 0,001 Novozym 188 0,00035	Erhitzen im Dampfdrucktopf (60min)
N2	reine Cellulose (Arbocel B600)	Celluclast 1.5L 0,01 Novozym 188 0,0035	Erhitzen im Dampfdrucktopf (60min)
N3	reine Cellulose (Arbocel B600)	Celluclast 1.5L 0,1 Novozym 188 0,035	Erhitzen im Dampfdrucktopf (60min)
N4	reine Cellulose (Arbocel B600)	Celluclast 1.5L 0,25 Novozym 188 0,05	Erhitzen im Dampfdrucktopf (60min)

Lignocellulose als Substrat			
N8	Holzmehl (Arbocel C100, 25% Lignin)	Celluclast 1.5L 0,1 Novozym 188 0,035	ohne
N9	Holzmehl ohne Extrakte (Filtracel EF450, 25% Lignin)	Celluclast 1.5L 0,1 Novozym 188 0,035	ohne
N10	Zellstoff aus Stroh (Vitacel WF101, 25% Hemicellulose)	Celluclast 1.5L 0,1 Novozym 188 0,035	ohne
Biomasse als Substrat			
N11	Stroh (Biomasse)	Celluclast 1.5L 0,1 Novozym 188 0,035	Alkali/Mikrowelle/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (30min, 270 Watt, 1% NaOH, 0,5% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> für 24h bei 50°C)
N12	Stroh (Biomasse)	Celluclast 1.5L 0,1 Novozym 188 0,035	Alkali/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (2% NaOH, 0,5% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , 36h 50°C)
Versuche mit Genecores Accelerase 1000			
Standard Substrat reine Cellulose			
Bestimmung der Enzymkonzentration			
A1	reine Cellulose (Arbocel B600)	Accelerase 0,05	ohne
A2	reine Cellulose (Arbocel B600)	Accelerase 0,25	ohne
A3	reine Cellulose (Arbocel B600)	Accelerase 0,5	ohne
A4	reine Cellulose (Arbocel B600)	Accelerase 0,1	ohne
Lignocellulose als Substrat			
A6	Holzmehl ohne Extrakte (Filtracel EF450, 25% Lignin)	Accelerase 0,5	Erhitzen im Dampfdrucktopf (60min)
A8	Holzmehl (Arbocel C100, 25% Lignin)	Accelerase 0,5	Erhitzen im Dampfdrucktopf (60min)
A9	Holzmehl (Arbocel C100, 25% Lignin)	Accelerase 0,5	Erhitzen im Dampfdrucktopf mit 1% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (60min)
A10	Holzmehl (Arbocel C100, 25% Lignin)	Accelerase 0,5	Erhitzen im Dampfdrucktopf mit 3% Ammoniaklsg. (60min)
A11	Holzmehl ohne Extrakte (Filtracel EF450, 25% Lignin)	Accelerase 0,5	Erhitzen im Dampfdrucktopf mit 1% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (60min)
Biomasse als Substrat			
Testen der Pretreatments			
A12	Schilf (zerkleinert)	Accelerase 0,5	Erhitzen im Dampfdrucktopf (60min)
A13	Schilf (zerkleinert)	Accelerase 0,5	Erhitzen in der Mikrowelle (600 Watt, 20min)
A14	Schilf (zerkleinert)	Accelerase 0,5	Erhitzen im Backofen mit 2% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (165°C, 30min)
A15	Schilf (zerkleinert)	Accelerase 0,5	Alkali/Mikrowelle (1% NaOH, 270 Watt, 60min)
A16	Schilf (zerkleinert)	Accelerase 0,25	Alkali/Mikrowelle (1% NaOH, 270 Watt, 60min)
A17	Schilf (zerkleinert)	Accelerase 0,25	Mikrow./Acid/Alkali/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (2% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 1% NaOH, 0,5% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )
A18	Schilf (zerkleinert)	Accelerase 0,5	Alkali/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (1% NaOH, 0,5% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , 36 h 50°C)
A19	Stroh (getrocknet)	Accelerase 0,25	Mikrow./Alkali/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (30 min, 270 Watt, 1% NaOH, 0,5% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )
A20	Stroh (getrocknet)	Accelerase 0,25	Alkali/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (2% NaOH, 0,5% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , 36 h 50°C)
A22	Stroh (getrocknet)	Accelerase 0,25	Alkali/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (2% NaOH, 0,5% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , 36h)
A23	Stroh (getrocknet)	Accelerase 0,1	
Altpapier (-Ersatz) als Substrat			
A21	Toilettenpapier	Accelerase 0,25	ohne

Versuch	Gemessene Glucosewerte in mg/100g					
	3 h	6 h	12 h	24 h	48 h	72 h
Versuche mit Novozymes Enzymen						
Standardsubstrat reine Cellulose						
N0	1050	1500	1900	2000	2050	2050
Bestimmung der Enzymkonzentration						
N1	0	0	0	100	150	200
N2	100	200	300	700	1400	1800
N3	800	1100	1800	2000	2150	2200
N4	1300	1700	2100	2200	2250	2250
Lignocellulose als Substrat						
N8	300	300	300	350	350	400
N9	200	300	300	350	350	400
N10	1000	1500	2000	2000	2200	2200
N11	900	1300	1800	1900	2000	2000
N12	900	1400	1700	2000	2000	2000
Versuche mit Genecores Enzymen						
Standardsubstrat reine Cellulose						
Bestimmung der Enzymkonzentration						
A1	500	700	1000	1900	2100	2200
A2	1400	1700	2000	2200	2200	2250
A3	1900	2100	2200	2250	2250	2250
A4	250	900	1700	1900	2200	2200
Lignocellulose als Substrat						
A5	100	300	300	350	350	350
A6	200	300	300	350	400	400
A8	200	250	300	350	350	400
A9	200	300	300	300	400	400
A10	100	250	250	300	400	400
A11	0	300	300	300	300	300
Biomasse als Substrat						
Testen der Pretreatments						
A12	0	0	0	0	0	0
A13	200	300				300
A14	700	900	1000	1000	1200	1300
A15	1500	1900	2000	2000	2100	2100
A17	1300	1500	1900	2000	2050	2050
A18	1600	1700	1800	1900	2000	2000
A19	1000	1300	1800	2000	2000	2000
A20	1100	1600	1700	1800	1800	1800
Altpapier (-Ersatz) als Substrat						
A21	350	400	900	1300	1400	1500

Tabelle 2: Ergebnisse der Versuche.

standteil ist. Eine Auflistung aller Versuche befindet sich in Tabelle 1. Generell stellte sich schnell heraus, dass Temperaturen von 50 °C und ein pH-Wert mit Acetatpuffer von 4,8, die günstigsten Rahmenbedingungen bilden.

In den Versuchen N1-4 wurde eine Reihe mit aufsteigender Konzentration erstellt. Der Hersteller gibt die günstigste Konzentration mit 0,001 g/g Cellulose für die Cellulase (Celluclast) und mit 0,00035 g für die Cellobiase (Novozym 188) an (Versuch N1). Dies liegt sehr weit entfernt von in der Literatur [26] erwähnten Mengen von bis zu 0,25 g/g Cellulose für Celluclast und 0,05 g für Novozym 188. Die Ergebnisse der Versuche werden in Tabelle 2 dargestellt. Die Untersuchungen zeigten nun, dass die Angaben des Herstellers deutlich zu niedrig angesetzt sind (Versuch N1). Andererseits ist die erwähnte Konzentration von 0,25 g Cellulase in Versuch N4 nicht notwendig, um die Cellulose innerhalb von 72 Stunden umzusetzen (Tabelle 2). Die in diesem Fenster liegenden Konzentrationen sind 0,01 g Celluclast/g Cellulose und 0,1 g Celluclast/g Cellulose und werden in den Versuchen N2 und N3 dargestellt.

Für N3 (0,1 g Celluclast/g Cellulose) zeigt sich ein sehr ähnliches Ergebnis wie für N4 mit der doppelten Konzentration. Schon nach etwa 12 Stunden haben beide Werte 2000 mg/100 g erreicht und die Cellulose zu 85% umgesetzt, diese Werte wurden auch durch die Messung der Trockenmasse bestätigt. Der Verlauf wird in Abbildung 7 dargestellt. Aber auch bei einer Enzymkonzentration von 0,01 g/g Cellulose können innerhalb von 72 Stunden passable Werte erzielt werden (Tabelle 2). Nichtsdestotrotz ist mindestens die zehnfache Konzentration der Herstellerangaben notwendig, um die Cellulose in einem überschaubaren Zeitraum zu hydrolysieren.

Bei Accelerase 1000 von Genencor, dem zweiten getesteten Enzym lag die Herstellerangabe mit 0,5 g/g Cellulose erstaunlich hoch. Dies ist darauf zurück zu führen, dass das flüssige Enzym bereits stark verdünnt ist. Versuch A3 beschreibt entsprechend diesen Versuchsablauf. Es wurden bereits nach 6 Stunden Laufzeit 85% der Glucose umgesetzt und nach 12 Stunden war die Reaktion beendet. Jedoch ließen auch Versuch A2 und A4 mit der Hälfte dieser Konzentration (0,25 g/g Cellulose) und einem Fünftel (0,1 g/g Cellulose) eine schnelle Hydrolyse beobachten. Selbst mit nur einem zehntel der Konzentration lassen sich noch gute Ergebnisse erzielen (A1).

Auch hier zeigte sich erneut, dass die Reaktion hauptsächlich in den ersten 12 bis 24 Stunden abläuft. Alle Kurven steigen zu Beginn scharf an und enden in einer Sättigungskurve.

Zum Vergleich zwischen Accelerase und Novozymes Enzymen lässt sich sagen, dass beide Enzyme die gleiche Umsatzgeschwindigkeit er-

bringen. Zu Beginn der Reaktion ist Accelerase etwas schneller, wohingegen bei Versuchen mit Novozym und Celluclast meist ein etwas höherer Endgehalt verzeichnet werden konnte. Der direkte Vergleich gestaltete sich aber aufgrund der unterschiedlichen Konzentrationen als schwierig.

#### Versuche zur Umsetzung von Biomasse

Mit den Erkenntnissen aus zu den Versuchsbedingungen sollte nun auch ligninhaltige Biomasse umgesetzt werden. Wie bereits beschrieben, spielen dabei die Pretreatments eine wichtige Rolle. Die Versuche führte ich hauptsächlich mit Accelerase durch und übertrug die Ergebnisse hinterher auf Versuche mit Novozym 188 und Celluclast.

Die Versuche A6 bis A11 beschäftigen sich mit der Umsetzung von Holzmehlen. Diese enthalten etwa 25 % Lignin. Für die Hydrolyse wurde eine hohe Enzymkonzentration von 0,5 g Enzym/g Cellulose gewählt um hier Fehlerquellen auszuschließen. Die Versuche A6 und A8 vergleichen normales Holzmehl und extraktfreies Holzmehl miteinander. Dabei ließ sich kein Unterschied feststellen, jedoch schnitten beide extrem schlecht ab, denn bei keinem stieg der Glucosegehalt über 300 mg/100 g (Tabelle 2). Daraufhin wurden die vorhin erläuterten Pretreatments getestet. Allerdings konnten weder Erwärmen mit 1-%iger Schwefelsäurelösung, noch die AFEX-Behandlung wirkliche Erfolge verzeichnen und somit ließ sich diese Substratart nur äußerst schlecht umsetzen. Eventuell werden hier wirklich Temperaturen von über 200 °C beim Pretreatment benötigt.

Die folgenden Experimente bezogen sich dann auf Schilf als Substrat. Biomasse von einjährigen Pflanzen ist deutlich weniger verholzt als Holzmehl und lässt sich leichter vorbehandeln. Allerdings zeigte Versuch A12, bei dem im Dampfdrucktopf gekochtes Schilf als Substrat verwendet wurde, dass diese Art von Pretreatment absolut nicht wirksam ist.

Auf der Suche nach einer alternativen Vorbehandlungsmethode habe ich weitere Versuche mit einer Mikrowelle durchgeführt. Darin kann die Probe schnell und energiesparend erhitzt werden. Tatsächlich wird zu Beginn der Hydrolyse Glucose produziert, jedoch nur sehr wenig. Anscheinend ist hier eine Ergänzung durch ein chemisches Pretreatment erforderlich. Im Internet erfahre ich von der Existenz der Verfahren von Zhu [29] und Zhao [27].

Diese geben einen Hinweis auf das „Alkali-Verfahren“, bei dem der Ansatz mit Natronlauge vorbehandelt wird. Nach der Mikrowellenbehandlung und dem Auswaschen sieht die Masse weicher und blasser aus. Zudem hat sich das Wasser braun gefärbt, es scheint sich also Lignin gelöst zu haben.

Versuch	Gemessene Trockenmasse in g					Umsatz
	3h	6 h	12 h	24 h	72 h	
Versuche mit Novozymes Enzymen						
Standardsubstrat reine Cellulose						
Verlauf Trockenmasse						
N3	1,1	1,0	0,7	0,5	0,3	90%
Errechnete Glucosekonz. in mg/100g						
N3	1000	1200	1500	1800	2000	90%
Biomasse als Substrat						
Verlauf Trockenmasse						
N11					0,35	85%
N12					0,3	87%
Errechnete Glucosekonz. In mg/100g						
N11					1900	85%
N12					1950	87%
Versuche mit Genencores Enzymen						
Standardsubstrat reine Cellulose						
Verlauf Trockenmasse						
A2	1,0	0,6	0,4	0,3	0,3	90%
A4	1,0	1,0	0,8	0,6	0,2	95%
Errechnete Glucosekonz. in mg/100g						
A2	1200	1650	1900	2000	2000	90%
A4	1200	1200	1400	1700	2100	95%
Biomasse als Substrat						
Verlauf Trockenmasse						
A19	1,1	0,8	0,55	0,4	0,3	90%
A20	0,9	0,8	0,4	0,3	0,3	90%
A22	1,3	1,1	1,1	0,9	0,4	85%
Errechnete Glucosekonz. in mg/100g						
A19	1000	1400	1700	1900	2000	90%
A20	1300	1400	1900	2000	2000	90%
A22	800	1000	1000	1300	1900	85%

Tabelle 3: Ergebnisse anhand der Trockenmasse.

Die Ergebnisse zu A15, bei dem dieses Substrat verwendet wurde, zeigen extrem verbesserte Umsatzraten, ähnlich derer reiner Cellulose. Zudem lässt sich die Enzymkonzentration bedenkenlos auf 0,25 g/g Cellulose reduzieren, wie Versuch A16 beweist. Die Ergebnisse aus den Schilf-Versuchen lassen sich auch auf Stroh anwenden. Das Acid/Alkali/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Pretreatment (A19) ist eine Kombination aus der Behandlung in der Mikrowelle und anschließender Ruhephase in Wasserstoffperoxidlösung. Die Vorbehandlung wird zuerst für 30 min mit 2 % Schwefelsäure und daraufhin mit 1 % Natronlauge durchgeführt. Zusätzlich wird die Probe noch 24 Stunden in 0,5-%iger Wasserstoffperoxidlösung ruhen gelassen.

Die Trockenmasse hat sich nach dieser Prozedur nun insgesamt um 50 % verringert (Tabelle 3). Es

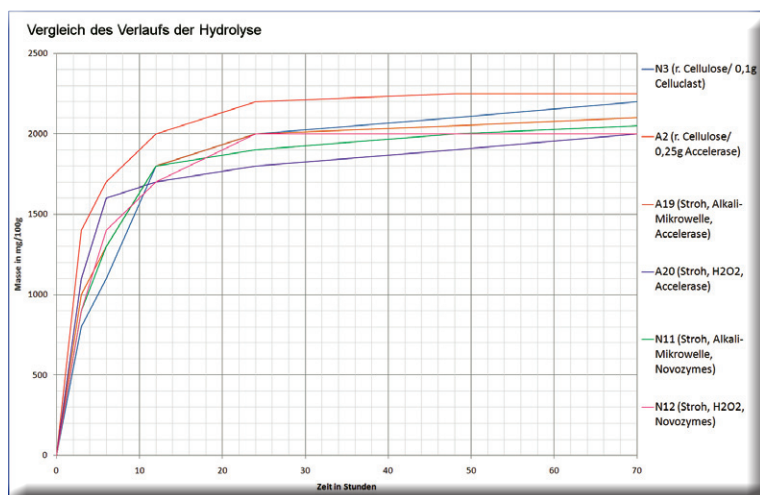


Abbildung 8:  
Vergleich der  
Hydrolyse.

müssen also Stoffe aus dem Substrat in Lösung gegangen sein. Auch die tiefbraune Farbe der Lösung weist darauf hin. Besonders beeindruckt bin ich von der Wirkung des Wasserstoffperoxides, das die Schilfstücke blasser und weicher werden lässt. Der Versuchsverlauf unterstreicht mit schnellem Anstieg der Glucosekonzentration das gute Ergebnis (Abbildung 8). Interessant ist, dass die nach der Hydrolyse im Gefäß verbliebene Masse trocken 0,4 g wiegt. Das ist genau ein Fünftel des eingegebenen Substrates. Da die Biomasse vorher schon um 50 % abgenommen hatte enthält das Schilf also 40 % Cellulose. Ein Wert, der mit der Literatur übereinstimmt [8]. Am energiesparendsten ist es, die Biomasse wie in A20 nur mit Wasserstoffperoxid und Natronlauge (Katalysator) zu behandeln. Die Gewichtsreduktion reicht diesmal zwar nicht an das Acid/Alkali/Mikrowellen-Verfahren heran, aber bei der Hydrolyse entsteht in etwa dieselbe Menge Glucose. Abbildung 8 führt einen Vergleich zwischen den Pretreatments und der Umsetzung reiner Cellulose. Dabei können keine großen Unterschiede beobachtet werden. Verwendet man die Enzyme von Novozymes, kann man ähnliche Beobachtungen machen. Die Versuche N8 und N9 belegen dabei, dass auch damit kein Holzmehl umgesetzt werden kann, denn nach 72 Stunden Laufzeit haben sich nur 400 mg Glucose gebildet. Bei Versuch N10 fand Vitacel Anwendung. Dieses Cellulosemehl enthält 75 % Cellulose und 25 % Hemicellulosen. Das offensichtlich gute Ergebnis deutet darauf hin, dass Hemicellulose die Enzyme nicht behindert und sogar teilweise umgesetzt werden kann.

Die anschließenden Versuche N11 und N12 fanden analog zu den Versuchen A19 und A20 statt. Auch hier wurde in der Mikrowelle und mit Wasserstoffperoxid vorbehandeltes Stroh als Substrat eingesetzt und eine Konzentration von 0,1 g Celluclast/g Cellulose (Novozym 188 im Verhältnis) vorgegeben. Die Glucosekonzentration stieg

erwartungsgemäß auch bei diesen Versuchen schnell an, sodass bereits nach 24 Stunden 90 % des Materials umgesetzt wurden. Vielleicht ließe sich der Prozess im Allgemeinen auf eine kürzere Dauer reduzieren, da in den meisten Fällen nach den ersten 24 Stunden nur noch ein geringer Anstieg zu beobachten ist.

Es lässt sich zusammenfassend sagen, dass die Enzyme auch komplexere Materialien effektiv hydrolysieren können. Jedoch setzt dies eine wirksame Vorbehandlung voraus.

## Herstellung von Milchsäure durch Fermentation

Dieser Teil soll die Versuche des Projektes ergänzen. Hiermit soll sichergestellt werden, dass sich das zuvor erhaltene glucosehaltige Hydrolysat, auch durch Fermentation in Milchsäure umwandeln lässt. Den entscheidenden Bestandteil dieser Versuche bildet demzufolge die Bakterienkultur, die die Glucose durch Gärung umsetzt. Aus dem Grund enthält dieser Teil auch einen wichtigen mikrobiologischen Aspekt, in dem der richtige Bakterienstamm, so wie dessen bevorzugte Reaktionsbedingungen ermittelt werden sollten. Zudem versuchte ich, mit mir zur Verfügung stehenden Mitteln eine Fermentation durchzuführen.

Im Verlauf dieses Projektabschnittes nahm ich auf Grund einiger Fragen Kontakt mit Herrn Dr. J. Venus vom Institut für Agrartechnik in Potsdam (ATB) auf. Während dieser Korrespondenz bot mir Herr Dr. Venus an, die Fermenter im ATB nutzen zu können. Dies gab mir die einmalige Chance, meine Experimente in einem professionellen Labor durchzuführen. Zur erfolgreichen Durchführung der Fermentation sind konstante äußere Faktoren wie pH-Wert und Temperatur von entscheidender Wichtigkeit. An meinem Arbeitsplatz ist es jedoch schwer, diese Bedingungen zur Fermentation zu gewährleisten.

Während der Praktikumswoche am ATB standen mir so optimale Möglichkeiten zu Versuchen mit meinem Hydrolysat und meinem Bakterienstamm zur Verfügung. Unter freundlicher Hilfestellung von Herrn Schneider führte ich eine Fermentation mit meinem Hydrolysat und meinem Bakterienstamm sowie mit einem Stamm und einem Hydrolysat vom ATB durch (Tabelle 4).

## Grundlagen

### Milchsäuregewinnung

Die häufigste Produktionsweise der Milchsäure ist die Fermentation. Dabei macht man es sich zu Nutze, dass Milchsäurebakterien, als Abfallprodukt ihres Stoffwechselprozesses, der Gärung,

Name	Hydrolysat	Bakterienstamm
F <sub>ATB</sub> 6	Strohhydrolysat	Lb. delbrueckii
F <sub>ATB</sub> 7	Strohhydrolysat	Lb. paracasei
F <sub>ATB</sub> 8	Roggenschrothhydrolysat	Lb. delbrueckii

Tabelle 4: Fermentationen im ATB

Milchsäure bilden. Bei der Gärung unterscheidet man zwischen homofermentativer Milchsäuregärung, als deren Endprodukt nur Milchsäure gebildet wird, und heterofermentativer Gärung, bei der auch Nebenprodukte wie CO<sub>2</sub>, Ethanol und Essigsäure entstehen. Insgesamt entsteht beim Prozess der Gärung aber verhältnismäßig wenig Energie. Um fehlende Energie auszugleichen wird aber auf der anderen Seite viel Lactat produziert, so dass der Fermentationsprozess mit Milchsäure als Produkt sehr effektiv ist.

Es gibt viele Arten von Bakterien, die Energie auf diese Weise gewinnen. Als Beispiele sind verschiedene Streptokokken, beziehungsweise Lactokokken und Lactobacillusarten zu nennen. Ich verwendete den Stamm *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*.

#### Versuche:

##### Kultivierung der Milchsäurebakterien

Der Bakterienstamm und dessen Eigenschaften haben elementaren Einfluss auf das Ergebnis der Fermentation. So benötigte ich für meine Versuche einen relativ säuretoleranten Stamm, der die Glucose in kurzer Zeit umzusetzen vermag.

Während der Versuche zur Isolation eines geeigneten Bakterienstammes stieß ich bei der Recherche auf *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*, ein etwa 20 µm großes, stäbchenförmiges Bakterium. Dieser Stamm zeichnet sich durch eine hohe pH-Toleranz (damit auch höhere Säurekonzentrationen) und einen Temperaturspielraum von 30 bis 50 °C aus. Dazu kommt das Vorkommen in einfachem Naturjoghurt. Dementsprechend beschloss ich diese Bakterien aus Joghurtferment beziehungsweise klassischem Naturjoghurt zu isolieren.

Lactobacillen werden in MRS Medium kultiviert. Also bebrütete ich die Bakterienkultur bei 40 °C. Ich arbeitete der Einfachheit halber mit Flüssigkulturen, das heißt, die Bakterienkulturen werden in, mit Medium gefüllten, Kulturröhrchen gezüchtet. Zur Aufbewahrung kann man die Bakterien mit Glycerin versetzt einfrieren oder Schrägagarröhrchen anlegen. Beim Umgang mit den Bakterienkulturen sollte auf sterile Arbeitsgeräte geachtet werden, um die Kulturen

nicht zu verunreinigen und Kontamination durch gesundheitsschädliche Bakterien zu verhindern. Für das Animpfen eines Kulturröhrchens werden Impfösen verwendet. Diese übertragen wenig von der Bakteriensuspension in ein neues Kulturröhrchen. Eine Möglichkeit zur Überprüfung der Reinheit oder Untersuchung der Kultur bieten Agarplatten, auf denen die Kultur ausgestrichen wird, welche daraufhin bebrütet werden, bis man einzelne weiße Bakterienkolonien darauf entdecken kann. Die meisten Bakterienstämme bilden spezifisch aussehende Kolonien aus. Ich entnahm eine geringe Menge Joghurt und gab sie in ein mit MRS-Medium gefülltes Kulturröhrchen, worin ich die Bakterien über Nacht bebrütet habe. MRS-Medium ist selektiv für Lactobacillen, das heißt andere Bakterienarten sind normalerweise nicht in der Lage darin zu überleben. Ebenfalls selektiv wirkt die Temperaturtoleranz bis 50 °C, die nur sehr wenige Milchsäurebakterien aufweisen. So geht man relativ sicher, dass ausschließlich *Lb. delbrueckii* Bakterien kultiviert werden.

##### Die Fermentation

Normalerweise werden Fermentationen in Fermentern durchgeführt, welche über eine genaue Temperatur und pH-Kontrolle verfügen. So ist sichergestellt, dass die Temperatur gleichbleibend ist und die entstandene Milchsäure direkt wieder neutralisiert wird, damit sie die Bakterien nicht hemmen kann. Diese Art von Reaktionsbedingungen konnte ich allerdings nur am ATB nutzen. In den Versuchen zu Hause musste ich auf jegliche Regulation verzichten und verwendete eine Laborflasche im Brutschrank als Fermenter. Auch darin versuchte ich die Temperatur auf 40 °C zu halten. Damit der pH-Wert nicht allzu sehr sinkt wurden in regelmäßigen Abständen Messungen durchgeführt und der pH-Wert, falls notwendig, wieder auf 5,5 mit Kalilauge korrigiert.

Damit eine Fermentation erfolgreich verläuft ist jedoch nicht nur das zuvor hergestellte Hydrolysat, also eine Lösung mit einem vergärbaren Zucker nötig, sondern ebenfalls Eiweiß und Nährsalze, um das Wachstum der Bakterien zu beschleunigen [22]. So entwickelt man also eine Art Nährmedium, bei dem der Zucker durch das eigene Hydrolysat ersetzt und zu Milchsäure umgesetzt wird.

Das Fermentationsmedium enthält:

Kohlenhydrat: Glucoselösung 20 g/L

Eiweißquelle: Hefeextrakt 15 g/L

Mineralsalz: Magnesiumsulfat 2 g/L; Ammoniumchlorid 2 g/L

Alle Stoffe wurden als Medium gemischt und autoklaviert. Nach dem Abkühlen und Einstellen des pH-Wertes kann die Bakterienkultur (5 ml) hinzugegeben werden.

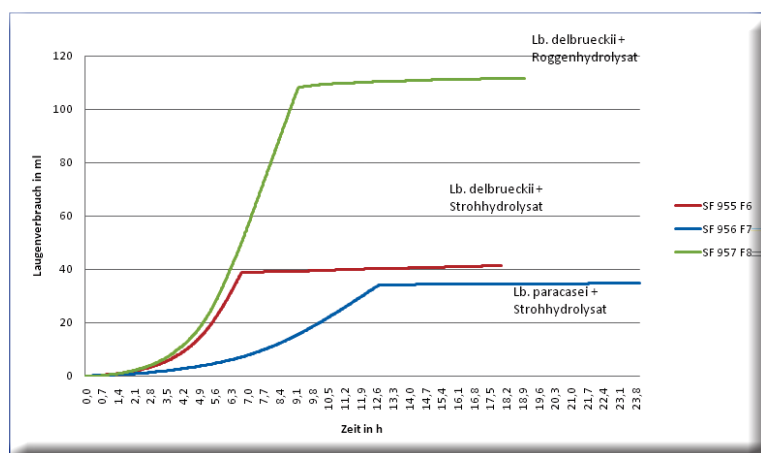


Abbildung 9: Verlauf des Laugenverbrauchs (Versuche ATB)

Um die Zusammensetzung des Mediums zu prüfen führte ich einige Versuche im 100 ml Maßstab durch (Tabelle 5):

Im Anschluss an diese Versuchsreihe führte ich Versuche in einem professionellen Labor durch. Diese liefen selbstverständlich unter genaueren und besser kontrollierten Bedingungen ab. Die Fermentation konnte ich in einem 1Liter Fermenter durchführen. Temperatur und pH-Wert wurden von einer Kontrolleinheit gesteuert und konstant auf 40 °C beziehungsweise pH-Wert 6,00 gehalten. Als Medium wurde das von mir hergestellte Strohhydrolysat verwendet. Die genaue Zusammensetzung lautete dann:  
 Kohlenhydrat: Strohhydrolysat 850 ml  
 Eiweißquelle: Hefeextrakt 15 g  
 Mineralsalze: Magnesiumsulfat 0,1 g, Kaliumhydrogenphosphat 2 g, Mangansulfat 0,05 g, in 150 ml vollentsalztem Wasser

Dieses Medium wurde in den Fermenter gefüllt und bei 121 °C autoklaviert. Während der Autoklavierung wurden Hydrolysat und Nährmedium getrennt gehalten, damit keine Reaktion unter Hitze eintritt. Im Fermenter sind eine Temperatur- und eine pH-Sonde angebracht. Nach dem Einstellen von Temperatur und pH-Wert kann der Fermenter mit der Vorkultur angeimpft werden. Diese besteht aus 80 ml MRS Medium in dem über 19 Stunden bei 40 °C die Bakterienkultur bebrütet wurde. Im Abstand von 2 Stunden wurden nun Proben entnommen, von denen zum

Tabelle 5: Erste Versuche im 100 ml-Maßstab

Name	Kohlenhydrat	Eiweißquelle	Mineralsalz	Zusatzstoffe
F 1	Glucose 2g/L	Sojamehl	MgSO <sub>4</sub>	-
F 2	Glucose 2g/L	Hefeextrakt	-	-
F 3	Glucose 2g/L	Hefeextrakt	MgSO <sub>4</sub> , NH <sub>4</sub> Cl	-
F 4	Glucose 2g/L	Hefeextrakt	MgSO <sub>4</sub> , NH <sub>4</sub> Cl	Dopamin
F 5	Glucose 2g/L	Milch	-	-

einen eine Verdünnungsreihe zum Anlegen von Agarplatten zur Bestimmung der Lebendkeimzahl erstellt wurde. Ebenso kann man unter dem Mikroskop mit Hilfe einer Zählkammer die Gesamtkeimzahl bestimmen. Der Rest der Probe wird für weitere analytische Maßnahmen eingefroren.

So wird die Probe später aufgearbeitet: Von je 5 ml wird in der Zentrifuge die enthaltene Biomasse von der Flüssigkeit getrennt. Die Flüssigkeit wird dekantiert und 5 ml davon verdünnt und in Vials abgefüllt um eine HPLC Messung durchzuführen. In diesem chromatographischen Verfahren wird die genaue Zusammensetzung der Inhaltsstoffe bestimmt. Die abgesetzte Biomasse wird mit Formaldehydlösung gewaschen und für 24 Stunden bei 105 °C in zuvor gewogenen Tiegeln getrocknet. Danach werden die Proben ausgewogen. Das zusätzliche Gewicht in den Tiegel stellt die enthaltene Biomasse dar. So kann man die Zunahme der Biomasse durch Wachstum der Bakterien im Verlauf des Versuches dokumentieren.

#### Auswertung zur Milchsäurefermentation

Nach vorläufigem Abschluss meiner Versuchsreihe ist es gelungen, die Zuckerlösung durch Fermentation in Milchsäure umzuwandeln.

Die ersten Versuche die ich zu Hause durchführte waren darauf abgestimmt, das optimale Medium für eine schnelle Fermentation herauszufinden. Allerdings stellte sich ebenfalls zu Beginn der Versuchsreihe heraus, dass die Fermentation mit solch einfachen Mitteln eine schwierige Aufgabe darstellt und nicht ohne Weiteres durchführbar ist.

In Versuch F1 ließen sich mit Sojamehl als Eiweißquelle keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielen. Dies lag wahrscheinlich daran, dass sich das Sojamehl am Boden absetzte und in der Lösung nicht mehr zur Verfügung stand. Aus diesem Grund stieg ich auf Hefeextrakt um, das ich selbst herstellte. Der Versuch F2, bei dem nur Hefeextrakt zugegeben wurde, verlief deutlich besser. Etwa 24 Stunden nach dem Animpfen sank der pH-Wert unter 4 und die Reaktion verlangsamte sich stark. Dementsprechend suchte ich nach einer Möglichkeit, die entstandene Milchsäure zu neutralisieren und so den pH-Wert wieder anzuheben.

Bei einer erneuten Durchführung des Versuches setzte ich zudem von den Bakterien benötigte Mineralsalze zu [22]. Ich wählte Magnesiumsulfat und Ammoniumchlorid als stickstoffhaltiges Salz. Diesmal entwickelte sich der Versuch deutlich schneller. Es musste in so großen Mengen Kalilauge zugegeben werden, dass sich das Volumen stark vergrößerte. Im Endeffekt wurden 64 ml verbraucht.

Für das Wachstum benötigen die Bakterien dringend Stickstoff. Diesen entnehmen sie zum



einen dem Hefeextrakt und zum anderen dem Ammoniumchlorid. Zusätzlich überlegte ich, dass die Zugabe von Aminosäuren, in meinem Fall Dopamin, sich positiv auswirken könnte. Versuch F4 mit Aminosäure zeigte aber keine Verbesserung gegenüber F3, dem nur das Basismedium zugegeben wurde, bringt somit keine Vorteile.

Ein weiterer Versuch sollte ohne komplexes Nährmedium auskommen. Da Milchsäurebakterien normalerweise in Milch wachsen, dachte ich, dass eventuell eine verdünnte, 10-%ige Milch-Wasser Mischung als Medium dienen könnte. Nach wenigen Stunden verklumpte die Milch jedoch und es bildeten sich weiße Flocken, die zu Boden sanken. Durch die Säure wird der Emulgator der Milch gestört und Fett und Eiweiße werden ausgefällt. Allerdings ließ sich nicht feststellen, ob die Milchsäurebakterien auch Glucose umgesetzt hatten, denn wahrscheinlich waren die zugesetzten Nährstoffe schon nach kurzer Zeit aufgebraucht.

Im Allgemeinen lässt sich demzufolge ableiten, dass man das Medium am besten aus einem Kohlenhydrat, also Glucose, einer Eiweißquelle, dem Hefeextrakt und Mineralsalzen wie Magnesiumsulfat und Ammoniumchlorid zusammensetzt. Des Weiteren muss die entstandene Milchsäure regelmäßig neutralisiert werden, um einen ungestörten Ablauf der Fermentation zu gewährleisten. Hier kann man, je nach späterer Anwendung, eine beliebige Lauge nehmen. Die Konzentration der Lauge sollte relativ hoch sein, um das Volumen der Fermentationslösung nicht zu stark anzuheben.

Abschließend kann man aber sagen, dass sich auch in diesem einfachen Umfeld die komplette Glucose durch Milchsäurebakterien umsetzen ließ. Die genauen Daten der Reaktion waren dabei leider nicht feststellbar.

Anders sieht es bei den im ATB durchgeführten Versuchen aus. Hier konnte neben dem exakten Laugenverbrauch (Abbildung 9) natürlich auch die Entwicklung der Glucose- und Milchsäurekonzentration beobachtet werden. Zusätzlich wurden aus regelmäßigen Proben die Gesamtkeimzahl im Fermenter, also die Anzahl aller Bakterienzellen, und die Lebendkeimzahl bestimmt. Die Beobachtung dieser Parameter gibt Aufschluss über die Entwicklung der Bakterien im spezifischen Medium. Außerdem wurde aus den Proben die Biotrockenmasse bestimmt. An deren Verlauf lässt sich ebenfalls die Entwicklung und das Wachstum der Mikroorganismen beobachten.

In Versuch F6 konnte ich mein Hydrolysat aus Stroh zusammen mit meinem Bakterienstamm (*Lb. delbrueckii*) in dieser Umgebung testen. Dabei war zu beobachten, dass der Laugenverbrauch schon innerhalb der ersten drei Stunden zu steigen begann. Sieben Stunden nach Start der Reaktion hatte sich im Laugenverbrauch eine exponentielle Kurve abgezeichnet.

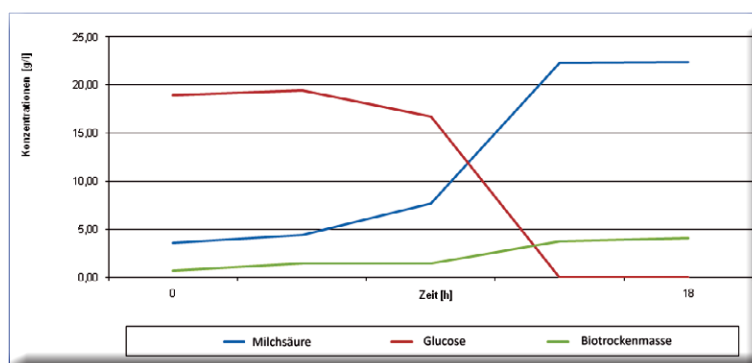


Abbildung 10:  
Verläufe bei  
Versuch F6

Das wiederum bedeutet, dass eine relativ große Milchsäuremenge entstanden sein muss. In den darauffolgenden Stunden war jedoch kein weiterer Anstieg des Laugenverbrauchs zu beobachten. Daraus lässt sich folgern, dass nach etwa 7 Stunden die gesamte im Medium enthaltene Glucose (etwa 22 g/L) aufgebraucht war. Als Resultat kann man also festhalten, dass der Stamm *Lactobacillus delbrueckii* sehr gut mit meinem Strohhydrolysat harmoniert und zufriedenstellende Ergebnisse und Umsatzraten erreicht. Für das Hydrolysat heißt es, dass die durch enzymatische Hydrolyse gewonnene Glucoselösung von den Mikroorganismen ohne weitere Probleme verstoffwechselbar ist und keine gravierenden Hemm- oder Giftstoffe enthält. Genauen Aufschluss über die Konzentrationen liefern die HPLC Analysen (Abbildung 10).

In meiner Nährlösung befanden sich etwa 30 g/L Glucose und laut HPLC im verdünnten Nährmedium 23,4 g/L. In der Ausgangslösung sind sogar schon geringe Mengen Milchsäure enthalten, die eventuell durch Kontamination unfreiwillig entstanden ist. Der Verlauf der Milchsäure steigt, wie in Abbildung 10 dargestellt, bald stark an. Dementsprechend sinkt natürlich die Glucosekonzentration. Ebenfalls gut zu beobachten ist der Anstieg der Biomasse im Fermenter (grüne Linie).

In Versuch F7 sollte mein Hydrolysat mit einem anderen *Lactobacillus*stamm getestet werden. Dazu wurde der Fermenter mit dem gleichen Medium, diesmal jedoch mit *Lactobacillus paracasei* angeimpft. Der Anstieg der zur Neutralisation verbrauchten Laugenmenge fiel diesmal deutlich schwächer aus und die Kurve hatte nur eine geringe Steigung. So kam es, dass die Kurve ihren Sättigungspunkt erst bei 13 Stunden erreichte. Ebenso wurde insgesamt weniger Lauge verbraucht. Im Endeffekt wurde aber auch hier die Glucose vollständig umgesetzt.

Um meinen Bakterienstamm weiter zu untersuchen wurde noch eine Fermentation mit meinem Stamm und dem im ATB verwendeten Roggenschrothydrolysat getestet. Jener Versuch F8 zeigt zu Beginn der Reaktion eine sehr ähnliche Lau-

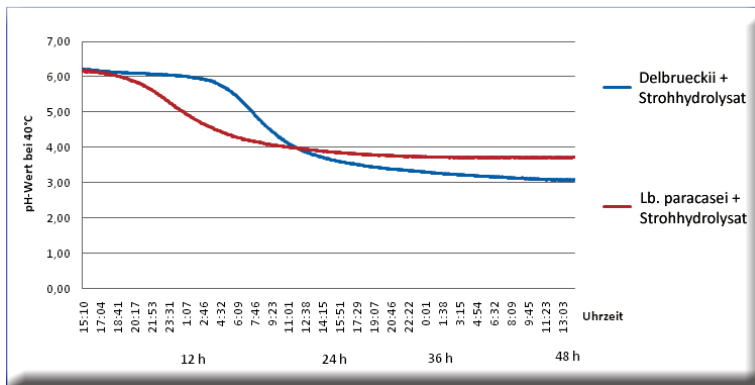


Abbildung 11:  
Verlauf der pH-  
Absenkung bei  
beiden Stämmen

genkurve wie Versuch F6. Es lässt sich also sagen, dass der Anstieg der zur Neutralisation benötigten Lauge und damit der Anstieg der Milchsäurekonzentration für ein Bakterium spezifisch sind.

Im Unterschied zum Strohhydrolysat enthielt das nun verwendete Nährmedium 50 g/L Glucose, weswegen die Kurve ihren Sättigungspunkt erst nach etwa 108 ml Lauge erreicht (Abbildung 9). Nichtsdestotrotz war die Reaktion bereits nach 8 Stunden abgeschlossen. Der Bakterienstamm ist also in der Lage das Hydrolysat sehr schnell umzusetzen. Es wäre also für das Strohhydrolysat deutlich vorteilhafter, wenn in der enzymatischen Reaktion eine höhere Glucosekonzentration erreicht werden könnte, denn bei diesen Konzentrationen kann im Vergleich zur Zeit erheblich mehr Milchsäure produziert werden.

Ein weiterer Versuch zur Charakterisierung der Bakterienstämme, bestand in der Beobachtung des Verlaufs der durch die Milchsäure bedingten pH-Senkung, ohne Neutralisation (Abbildung 11). Auch dieser Versuch wurde mit Strohhydrolysat durchgeführt. *Lb. paracasei* zeigte hierbei einen typischen Kurvenverlauf. Vom Startwert bei 6,2 sank der pH-Wert zunächst langsam, dann sehr schnell, bevor er sich wieder verlangsamte und schließlich bei 3,7 zum Stillstand kam. Dies ist durch die natürliche Hemmung in Folge des niedrigen pH-Wertes zu erklären. Würden die Milchsäurebakterien weiterproduzieren, könnten sie selbst nicht überleben.

Der Kolben mit *Lb. delbrueckii* startete ebenfalls bei 6,2, sank zunächst jedoch nur sehr langsam, bis nach etwa 13 Stunden die Kurve plötzlich stark abfiel und die des pH-Wertes von *Lb. paracasei* durchkreuzte. Die Milchsäureproduktion kam erst deutlich später zum Stillstand bis nach 48 Stunden bei 3,1 auch hier eine Hemmung auftrat. Solch ein niedriger pH-Wert ist allerdings ungewöhnlich für ein Milchsäurebakterium, für meine Versuche aber äußerst vorteilhaft, da ich über keine automatische pH-Regulierung verfüge und die Bakterien so einen gewissen Spielraum haben.

## Zusammenfassung

### Fehlerquellen

Natürlich taten sich während des Projektes einige Fehlerquellen auf. So sind beispielsweise die Methoden zur Messung des Glucosegehaltes unzureichend. Besserung würden da sicher genauere Bestimmungsmethoden durch Chromatographie bringen. Allerdings lassen sich anhand der Ergebnisse sicherlich wichtige Schlüsse ziehen, was den Vergleich der Versuche untereinander betrifft. Zumal die Ergebnisse der Glucose-Teststicks und der Trockenmassebestimmung weitgehend zueinander passen und plausibel sind. Desweiteren könnte die Genauigkeit hierbei sicherlich durch die Benutzung einer besseren Waage gesteigert werden.

Nicht zuletzt lassen sich diese Ergebnisse auch nicht problemlos auf den großen Maßstab übertragen. Beispielsweise ist die Erwärmung großer Mengen Biomasse in der Mikrowelle unmöglich. Durch bessere Ausstattung ließen sich diese Mängel aber aus dem Weg räumen.

### Fazit

Intention des Projektes war aufzuzeigen, dass es durchaus möglich ist, auf Stärke oder Öle als Rohstoffe für die Biokunststoffproduktion zu verzichten. Stattdessen sollte Cellulose, welche aus Biomasse gewonnen wird, zur Grundlage für die Herstellung des Biokunststoffes PLA nutzbar gemacht werden.

Die Versuche begannen mit der Umsetzung von reiner Cellulose. Dabei zeigte sich, dass sich diese von beiden Enzymen sehr schnell und effizient umsetzen lies. Meist geschah dies auch schon bei geringer Konzentration innerhalb der ersten 24 Stunden.

Die Umsetzung von Lignocellulose gestaltete sich zu Beginn jedoch als schwierig. Aus diesem Grund wurden verschiedene Aufschlussverfahren zur Entfernung des enthaltenen Lignins erprobt. Dabei erwiesen sich zwei Verfahren als außerordentlich wirksam und effizient. Zum einen handelt es sich hierbei um das Alkali-Mikrowellen-Verfahren, bei dem die Erhitzung der Biomasse in der Mikrowelle stattfand. Zum anderen ist hier das Alkali-Wasserstoffperoxid Verfahren zu nennen, bei dem die Fasern bei 50 °C für 36 Stunden Wasserstoffperoxid und Natronlauge ausgesetzt wurden. Durch diese Vorbehandlung konnte die Biomasse so präpariert werden, dass eine schnelle Umsetzung der Cellulose möglich war. Bei beiden Enzymen, Novozymes Enzymen und Accelerase konnten hier, mit reiner Cellulose vergleichbare, Umsatzraten verzeichnet werden. Für Celluclast 1.5L erwiesen sich 0,0 1g/g Cellulose und für Novozym 188 0,0025 g/g Cellulose als günstig. Bei Accelerase werden etwa 0,1

g/g Cellulose benötigt. Der Kilopreis von Celluclast liegt bei 6 Euro/kg und der von Novozym 188 bei 32 Euro/kg. Mit den oben genannten Konzentrationen würden so Kosten von 140 bis 150 Euro/t plus Rohstoff- und Energiekosten entstehen. Betrachtet man aber den Kilopreis von 5 Euro für PLA, sind 14 bis 15 Cent nur ein sehr geringer Teil, zumal Rohstoffkosten eingespart werden.

In Folge wurde bewiesen, dass sich die erhaltene Glucoselösung gut mithilfe von Milchsäurebakterien fermentieren ließ. Dieses Verfahren wird allerdings seit langem industriell durchgeführt und hat sich seitdem etabliert. Deswegen ist es bereits recht effektiv und kostengünstig. Demnach lag es nicht in meiner Absicht hier nach einem günstigeren Ablauf zu forschen, sondern in Zusammenarbeit mit dem Institut für Agrartechnik Potsdam zu verifizieren, dass diese Verfahren auch auf mein Hydrolysat anwendbar sind. Zusammenfassend lassen sich drei Ergebnisse der Versuchsreihen formulieren:

- 1) Das gewonnene Hydrolysat ist durch Fermentation restlos in Milchsäure überführbar.
- 2) Der von mir isolierte Bakterienstamm, *Lactobacillus delbrueckii* zeichnet sich durch eine hohe Säuretoleranz aus und eignet sich gut für die Fermentation.
- 3) Es muss noch daran gearbeitet werden, die Glucosekonzentration des Hydrolysates zu erhöhen, da somit auch höhere Milchsäurekonzentrationen erreicht werden und der Prozess als Ganzes effektiver wird.

Abschließend lässt sich feststellen, dass dieser Weg der Biokunststoffherstellung offensichtlich im Bereich des Machbaren liegt und sich wahrscheinlich gegenüber der Stärke als Rohstoff durchsetzen wird.

CLB

## Literatur

### Bücher:

- [1] Bast, Eckhard (2001): Mikrobiologische Methoden. Bonn: Elsevier.
- [2] Breitmaier, Eberhard; Jung, Günter (2001): Organische Chemie. Grundlagen, Stoffklassen, Reaktionen, Konzepte, Molekülstruktur. 4. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- [3] Bülle, Jan; Hüttermann, Aloys (2000): Das Basiswissen der organischen Chemie. 1. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- [4] Karlson, Peter (1980): Kurzes Lehrbuch der Biochemie. Für Mediziner und Naturwissenschaftler. 11. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- [5] Mortimer, Charles E.; Müller, Ulrich (2003): Chemie. Das Basiswissen der Chemie. 8. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- [6] Renneberg, Reinhard (2007): Biotechnologie für Einsteiger. 2. Auflage. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

### Websites:

- [7] Genencor (2009): „Products & Services“. URL: [http://www.genencor.com/cms/connect/genencor/products\\_and\\_services/](http://www.genencor.com/cms/connect/genencor/products_and_services/) [Stand: 9.05.09].

- [8] Gruber, Erich (2008): „Skripten und Vorlesungsunterlagen. Grundlagen der Zellstofftechnologie“. URL: [http://gruberscript.net/Inhalt\\_Zellstoff.html](http://gruberscript.net/Inhalt_Zellstoff.html) [Stand: 9.05.09].
- [9] Novozymes (2009): „Products and Solutions“. URL: <http://www.novozymes.com/en/MainStructure/SectionMainProductAndSolutions> [Stand: 9.05.09].
- [10] University of Maine, Department of Chemistry (2006): „Cellulases“. URL: <http://images.google.de/imgres?imgurl=http://chemistry.umeche.maine.edu/CHY431/Wood/1a3h-1.jpg&imgrefurl=http://chemistry.umeche.maine.edu/CHY431/Wood12.html> [Stand: 9.05.09].
- [11] Wikimedia Foundation Inc., Wikipedia DE (2009): „Asparaginsäure“. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Asparagins%C3%A4ure> [Stand: 9.05.09].
- [12] Wikimedia Foundation Inc., Wikipedia DE (2009): „Glutaminsäure“. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Glutamins%C3%A4ure> [Stand: 9.05.09].
- [13] Wikimedia Foundation Inc., Wikipedia US (2009): „Cellulase“. URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Cellulase> [Stand: 9.05.09].
- [14] Wikimedia Foundation Inc., Wikipedia US (2009): „Cellulose“. URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Cellulose> [Stand: 9.05.09].
- [15] Wikimedia Foundation Inc., Wikipedia US (2009): „Glucose“. URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Glucose> [Stand: 9.05.09].
- [16] Wikipedia Foundation Inc., Wikipedia Deutschland (2009): „Enzyme“. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Enzym#Aufbau> [Stand: 9.05.09].

### Andere Veröffentlichungen & PDF:

- [17] Bechthold, Inna (2003): Technologisch relevante Aspekte der Ringöffnungspolymerisation von L,L-Dilactid. Berlin: TU Berlin. URL: [http://edocs.tu-berlin.de/diss/2003/bechthold\\_inna.pdf](http://edocs.tu-berlin.de/diss/2003/bechthold_inna.pdf) [Stand: 9.05.09].
- [18] Genencor (2007): „Accelerase 1000. Technical Bulletin 1 Saccharification“. Rochester, NY: Genencor, Danisco US Inc. URL: <http://www.genencor.com/cms/resources/file/eb52cb493f3076b/ACCELLERASE%201000%20Tech%20Bull%20%231%20%28for%20emailing%29.pdf> [Stand: 9.05.09].
- [19] Genencor (2007): „Accelerase 1000. Technical Bulletin 2 Simultaneous Saccharification and Fermentation“. Rochester, NY: Genencor, Danisco US Inc. URL: <http://www.genencor.com/cms/resources/file/ebf3a90d87be071/ACCELLERASE%201000%20Tech%20Bull%202.pdf> [Stand: 9.05.09].
- [20] Genencor (2007): „Ahead of the Curve“. Rochester, NY: Genencor, Danisco US Inc.
- [21] Grunert, Nathalie; Villacreses Daniela (2008): Fermentation von Milchsäure. URL: [www.chem-eng.fhmannheim.de/ibv/lehre/kunz/btv1/dateien/.../08-10-31\\_BVT-1%20Handout%20Milchsaeure%20Grunert.doc](http://www.chem-eng.fhmannheim.de/ibv/lehre/kunz/btv1/dateien/.../08-10-31_BVT-1%20Handout%20Milchsaeure%20Grunert.doc) [Stand: 9.05.09].
- [22] Kosaki, Michio; Setagya-ku (1995): Gärung zur Gewinnung von D-Milchsäure. DE3650395T2 (29.02.1996 Tokyo).
- [23] Novozymes (2008): Sicherheitsdatenblatt Celluclast 1.5L. Sicherheitsdatenblatt Novozym 188. Bagsvaert: Novozymes.
- [24] Schröder, Esther (2007): Papier. Organischer Experimentalvortrag. URL: [http://www.chids.de/dachs/expvortr/743Papier\\_Schroeder.pdf](http://www.chids.de/dachs/expvortr/743Papier_Schroeder.pdf) [Stand: 18.05.09]
- [25] Sun, Ye (2002): „Enzymatic Hydrolysis of Rye Straw and Bermudagrass for Ethanol Production“. URL: [www.lib.ncsu.edu/thesis/available/etd-08152002-220933/unrestricted/etd.pdf](http://www.lib.ncsu.edu/thesis/available/etd-08152002-220933/unrestricted/etd.pdf) [Stand: 20.02.09].
- [26] Wyman, Charles E.; Yang, Bin (2005): BSA Treatment to Enhance Enzymatic Hydrolysis of Cellulose. Hanover, NH: Wiley Inter Science.
- [27] Zhao, Yulin; Wang, Ying; Zhu, J.Y.; Ragauskas, Art; Deng, Yulin (2007): Enhanced Enzymatic Hydrolysis of spruce by Alkaline Pretreatment at Low Temperature. Biotechnology and Bioengineering. URL: [http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2008/fpl\\_2008\\_zhao001.pdf](http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2008/fpl_2008_zhao001.pdf) [Stand: 9.05.09].
- [28] Zhu, Shengdong (2005): Comparison of Three Microwave/Chemical Pretreatment Processes for Enzymatic Hydrolysis of Rice Straw. Biosystems Engineering 192. Seiten 1559-1566. URL: <http://beta.irri.org/news/bulletin/2007.34/PDFs/CDPDF2006.6.Zhu,SD.pdf> [Stand: 9.05.09].
- [29] Zhu, Shengdong; Wu, Yuaxin; Yu, Ziniu; Zhang, Xuan; Wang, Cunwen; Yu, Faquan; Jin, Shiwei (2005): Production of Ethanol from microwave-assisted alkali pretreated wheat straw. In: Process Biochemistry 41.

# REACH- und GHS/ CLP-Verordnung

Zwei europäische Mammut-Regelwerke halten die Chemische Industrie in Atem

Wolfgang Hasenpusch, Universität Siegen

Zwei europäische Regelwerke treffen nach langer Vorbereitung und vielen Diskussionen nahezu zeitgleich auf die Chemische Industrie in den 26 EU-Staaten. Dabei haben beide EU-Verordnungen sehr hehre Ziele im Visier: Die REACH-Verordnung will den Wissensstand über die vielfachen Gefährdungsmöglichkeiten von allen Handels-Chemikalien in definierter und brachialer Weise verbessern. Dieses umfangreiche Wissen über Stoff- und Gemisch-Parameter fließt auch in den europäischen Ansatz zur weltweiten Harmonisierung ihrer Gefährdungs-Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung mit ein. Lange Übergangsfristen sollen den Unternehmen der Chemischen Industrie sowie den Importeuren von Chemikalien die Umsetzung dieser EU-Verordnungen erleichtern.

## REACH – Registrierung, Bewertung und Zulassung von Chemikalien

Als die 529 Abgeordneten mit 98 Gegenstimmen und 24 Enthaltungen das lange diskutierte Kompromiss-Papier der REACH-Verordnung (im Original: **R**egistration, **E**valuation, **A**utorisation of **C**hemicals) im Dezember 2006 verabschiedeten, lag eine unendliche Anzahl von Sitzungen, Protest-Kundgebungen und Drohungen hinter ihnen.

Damit war einer der komplexesten Texte der EU-Geschichte verfasst worden: sie vereint zudem 40 vorangehende Rechtstexte zum Chemikalienrecht in einer einzigen Verordnung.

Schon der Originaltitel der Verordnung verweist auf die Inhaltsschwere der Verordnung. Er lautet in der offiziellen deutschen Übersetzung: „Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Agentur für chemische Stoffe, zur Änderung der Richt-

### Der Autor

Prof. Dr. Wolfgang Hasenpusch, beschäftigt in der Chemischen Industrie als Referent für Sicherheit und Umwelt, hält darüber hinaus eine Honorar-Professur an der Universität Siegen in Industrieller Anorganischer Chemie mit den Schwerpunkten Innovationsmanagement, Recycling und Bionik. Das weite Spektrum an bearbeiteten Themen resultiert aus der vielfachen Dozenten-Tätigkeit am Deutschen Institut für Betriebswirtschaft, den Schulen der Berufsgenossenschaft Chemie sowie Universitäten.

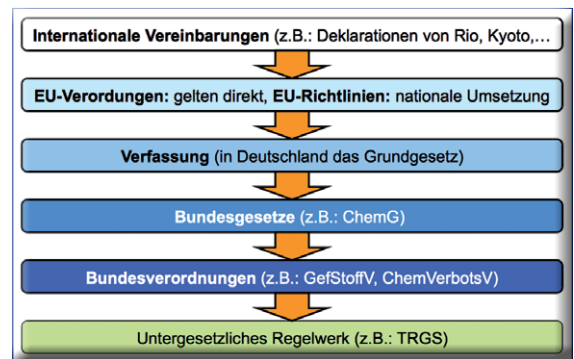


Abbildung 1: Hierarchische Ebenen der rechtlichen Vorschriften.

linie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinie 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission“.

Es glich einem Drahtseilakt, die Balance zwischen einem hohen Gesundheits- und Umweltschutz auf der einen Seite und die Angemessenheit für die chemische Industrie auf der anderen Seite ohne Wettbewerbsverzerrungen zu gewährleisten, einem Balance-Akt auch zwischen herber Kritik über eine „beschämende Verwässerung sozioökonomischer Schutzziele“ und einem konzertierten Lobbydruck der europäischen Chemieindustrie.

Offizielles Ziel dieser Verordnung ist es, ein hohes Schutzniveau für die menschliche Gesundheit und für die Umwelt sicherzustellen sowie den freien Verkehr von Stoffen, Stoffgemischen und Stoffen in Erzeugnissen zu gewährleisten.

In bestimmten Fällen soll sichergestellt werden, dass besonders besorgniserregende Stoffe durch weniger gefährliche Stoffe ersetzt werden oder mit verbesserten Technologien gehandhabt werden.

Abbildung 2: Internet-Auftritt der Europäischen Chemikalien-Agentur, ECHA.



Neu von der Verordnung werden auch die schätzungsweise 30 000 Chemikalien erfasst, die bereits vor 1981 in Mengen über einer Jahrestonne auf den europäischen Markt gebracht wurden. Im Gegensatz zu den neueren Stoffen, die danach in Verkehr kamen, liegen zu diesen „Altstoffen“ oft nur unzureichende Informationen vor.

Am 1. Juni 2007 trat die REACH-Verordnung in allen 26 EU-Ländern in Kraft. Einer nationalen Umsetzung bedarf es bei EU-Verordnungen im Gegensatz zu den EU-Richtlinien nicht mehr. Die gesetzliche Hierarchie mit chemikalienrechtlichem Schwerpunkt zeigt die Abb. 1. Dabei ist zu beachten, dass Verordnungen in mehreren gesetzlichen Hierarchie-Ebenen bestehen: es gibt sowohl Europäische als auch nationale Bundes-Verordnungen in Deutschland. Hinzu kommen in anderen Rechtsbereichen noch die Verordnungen zu den Gesetzen der Bundesländer.

### REACH-Verordnung, Vorregistrierung und Zeitplan

Für viele Stoffe gewinnt die Chemische Industrie der EU erst einmal viel Zeit: Innerhalb von 12 Jahren nach Inkrafttreten soll geprüft werden, ob die Verpflichtungen zur Beurteilung der Stoffsicherheit und Erstellung eines Stoffsicherheitsberichtes auch auf nicht registrierungspflichtige bzw. Stoffe unterhalb einer Verkaufsmenge von 10 t/Jahr angewendet werden soll.

Immerhin bewerten Verbände trotz aller Kritik an REACH positiv, das wenigstens die nicht abbaubaren und im menschlichen Körper anreichernden Stoffe zu ersetzen sind. Auch können großvolumige Bulk-Chemikalien in absehbarer Zeit nicht mehr ungetestet vermarktet werden.

Nach Ablauf der verschiedenen Übergangsfristen sind nur noch Chemikalien auf den EU-Markt zu bringen, die mit einer Registrier-Nummer der Europäischen Chemikalien-Agentur, der ECHA (Abb.2) im finnischen Helsinki, versehen sind.

Von der REACH-Verordnung ausgenommen sind

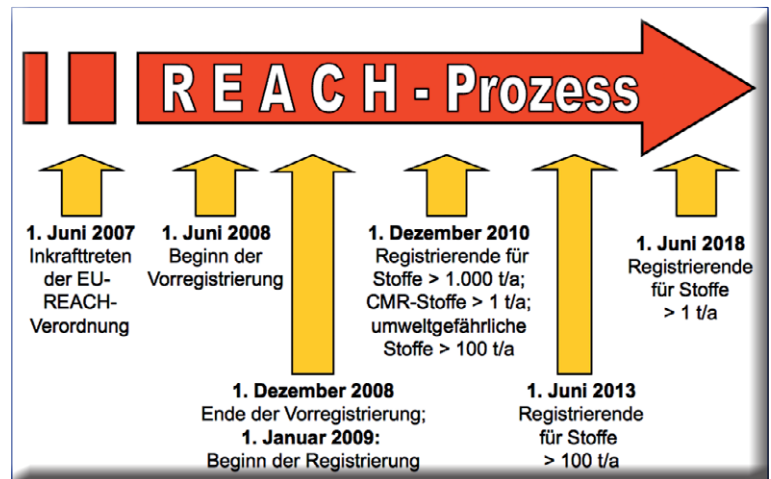


Abbildung 3: Termine für die Umsetzung der REACH-Verordnung.

- Polymere
- Abfälle (unterliegen dem Abfallrecht)
- Nicht-isolierte Zwischenprodukte
- Radioaktive Stoffe (unterliegen dem Atomrecht) sowie
- Stoffe im Transitverkehr (unterliegen der Zoll-Überwachung).

Ferner sind weitere Stoffe dann ausgenommen, wenn sie durch andere gesetzliche Vorschriften angemessen geregelt sind.

Bis zum 30. November 2008 konnten Hersteller und Importeure ihre Stoffe aus dem Altstoff-Verzeichnis (Stoffe, die schon vor 1981 im Handel waren) im Rahmen einer Vorregistrierung freiwillig bei der ECHA anmelden. Das stieß besonders durch EDV-Probleme in Helsinki auf Schwierigkeiten. Dennoch erreichten über 2 Mio. Stoffe die Vorregistrierung, die mit Abstand meisten noch in den letzten Tagen vor Ablauf der Frist. Bis Mitte September verzeichnete die ECHA noch lediglich 350 000 Stoffe.

Die Vorregistrierung hat für die Anmelder zwei Vorteile: Sie erhalten eine jahresmengenabhängige Übergangsfrist für die Voll-Registrierung, und sie können im Rahmen eines Substanz-Informations-Austauschforums Anmelder mit identischen Stoffen ausfindig machen und Stoffdaten austauschen.

Abbildung 4: Blick in ein Laborchemikalien-Depot.



Abbildung 5: Betriebliches Lagertanks für Chemikalien.





Abbildung 6:  
Großtanklager  
für flüssige und  
feste Stoffe oder  
Gemische (kleines  
Bild).

Die Übergangsfristen belaufen sich mengenabhängig auf bis zu elf Jahren, bis Juni 2018. In Abb. 3 sind sie in Form eines Zeitstrahls aufgeführt.

Chemikalien werden in der Form von Spezial-Chemikalien in kleineren Mengen in den Handel gebracht, wie etwa Laborchemikalien (Abb. 4), in Chargengrößen von einigen Tonnen (Abb. 5) oder in großen Mengen, wie wir es von der Petrochemie, der Rohstoffchemie, der Baustoffe und der Düngemittel her kennen (Abb. 6).

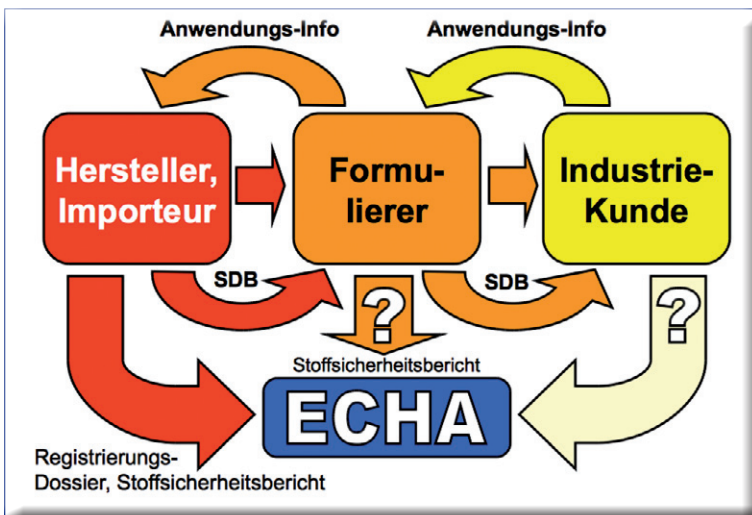
### Registrierung

Mit Hilfe eines speziellen EDV-Programms namens „IUCLID 5“ (International Uniform Chemical Information Database, Version 5), das von der ECHA zur Verfügung gestellt wird, muss für Stoffe oberhalb eines jährlichen Handelsvolumens von 1 t ein Dossier eingerichtet werden.

Die in IUCLID abspeicherbaren Daten umfassen Informationen über:

- Anmeldende Organisation und Stoff
- Zusammensetzung
- Schlüsselnummern (z.B.: CAS-, EINECS-, EG-Nr.)
- Klassifizierung und Kennzeichnung (GHS-Überschneidung!)

Abbildung 7:  
Verantwortung  
nach REACH in  
der Lieferkette.



- Physikalisch-chemische Eigenschaften
- Toxikologische Eigenschaften
- Ökotoxikologische Eigenschaften.

Diese Daten stehen allen Unternehmen zur Verfügung. Besonders bei Tierversuchen sind Wiederholungen untersagt. Entsprechende Daten sind zunächst nachzufragen. Neue Daten sind nach der „Guten Laborpraxis“ (ChemG) durchzuführen.

Für Stoffmengen über 10 t/Jahr wird ein Stoffsicherheitsbericht erforderlich (Art. 10 b). Darin ist die Exposition des beschriebenen Stoffes und dessen Wirkung auf Mensch und Umwelt entlang der Lieferkette zu beschreiben. Die sich daraus ergebenden Risiken sind zu benennen. Es liegt in der Natur der Sache, dass die meisten Stoffkenntnisse bei den Herstellern vorhanden sind, die größten Expositionen jedoch bei der Ver- und Anwendung entstehen.

Nach Anh. I der REACH-Verordnung umfasst ein Stoffsicherheitsbericht folgende Schritte:

1. Ermittlung der schädlichen Wirkungen und Ableitung von Grenzwerten, ab wann keine gesundheitliche Beeinträchtigung mehr zu befürchten ist (DNEL-Werte)
2. schädliche physikalisch-chemische Wirkungen auf den Menschen
3. schädliche Umweltauswirkungen und Ableitung von Grenzkonzentrationen (PNEC-Werte)
4. Ermittlung von nicht abbaubaren, bioakkumulierenden und giftigen Eigenschaften sowie sehr persistente und sehr bioakkumulierende Eigenschaften (PBT/ vPvB)
5. Expositionsbeurteilung, Expositionsszenarien, ggf. Entwicklung einschlägiger Verwendungs- und Expositions-kategorien
6. Risikobeschreibung.

Die letzten beiden Schritte werden nur bei gefährlichen, nicht-abbaubaren, bioakkumulierenden und toxischen Stoffen notwendig.

### Strategische Überlegungen

Anwender von Chemikalien müssen für die Zukunft sicherstellen, dass ihre Einsatz- und Hilfsstoffe weiterhin am Markt erhältlich bleiben. Entsprechende Informationen und u. U. angepasste Konditionen sind rechtzeitig in Erfahrung zu bringen. Die Konsequenzen aus Lieferproblemen und Qualitäts-Einbußen können bis zum völligen Überdenken der Unternehmenspolitik führen.

Intensivere Kommunikationen und Kooperationen entlang der Stoff-, Chemikaliengemisch- und Erzeugnis-Lieferketten erhöhen zwangsläufig die Bedeutung des „Supply-Chain-Managements“ (Abb. 7). In kleineren Unternehmen sind die Einkaufsabteilungen mitunter überfordert. In derartigen Gegebenheiten sind befristete Projektgruppen oder Unterstützung von außen zu empfehlen.

- Als Maßnahmen bieten sich folgende Schritte an:
- Zusammenstellen der Chemikalien-Einkäufe nach Art, Menge, Qualität, Frequenz
  - Kontakt zu Lieferanten
  - problematische Stoffe identifizieren und u. U. ersetzen
  - Kommunikation mit Kunden
  - Eigenimporte vorregistrieren
  - prüfen, ob die eigenen Anwendungen bei den Anmeldungen der Lieferanten Berücksichtigung finden
  - schützenswerte Anwendung patentrechtlich anmelden
  - mit Herstellern und Kunden Expositions-Szenarien abstimmen.

Unternehmen sind gut beraten, die veränderten Beschaffungsbedingungen im Zusammenhang mit der europäischen REACH-Verordnung zu erkennen, zu verstehen und ihre spezielle Bedeutung für ihr Unternehmen zu überprüfen.

Für galvanotechnische Betriebe beispielsweise lässt sich durchaus vorstellen, dass sie durch die REACH-Verordnung veranlasst werden, sich mehr und mehr ins außereuropäische Ausland zu begeben, um sich die zum Teil sehr gefährlichen Chemikalien dort leichter und preiswerter zu beschaffen. Die Einführung eines verzinkten Bleches oder eines teilvergoldeten Elektronik-Chips nach Europa unterliegt dann nicht mehr der neuen Chemikalien-Gesetzgebung.

Entsprechend des Ausmaßes an Betroffenheit sind Beschaffungs-Strategien zu überdenken, Produktlinien neu zu kalkulieren und Substitutions-Möglichkeiten zu analysieren, um schließlich Ziele mit den entsprechenden Maßnahmen formulieren zu können.

Das morphologische Diagramm in Abb. 8 kann den Ordnungsrahmen für entsprechende Untersuchungen der zugekauften Stoffe, Gemische und Erzeugnisse darstellen. Aber auch die Priorisierung von Stoffen und Maßnahmen durch eine ABC-Analyse kann sehr hilfreich sein.

### Kosten für die Registrierungen

Der Ratifizierung der REACH-Verordnung gingen zahlreiche Diskussionen mit der Chemischen Industrie Europas voraus. Der Gesetzgeber ließ in vielen Punkten mit sich reden. Umweltverbände hätten sich umfangreichere Lösungen gewünscht.

Auch wenn sich die Chemie-Industrie bereits schon früher um die Bereitstellung umfangreicher Daten zum sicheren Umgang mit gefährlichen Chemikalien hätte kümmern müssen, mit REACH kommen hohe Kosten in relativ kurzer Zeit auf sie zu.

Die wesentlichen Kostenarten dürften dabei auf die eigene Organisation, Personal-Beschaffung, Analysen und externe Datenerhebung als Konsortien-Beitrag oder direkt belaufen.

Der VCI schätzte den Aufwand für die Stoffprüfungen und die Registrierung bei der Europäischen

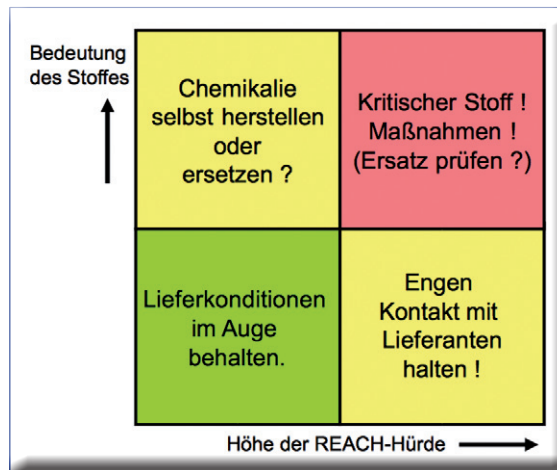


Abbildung 8: Portfolio zur Sicherung der Chemikalien-Beschaffung.

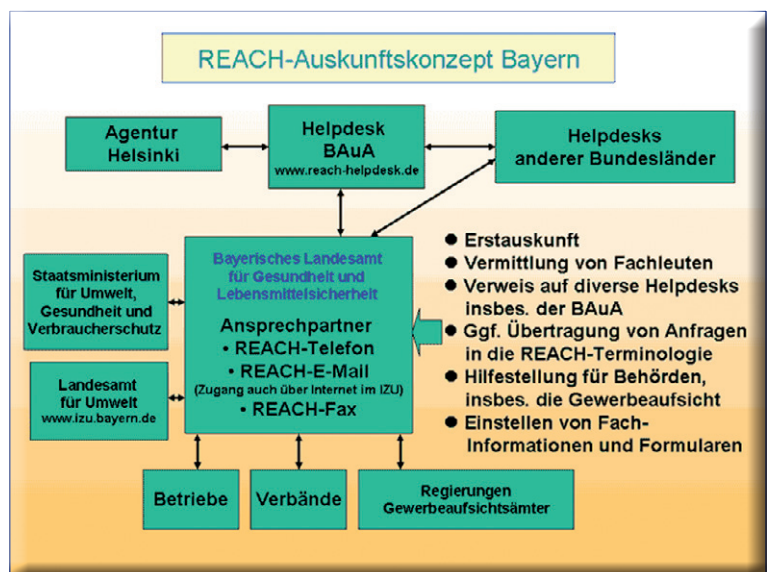
Chemikalien-Agentur, ECHA, vor Inkrafttreten der REACH-Verordnung ab. Das Ergebnis ist nachstehend zusammenfassend wiedergegeben:

20 000 Stoffe:	1 – 10 t/ Jahr	kosten je 50.000 €	→ 1.000 Mio. €
4600 Stoffe:	10 – 100 t/ Jahr	kosten je 140 000 €	→ 644 Mio. €
2800 Stoffe:	100 – 1000 t/ Jahr	kosten je 390 000 €	→ 1092 Mio. €
2600 Stoffe:	über 1000 t/ Jahr	kosten je 695 000 €	→ 1807 Mio. €

Laut einer Studie der EU-Kommission werden sich die Kosten im Zusammenhang mit der REACH-Verordnung für die Chemie-Industrie auf 1,5 bis 7,0 Milliarden Euro belaufen. Die weiterverarbeitende Industrie muss mit Kosten von 14 bis 26 Milliarden Euro rechnen.

Es gehört wenig prophetisches Können dazu, sich für die Zukunft vorzustellen, welche betriebswirtschaftlichen Klimmzüge notwendig sein werden, um diese zusätzlichen Belastungen neben den Konjunkturzyklen und dem internationalen Globalisierungsdruck zu verkraften.

Abbildung 9: Unterstützungs-Instrumente für die REACH- Umsetzung am Beispiel des Bundeslandes Bayern.



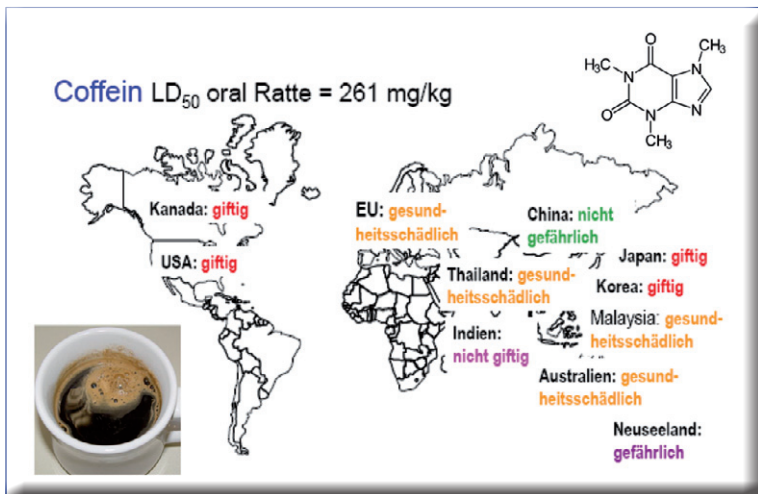


Abbildung 10: Global unterschiedliche Gefährdungseinstufung von Coffein.

Alle Parteien, die REACH auf den Weg brachten, haben die Komplexität dieses Systems unterschätzt. Doch jetzt ist der Geist aus der Flasche. ber Fristverlängerungen lässt die ECHA trotz des hohen administrativen Aufwands nicht mit sich reden.

Die bisher durchgeführten Kontrollen zur REACH-Umsetzung verliefen nach Aussage des VCI fair und unterstützend. Weitere 2 000 Inspektoren befinden sich in der Ausbildung.

Der REACH-Prozess erfährt auf einer Reihe von Informations-Plattformen im Internet Unterstützung. Neben den nationalen und internationalen Verbänden, wie VCI und CEFIC, sowie Bundesumweltamt, UBA, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, BAuA, und anderen bieten auch die Bundesländer Hilfestellungen an. Am Beispiel des REACH-Auskunfts-konzeptes Bayern stellt Abb. 9 die Vernetzung der verschiedenen Institutionen dar.

Aber als wenn das nicht schon für die chemische Industrie in Europa mehr als genug wäre, will die Europäische Union zur gleichen Zeit auch noch das lange diskutierte Projekt der weltweit harmonisierten Kennzeichnung in Europa umgesetzt wissen.

Abbildung 10: Global unterschiedliche Gefährdungseinstufung von Coffein.

**Resin solution X 50**

**Company name**  
**Street**  
**City, State, ZIP Code**  
**Tel.: / Fax: / e-mail:**

**Danger**  
If medical advice is needed, have product container or label at hand. Keep away from reach of children. Read label before use.

**Gefahr**  
Ist ärztlicher Rat erforderlich, Verpackung oder Etikett bereithalten. Darf nicht in die Hände von Kindern gelangen. Vor Gebrauch Etikett lesen.

**Wichtige Informationen:**  
Bei Hautkontakt: Sofort mit viel Wasser abwaschen. Bei Augenkontakt: Sofort mit viel Wasser abwaschen. Bei Verschlucken: Sofort mit viel Wasser abwaschen. Bei Einatmen: Sofort mit viel Wasser abwaschen.

**Umweltinformationen:**  
Bei Freisetzung in die Umwelt: Sofort mit viel Wasser abwaschen. Bei Freisetzung in die Luft: Sofort mit viel Wasser abwaschen.

**UN1263**  
**3**

### Globally Harmonised System

Bereits auf der Rio-Konferenz 1992 wurde der Ruf nach einem einheitlichen Kenzeichnungssystem für Gefahrstoffe laut.

So wird beispielsweise Amphetamin (1-Phenyl-2-propanamin) mit einem oralen Toxizität von LD<sub>50</sub> = 257 mg/kg in Europa mit dem Andreaskreuz als gesundheitsschädlich, X<sub>n</sub> eingestuft, währen sie in den USA als giftig gelten. Australien und Thailand schließen sich der europäischen Bewertung dieser Stoffe an, während Kanada und Korea die Amphetamine ebenfalls als giftig einstufen. China und Indien stehen sogar auf dem Standpunkt, dass Amphetamine keine Gefahrstoffe darstellen.

Ebenso unterschiedlich wird in den verschiedenen Teilen der Welt das Coffein gesehen (Abb. 10).

Auf dem Weltgipfel für Nachhaltigkeit 2002 in Johannesburg wurde das GHS weltweit zur Umsetzung schließlich verabschiedet. Sein Original-Titel lautet etwa „Globally Harmonised System of Classification, Labelling and Packaging of Substances and Mixtures...“. Statt der Abkürzung GHS für diesen langen Titel ist daher auch der Begriff „CLP-Verordnung“ im Gebrauch.

Ziel der Verordnung ist es, ein hohes Schutzniveau für die menschliche Gesundheit und für die Umwelt sicherzustellen und gleichzeitig den freien Verkehr von Stoffen und Gemischen zu garantieren. Hierzu verfolgt die EU-Verordnung auf Empfehlung der Vereinten Nationen einen fünffachen Ansatz:

1. Harmonisierung der Einstufung, Kennzeichnung und der Verpackungsvorschriften für Stoffe und Gemische
2. Verpflichtung der Unternehmen, ihre Stoffe und Gemische selbst einzustufen
3. Verpflichtung der Unternehmen, diese Einstufungen zu melden
4. Einführung einer harmonisierten Liste (Anhang VI)
5. Einführung eines Einstufungs- und Kennzeichnungs-Verzeichnisses aus allen Meldungen.

Nach dem neuen GHS-System muss der Hersteller und Importeur ab 01.12.2010 seine Stoffe deklarieren. Für Gemische hat man noch bis Mitte 2015 Zeit.

### Neue Anforderungen aus der EU-GHS/CLP-Verordnung

Neben den entsprechenden Sicherheitsdatenblättern, die durch die REACH-Verordnung mit dem angehängten Sicherheitsbericht zum Teil Taschenbuch-Format mit über 100 Seiten erreichen, bekommen auch die Etiketten nach GHS ein völlig neues „Gesicht“ (Abb. 11):

Produktname (evtl. mit Inhalt oder Konzentration), Name, Anschrift und Telefon-Nr. des Lieferanten sowie eine Mengenangabe sind wie bisher zu erkennen. Neu sind die



- Angaben aus 9 Piktogrammen (statt aus 7 Gefahrstoffkennzeichen) (Abb. 12) mit entsprechenden Rangfolge-Regeln (Abb. 13 a und b)
- Zusätzliche Signalwörter („Gefahr“ oder „Achtung“) (Abb. 14)
- Gefahren- und Sicherheitshinweise (statt R und S, zweistellig: H und P, dreistellig) (Abb. 15 und 16)
- Angaben aus 28 Gefährlichkeitsmerkmalen (statt 15). Die neuen Gefährlichkeitsmerkmale unterteilen sich in 16 physikalisch-chemische Eigenschaften, zehn zum Gesundheitsschutz sowie zwei Merkmale für den Umweltschutz.

Diese Eigenschaften werden noch in bis zu fünf Kategorien eingeteilt, wobei die Kategorie 1 am gefährlichsten ist.

Da die meisten Chemikalien-Hersteller bereits Gebinde mit neuen Etiketten auf den Markt gebracht haben, sind generelle Schulungen zu diesem neuen GHS sowie Unterweisungen anhand der Gebinde-Etiketten und Sicherheitsdatenblätter unerlässlich.

Die 16 neuen Bezeichnungen für physikalisch-chemische Gefahrstoff-Eigenschaften sind:

1. explosive Stoffgemische / Erzeugnisse
2. endzündbare Gase
3. endzündbare Aerosole
4. endzündend wirkende Gase
5. unter Druck stehende Gase

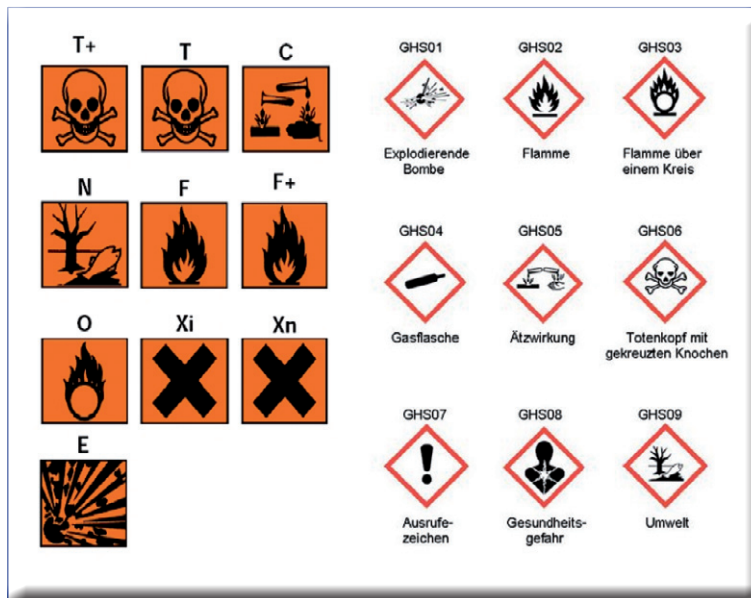


Abbildung 12 (oben): Alte Gefahrstoff-Symbole und neue Gefahrstoff-Piktogramme.

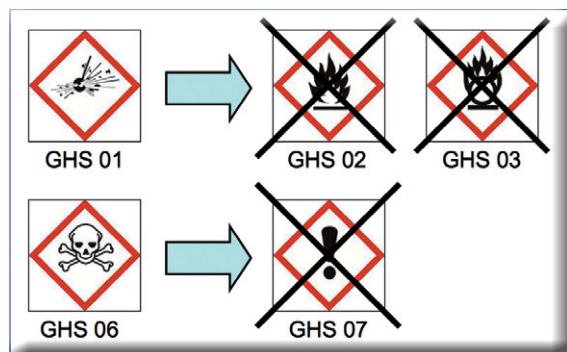


Abbildung 13 a: Rangfolge-Regelung für Gefahren-Piktogramme II.

Abbildung 13 b: Rangfolge-Regelung für Gefahren-Piktogramme I.

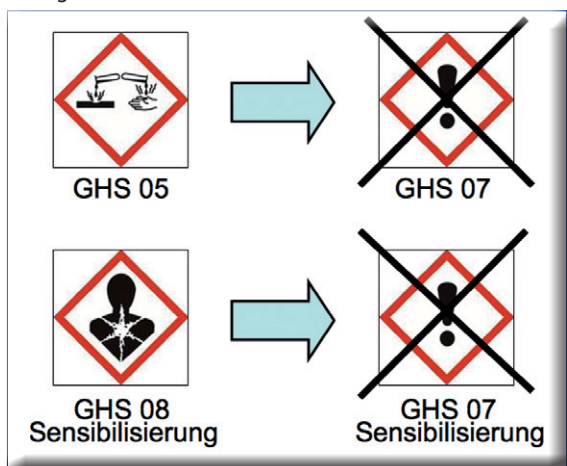


Abbildung 14: Signalwörter als zusätzlichen Warnhinweis auf den Grad der Gefährdung.

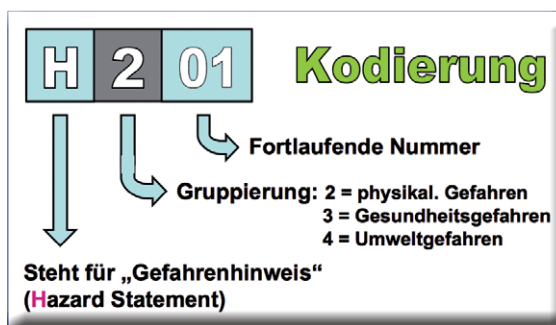
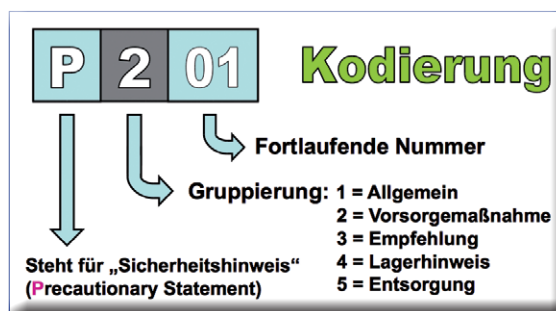


Abbildung 15: Gefahren-Hinweise nach GHS.

Abbildung 16: Sicherheits-Hinweise nach GHS






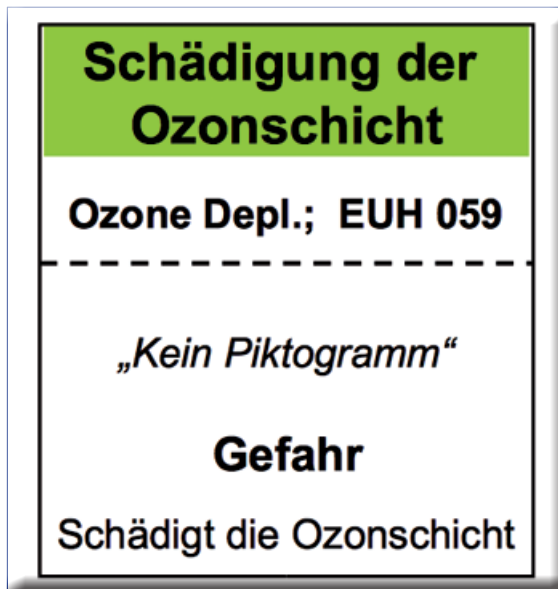
<b>Akut Kategorie 1</b> Aquatic Acute 1; H400  <b>Achtung</b> Sehr giftig für Wasserorganismen.	<b>Chronisch Kategorie 1</b> Aquatic Chronic 1; H410  <b>Achtung</b> Sehr giftig für Wasserorganismen, Langzeitwirkung.	<b>Chronisch Kategorie 2</b> Aquatic Chronic 2; H411  kein Signalwort Giftig für Wasserorganismen, Langzeitwirkung.	<b>Chronisch Kategorie 3</b> Aquatic Chronic 3; H412 kein Piktogramm kein Signalwort Schädlich für Wasserorganismen, Langzeitwirkung.	<b>Chronisch Kategorie 4</b> Aquatic Chronic 4; H413 kein Piktogramm kein Signalwort Kann für Wasserorganismen schädlich sein, Langzeitwirkung.
--	--	--	---	---

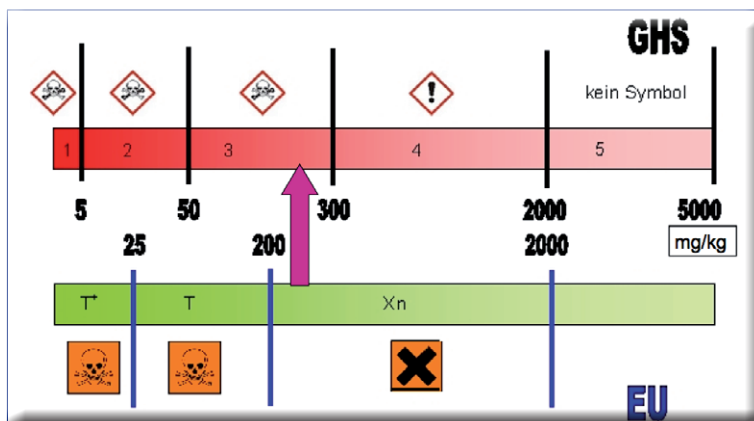
Abbildung 17 a: Gefahrenklasse „Gewässergefährdend“, bestehend aus einer akuten und vier chronischen Kategorien.

Abbildung 17 b: Gefahrenklasse „Die Ozonschicht schädigend“.



6. entzündbare Flüssigkeiten
7. entzündbare Feststoffe
8. selbstentzündliche Stoffe / Gemische
9. selbstentzündliche Flüssigkeiten
10. selbstentzündliche Feststoffe
11. selbsterhitzungsfähige Stoffe / Gemische
12. Stoffe / Gemische, die mit Wasser entzündbare Gase entwickeln
13. entzündend wirkende Flüssigkeiten
14. entzündend wirkende Feststoffe
15. organische Peroxide
16. auf Metalle korrosiv wirkend.

Abbildung 18: Unterschiedliche Grenzen für Gefahrstoff-Eigenschaften nach altem und neuem System.



Die zehn Gesundheits-Gefährlichkeitsmerkmale für den Menschen sind:

- akute Toxizität (oral, dermal, inhalativ; je 5 Kategorien)
- Atemgift
- haut- und augenschädigend
- Augenbeeinträchtigung
- hustenreizend
- hautallergisierend
- mutagen
- karzinogen
- reproduktionstoxisch (Fruchtbarkeit und Entwicklung)
- organotoxisch (toxisch auf bestimmte Organe bei einmaliger und wiederholter Dosis).

Schließlich sind noch die beiden Umweltgefahren „aquatische Toxizität“ und „ozonzerstörend“ (durch FCKW) zu beachten (Abb. 17 a und b).

Statt der Risikosätze, den „R-Sätzen“, schreibt die GHS-Verordnung die H-Sätze vor. H kommt von der englischen Bezeichnung für Gefahr: „Hazard“. Dem „H“ folgt die Ziffer 2 für physikalisch-chemische Gefährdung, 3 für Gesundheitsgefährdung und 4 für Umweltgefahren. Die weiteren beiden Ziffern geben wie bisher die entsprechenden Eigenschaften an.

Noch umfangreicher und komplexer sind die neuen Sicherheits-Sätze gestaltet: aus den „S-Sätzen“ werden „P-Sätze“, hergeleitet aus dem englischen „Precaution“ für Vorsichtsmaßnahme.

Veränderte Einstufungen nach GHS im Vergleich zum bisherigen europäischen System wird es vor allem dort geben, wo sich Grenzwerte verändert haben. Das ist beispielsweise bei den giftigen Stoffen der verschiedenen neuen Kategorien der Fall. Die Einstufungen erfolgen nach den tödlichen Dosen bei Versuchstieren. Während bisher schon oberhalb einer letalen Dosis von 200 mg/kg ein Stoff oder ein Gemisch nicht mehr als giftig angesehen wurde, erhöht sich diese Grenze auf 300 mg/kg (Abb. 18). Das hat für die betroffenen Stoffe umfangreiche Konsequenzen. Man denke nur an die Störfall-Verordnung (12. BImSchV), in der die Gefahrstoff-Eigenschaften und Mengen über die Zuordnung mit vielen Verpflichtungen entscheiden.

Ein weiteres Beispiel sind die entzündbaren Flüssigkeiten, für deren Grenzwerte der Flammpunkt und der Siedepunkt bestimmend sind (Abb. 19).

Wesentlich größere und stärkere Stahlhülsen schreibt die GHS-Verordnung für die Zuordnung zu den explosiven Eigenschaften vor (Abb. 20). Die bisherigen Tests der Bundesanstalt für Materialprüfung, BAM, Berlin, verlangten schon an die 30 Gramm Testmaterial für einen Versuch. Zukünftig wird sich die Materialmenge auf mehr als ein Kilo für einen Versuch ausweiten. Abgesehen von den hierfür notwendigen kriegsbunkerartigen Testlabors sollte dabei auch einmal an die Materialkosten gedacht werden. Wenn auf diese Weise die explosiven Edelmetall-Verbindungen oder teure Pharmarohstoffe zu überprüfen sind, ver-

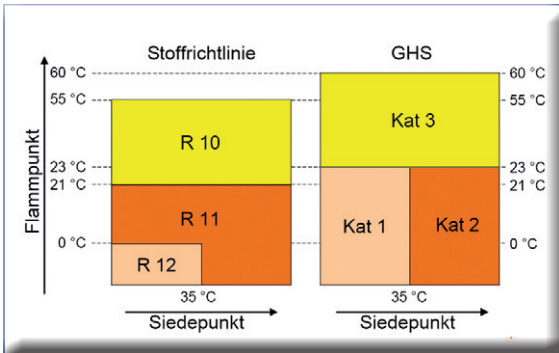


Abbildung 19: Änderung der Grenzen für entzündbare Flüssigkeiten.

Abbildung 20: Test für explosive Stoffe und Gemische mit einer wesentlich größeren Stahlhülse als vorher (neue Stahlhülse vor und nach dem Test).



flüchtigen sich schnell einmal über 100 000 Euro je Versuch.

Leicht ist man dann versucht, die Explosions-Tests durch Experten-Beurteilungen zu ersetzen. Zwar ist das grundsätzlich eine erlaubte Alternative, kann aber auch leicht zu Fehlbeurteilungen führen, wie Abb. 21 andeutet.

Zwangsläufig ergeben sich auch für viele Umweltgesetze Änderungen, die von den verwendeten Stoffen und ihren potentiellen Gefahren abhängen. Das beginnt schon bei dem neuen Lager-Konzept (Abb. 22), das weitgehend auf den Grundlagen des vom VCI erarbeiteten Lagerpapiers basiert.

### Konsequenzen aus den REACH- und GHS-Verordnungen

Auf den Gesetzgeber in Deutschland, wie in den anderen EU-Staaten, kommt eine Reihe von Anpassungen der bestehenden gesetzlichen Regelungen zu. Nahezu alle Umwelt- und Chemikalienrechte sind davon betroffen, von den Bundesgesetzen bis zu den untergesetzlichen Regelwerken, den Normen und Merkblättern.

Daher werden in den kommenden Jahren viele Anpassungen, Harmonisierungen und Ergänzungen auf die Verantwortlichen in den Betrieben, Lagerhallen und Laboratorien zukommen.

Konkret müssen die Verantwortlichen jetzt sicherstellen, dass für ihre Gefahrstoffe, die sie in ihren Ge-

fährstoff-Verzeichnissen aktuell aufgelistet haben, die entsprechenden, von den Herstellern oder Importeuren überarbeiteten Sicherheitsdatenblätter beschafft werden.

Auf Basis diese Unterlagen sowie möglicherweise weiteren Informationen sind die Gefährdungsanalysen zu überprüfen. Änderungen ziehen wiederum Anpassungen in den Sicherheits-Maßnahmen nach sich.

Entsprechend gilt es, auch die Gebinde in den Betrieben sowie bestimmte Rohrleitungen und Behälter neu zu kennzeichnen, nachdem entsprechende Unterweisungen der betroffenen Mitarbeiter stattgefunden haben. Betriebsanweisungen sind schließlich ebenfalls anzupassen und mit den betroffenen Mitarbeitern zu besprechen. Wenn sich bei den Diskussionen Erklärungs-Schwierigkeiten ergeben, müssen Fachleute herangezogen werden. Das können unternehmensinterne Fachkräfte für Arbeitssicherheit oder Mitarbeiter des Arbeitsmedizinischen Dienstes sein sowie externer Beistand.

Diese Unterweisungen sind vor dem Einsatz der Beschäftigten in der Handhabung mit den neu angebrachten Kennzeichnungen und Beschriftungen vorzunehmen.

Bei dem hohen Unterweisungs- und Schulungsaufwand in Zusammenhang mit der GHS-Verordnung, die immerhin mit über 1300 Seiten nicht gar so übersichtlich ist, haben sich auch elektronisch aufbereitete Lektionen bewährt. Sie ersetzen jedoch keineswegs eine Unterweisung vor Ort, die auf die speziellen Gegebenheiten eingeht und auch eine unmittelbare Kommunikation zulässt. **CLB**

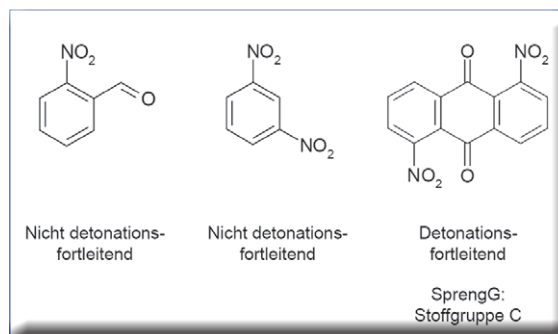
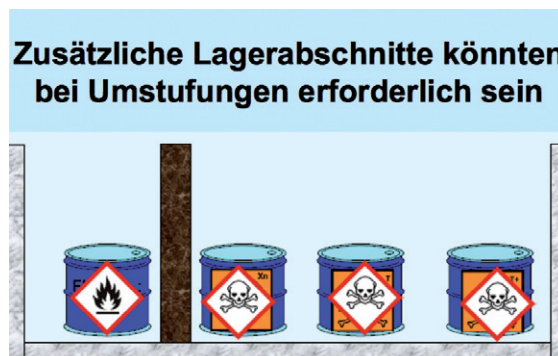


Abbildung 21: Problematische Experten-Voraussage bei explosiven Eigenschaften ohne Tests.

Abbildung 22: Neues Lager-Konzept nach den GHS-Einstufungen.



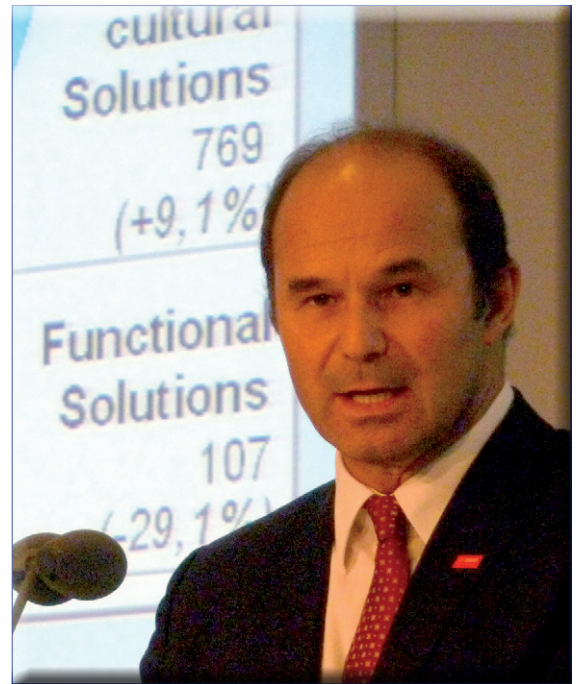
# Kunststoffe: Asien dominiert die Nachfrage

## BASF-Infos im Vorfeld der K 2010

„Seit 2007 ist der Kunststoffverbrauch in Asien größer als die Nachfrage in Europa und Amerika zusammen. Der Schwerpunkt der BASF-Investitionen in Neuanlagen wird daher in den nächsten Jahrzehnten in Asien liegen“, deutete BASF-Vorstand Dr. Martin Brudermüller auf der Fachpressekonferenz Ende Juni in Frankenthal mit Blick auf die Kunststoffmesse K 2010 (27.10. - 3.11. in Düsseldorf) in die Zukunft.

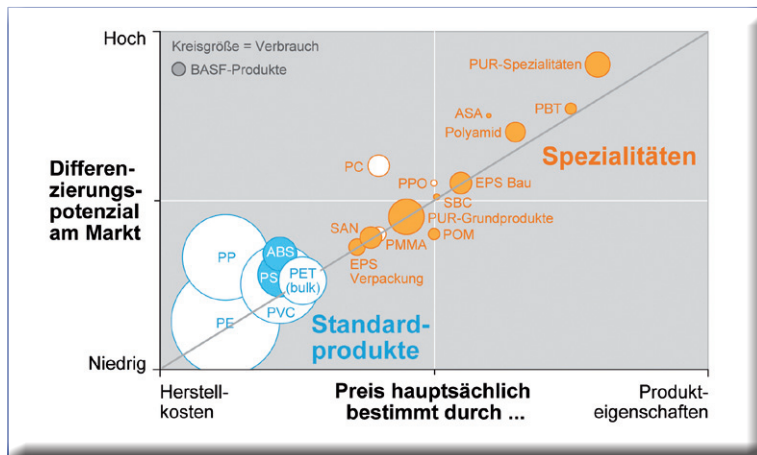
Aktuell baut der Ludwigshafener Konzern eine MDI-Anlage mit einer Jahreskapazität von 400 000 Tonnen in Chongqing in West-China, einer Region mit etwa 300 Millionen Menschen. Die Abkürzung MDI steht für Diphenylmethandiiisocyanate. Das sind chemische Verbindungen aus der Gruppe der aromatischen Isocyanate. MDI ist der wesentliche Rohstoff für Polyurethan und Poly-

amidimid bzw. für Weichschaum-, Isolierschaum- und Klebstoffe. Die Anlage in China entsteht in engem Verbund mit einem Polyurethan(PU)-Systemhaus. Darin entwickelt man in enger Zusammenarbeit mit Kunden Anwendungen vor allem für die Bauindustrie, für Kühl- und Haushaltsgeräte, für Automobil und Transport als auch die Schuhindustrie. Laut Brudermüller wird die Anlage – die größte MDI-Anlage der Welt – 2013 fertiggestellt und 2014 die Produktion aufnehmen.



Trotz Asien-Dominanz: Immerhin 20 Prozent des Kunststoff-Umsatzes in Asien kommen aus Ludwigshafen, betont der für Kunststoffe sowie den asiatischen Raum zuständige BASF-Vorstand und designierte stellvertretende Vorstandsvorsitzende Dr. Martin Brudermüller (Foto: Kickuth).

Die Marktsegmentierung von Kunststoffen nach Menge, Preisgestaltung und Spezialisierungsgrad (die Abkürzungen (v. l.: PE = Polyethylen, PP = Polypropylen, PVC = Polyvinylchlorid, PS = Polystyrol, ABS = Acrylnitril / Butadien / Styrol, PET = Polyethylenterephthalat, EPS = expandiertes Polystyrol, SAN = Styrol / Acrylnitril, PMMA = Polymethylmethacrylat, PUR = Polyurethan, PC = Polycarbonat, POM = Polyoxymethylen (Polyacetalharz; Polyformaldehyd), SBC = Styrol-Butadien-Blockcopolymer, PPO = Polyphenylenoxid (alt PPE), ASA = Acrylnitril / Styrol / Acrylester, PBT = Polybutylenterephthalat; Abb.: BASF).



Die BASF will 70 Prozent des Kunststoff-Umsatzes in Asien, der in diesem Jahr etwa 20 Prozent des Gesamtchemieumsatzes dort ausmacht, auch in Asien produzieren. Bis 2020 will man das Chemiegeschäft in Asien auf 20 Milliarden Euro verdoppeln. Um die Marktnähe zu den

Kunden zu verbessern will man dort auch leistungsfähige Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen aufbauen. Brudermüller jedoch: „Immerhin 20 Prozent unseres Kunststoff-Umsatzes in Asien kommen aus Ludwigshafen.“ Die globale Nachfrage nach Kunststoffen werde sich mit einer Wachstumsrate von etwa fünf bis sechs Prozent pro Jahr bis 2015 fortsetzen. Das Anwendungspotenzial von Kunststoffen zeigte der BASF-Vorstand am Beispiel Auto auf: Heute machten Kunststoffe etwa 15 Prozent des Gewichtes eines Automobils aus – gegenüber nur sechs Prozent 1970. Bis 2020 erwarte man, dass dieser Anteil auf 25 Prozent steige. Auch hier gibt es ein besondere Wachstumserwartung in China, weil Autos dort noch einen unterdurchschnittlichen Kunststoffanteil von etwa der Hälfte westeuropäischer Autos aufweisen. Ein anderer Wachstumsimpuls kommt aus dem Technologiewandel hin

zur Elektrifizierung der Kraftfahrzeuge, die auch völlig neue Anforderungen an Materialien mit sich bringt – und maßgeschneiderte Kunststoffen neue Chancen bietet.

## Schlüsselwort Sparen

Hinter dem Erfolg der Kunststoffe steht ein Schlüsselbegriff: Sparen, und zwar in mehrfacher Hinsicht: Kunststoffe sparen Gewicht, durch intelligente Bauteilauslegungen Produktionskosten, Materialkosten etwa im Vergleich zu Metallen, und sie leisten immer mehr Beiträge zur Ressourcenschonung, sei es durch den Einsatz erneuerbarer Rohstoffe, sei es durch ihr geringeres Gewicht in den Autos, die dadurch verbrauchsärmer fahren können. Dabei erbringen die Kunststoffe ihre Leistungen oft eher unbemerkt vom Verbraucher.

So stellte Dr. Martin Baumert, Leiter Produktentwicklung Automobil des Bereichs Engineering Plastics Europe auf der BASF-Pressekonferenz einen Kunststoff vor, der einer Wärme-Dauerbelastung von 220 Grad Celsius gewachsen ist, kurzzeitig sogar 240 Grad aushält. Das Geheimnis dieses Polyamids Ultramid Endure: Das Material bildet eine Oberflächenschicht aus, die es dauerhaft vor oxidativer Zersetzung schützt. Damit erschließen sich für diesen Kunststoff – anstelle von Metallteilen – Einsatzbereiche im Umfeld der heißen Turbolader moderner Motoren. Möglich wären laut Baumert auch Saugrohre mit integrierten wassergekühlten Ladeluftkühlern.

## Plastik ersetzt Metall

Durch verbesserte Eigenschaften verdrängen Kunststoffe Metallbauteile auch in Produkten, die man nicht unbedingt den Erzeugnissen hoher Technologie zuordnet. Ein Beispiel dafür beschrieb Dr. Martin Bussmann, ebenfalls von dem

Bereich Engineering Plastics Europe: die Ventilarmatur von Feuerlöschern. Hier ersetzen Kunststoffbauteile solche aus Messing. Entwickelt hat diese Neuerung die Firma Multiplast, Moorbrunn in Österreich; die Produktion dort läuft jetzt unter Vollausslastung.

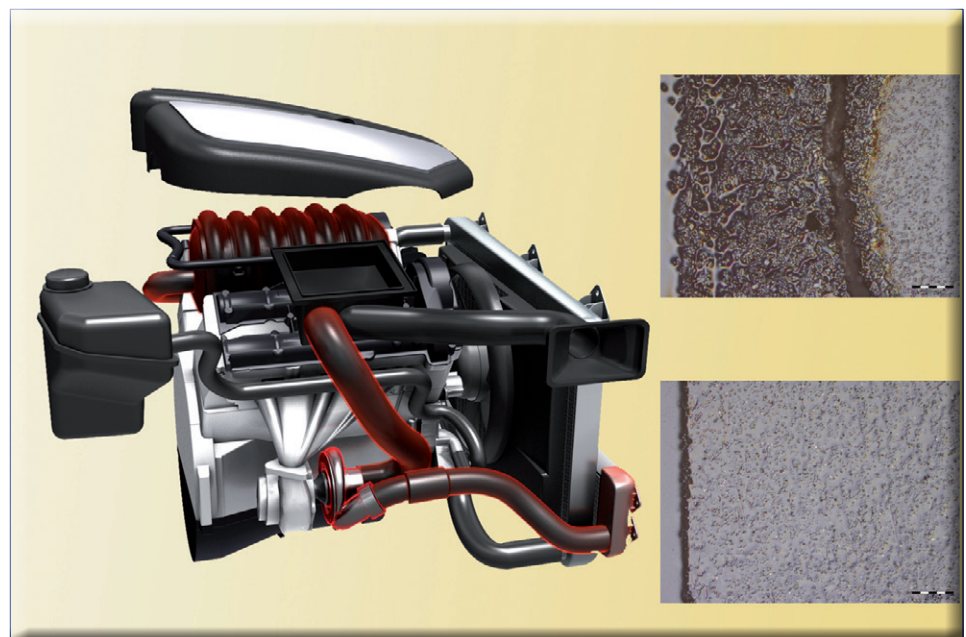
Die Zentralarmatur ist ein Multifunktionsbauteil, das die Anschlüsse für das innere Löschmittelsteigrohr, den Schlauch mit der Sprühpistole, den Auslöser und den Handgriff zusammenfasst. Um sicher zu funktionieren, verlangt der Hersteller, dass die Armatur zwischen minus 30 und plus 60 Grad Celsius einem Druck von 80 bar standhält und das bei einer Lebensdauer von 15 bis 20 Jahren. Einer der entscheidenden Nachteile der Messing-Armatur war für den Hersteller Multiplast die schwankende Qualität des importierten Metalls. Frühere Versuche, den Ventilkörper von Feuerlöschern

aus Kunststoff zu fertigen, scheiterten an den technischen Eigenschaften der verwendeten Materialien. Den Erfolg brachte jetzt ein Kunststoff, der einen Anteil von 50 Prozent an Glasfasern hat – auf der Materialseite.

## Simulation: Passend

Dieser Kunststoff, ein Spezialpolyamid, war nämlich nur ein Teil der Lösung. Maßgeblich dazu beigetragen haben Simulationsrechnungen, die auf die komplexe Simulationsumgebung „Ultrasim“ der BASF zurückgriffen. Im Unterschied zu normalen Simulationsprogrammen ermöglicht Ultrasim beispielsweise, die Orientierung der Fasern je nach Fülldruck und Anspritzpunkt zu bestimmen und darauf basierend das mechanische Verhalten des Bauteils zu optimieren. Laut Bussmann war dies bei 50 Prozent Glasfasern und hoher Anisotropie im Bauteil durchaus keine triviale Aufgabe.

Um Betriebstemperaturen bis 220 °C und Spitzentemperaturen bis 240 °C an höher aufgeladenen Motoren standhalten zu können, stehen dem Markt zwar besondere Hochleistungskunststoffe zur Verfügung, sie scheidet aber wegen der hohen Systemkosten für einen breiten Einsatz meist aus. Das Ludwigshafener Unternehmen bringt nun mit Ultramid Endure ein wärmestabilisiertes und preislich wettbewerbsfähiges Spezialpolyamid heraus, das die hohen Temperaturanforderungen für Bauteile der Ladeluftstrecke (Resonator, Ladeluftkühlerkappen, -leitungen, Drosselklappen und Saugrohr) erfüllt. So ist ein weiterer Schritt in Richtung Metalleratz und moderner Leichtbau getan. Rechts oben: Durch Sauerstoffangriff in der Hitze zerstörte Oberfläche des Standardwerkstoffs. Rechts unten: Die Oberfläche des Bauteils aus dem neuen Werkstoff ist kaum angegriffen (Abb.: BASF).





Der zentrale Ventilkörper einer neuen Feuerlöschergeneration besteht aus dem Spezialpolyamid Ultraamid® T KR 4355 G10 der BASF und stellt die erste Serienanwendung dieser hoch glasfaserverstärkten neuen Kunststofftype dar. Entwickelt hat es Multiplast in Moosbrunn, Österreich. Bei der Löscherarmatur musste für den Fall eines zu hohen Überdrucks am Ventil eine Schwachstelle definiert werden, die oberhalb von etwa 100 bar aufreißt und so ein unkontrolliertes Zerbersten des ganzen Löschers verhindert (siehe die lineare Kerbstruktur in dem gelb gekennzeichneten Bereich der Armatur im Bild oben). Dabei haben die Experten die Funktion dieser Sollbruchstelle mit der unternehmenseigenen Software Ultrasim genau ausgelegt und experimentell vollständig bestätigt. Tyco Fire Suppression & Building Products, einer der international größten Hersteller von Feuerlöschgeräten, hat die neuartige Kunststoffarmatur bereits bei einem Großteil seiner Produkte im Einsatz (Abb.: Kickuth).

Zentrale Bedeutung hatte die Simulation dreier Belastungsfälle: Das Verhalten der Armatur bei einem Überdruck von 120 bar, ihr Verhalten bei Biegebelastung durch die Druckpatrone in liegender Lagerung und die Wirkung einer dynamischen Belastung des Griffes durch ruckartiges Hochreißen des Löschers. Für den Fall eines zu hohen Überdrucks musste am Ventil eine Schwachstelle definiert werden, die oberhalb von 105 bis 110 bar aufreißt und so ein unkontrolliertes Zerbersten des ganzen Löschers verhindert. Dabei haben die Experten die Funktion dieser Sollbruchstelle mit dem Simulationsprogramm genau ausgelegt und experimentell vollständig bestätigt. Eine andere Herausforderung:

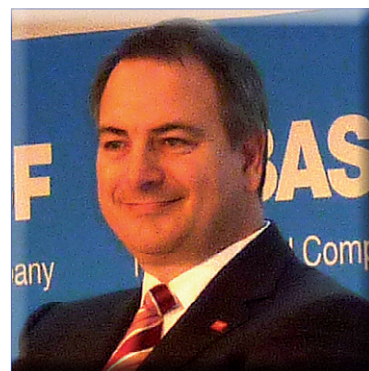
Beim Hochreißen am Tragehebel darf der Löscher keine Ausfälle zeigen. In die Rechnung flossen dehnratenabhängige Materialeigenschaften ein. Auch hier ergab sich eine hohe Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment. Mit diesen Kenntnissen konnte die genaue Gestalt des komplizierten Bauteils so bestimmt werden, dass es sich mit allen seinen integrierten Zusatzfunktionen und ohne Metallinserts in einem einzigen Spritzgießschritt herstellen lässt; selbst die vier integrierten metrischen Schraubgewinde sind aus Kunststoff. Zudem ist deren Chemikalienbeständigkeit so gut, dass die Löscherarmatur gleich die Zulassung für den maritimen Bereich erhielt.

### Kunststoffadditive: Für Funktion und Aussehen

Die Rezepturen für neue Kunststoff-Grundsubstanzen und die Informatik mit ihren Simulationswerkzeugen stehen jedoch nicht alleine für die Verbesserungen, die Kunststoffe in immer weitere Anwendungsfelder dringen lassen. Eine besonders große Rolle spielen auch die Kunststoffadditive. Wie Hans Reiners, Präsident Unternehmensbereich Performance Chemicals, auf der BASF-Pressekonzferenz ausführte, handelt es sich dabei – Pigmente eingeschlossen – um einen Multi-Milliardenmarkt. Dem Ludwigshafener Konzern brachte allein dieser Unternehmensbereich im Jahre 2009 einen Umsatz von 2,18 Milliarden Euro.

Maßgeblich gestärkt und Marktführer bei Kunststoffadditiven geworden ist man dabei durch die Integration des Spezialchemikalienherstellers Ciba. Insgesamt umfasst das Produktportfolio für die kunststoffverarbeitende Industrie Antioxidantien, Pigmente, Lichtschutzmittel und Spezialadditive. In diesem Jahr dürfte der Umsatz erheblich steigen, durch vollständige Ciba-Integration wie auch durch eine deutliche Markterholung. Allein im ersten Quartal erwirtschaftete BASF mit Perfor-

Hat durch die Ciba-Übernahme neues Gewicht gewonnen: der Unternehmensbereich Performance Chemicals, den Hans Reiners verantwortet (Bild: RK).



mance Chemicals einen Umsatz von 725 Millionen Euro, mehr als im 4. Quartal 2009 – und 206 Prozent mehr als im Vergleichsquarter des Vorjahres.

## Beispiele UV- und Flammenschutz

Additive sorgen für schöne, brillante und beständige Farben – mittlerweile auch ohne den Rückgriff auf Schwermetalle wie Blei oder Chrom. Der volkswirtschaftliche Nutzen wird aber noch deutlicher bei den folgenden zwei Beispielen aus der Landwirtschaft bzw. dem Brandschutz.

Laut UNO sollen 2050 neun Milliarden Menschen auf der Erde leben. Durch die wachsenden Städte, aber auch durch zunehmende Erosion und den Klimawandel geht jedoch stetig landwirtschaftliche Anbaufläche verloren. Die Herausforderung besteht also darin, die Landwirtschaft zu intensivieren, ihre Produkte aber gleichzeitig erschwinglich zu halten. Treibhäuser, die sich aus Kunststoff-Folien sehr kostengünstig errichten lassen, sind ein möglicher Ausweg aus diesem Dilemma.

Wie Victor Pacheco, Marketing Kunststoff-Additive für die Landwirtschaft, erläuterte, sind die Vorteile der Treibhaus-Produktion so überzeugend, dass Gemüse wie Tomaten, Paprika, Gurken und Auberginen bereits heute vorwiegend unter Polyolefin-Dächern herangezogen werden. Im Jahr 2009 wurden weltweit rund 900 000 Tonnen Kunststoff-Folien für Treibhäuser produziert, die rund 800 000 Hektar landwirtschaftliche Anbaufläche mit Kunststoff-Folien überspannen – das entspricht etwa der Fläche der Städte Tokio, Mexiko-Stadt, Madrid, Johannesburg, Rom, Moskau und Berlin zusammen. Im gleichen Zeitraum wuchs die Nachfrage nach Folien für Gewächshäuser weiter: Experten rechnen mit einem jährlichen

Wachstum von rund vier Prozent. Die wichtigsten Märkte liegen in der Mittelmeerregion. Auch einige asiatische, südamerikanische und ostafrikanische Länder bauen ihre Treibhausflächen mit hohem Tempo aus.

Mit einem neuen, kostengünstigen Kunststoff lassen sich nun auf besonders wirtschaftliche Weise LDPE-Folien (Low-Density-Polyethylen) herstellen, die an hohe Konzentrationen von Agro-Chemikalien (z.B. Schwefel) angepasst sind und auch unter intensiver Sonneneinstrahlung eine Lebensdauer von zwei und mehr Jahren aufweisen. Die Leistungsfähigkeit derart stabilisierter Folien ist auch in Kontakt mit hölzernen und metallischen Treibhauskonstruktionen sehr gut. Ohne Lichtstabilisator würden sie nicht einmal einen Erntezyklus überstehen.

Der Leiter der Geschäftsentwicklung Europa für Kunststoffadditive, Dr. Alfred Oertli, stellte einen neuen UV-Absorber im Detail vor (nicht im Zusammenhang mit den LDPE-Folien). Der Filter absorbiert mehr UV-Strahlung als herkömmliche Produkte und sei dabei außergewöhnlich licht-, wärme- und wetterbeständig. CGX UVA 006 – so der Name – basiert auf einem extrem stabilen Chromophor, der wie Hydroxy-Phenyl-Triazin (HPT) zur Klasse der Triazine gehört. Weitere Chromophore im BASF-Sortiment sind die Benzotriazole, Benzophenone und Cyanoacrylate. Die verschiedenen Chromophorklassen unterscheiden sich unter anderem in ihrem Absorptions-

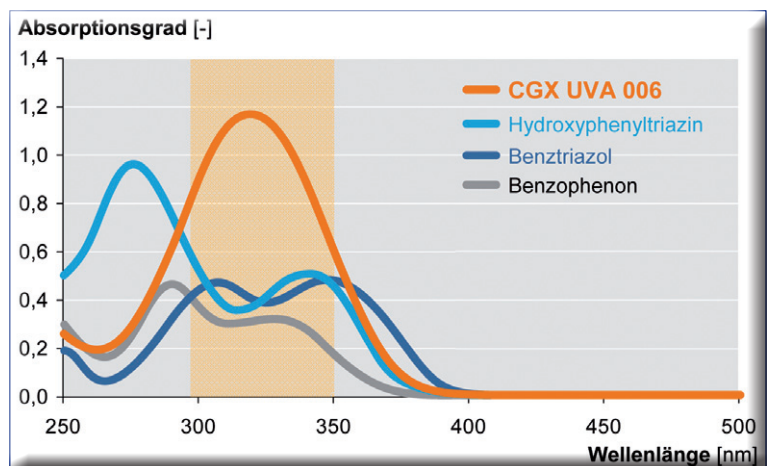


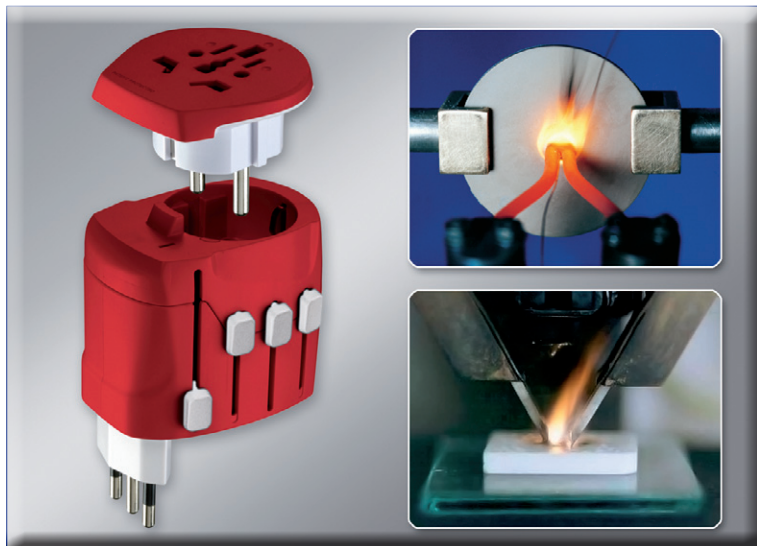
Treibhäuser aus Kunststofffolien sind kostengünstig und verbessern den landwirtschaftlichen Ertrag. Die Folien enthalten ein Additiv für UV-Schutz (Bild: gettyimages/BASF).

vermögen und -bereich sowie ihrer inhärenten Lichtstabilität (siehe Abbildung unten). Im Bereich zwischen 290 und 350 Nanometern Wellenlänge übertrifft der Absorptionsgrad von CGX UVA 006 den aller anderen heute eingesetzten UV-Absorber deutlich.

Darüber hinaus sind Triazine verglichen mit Benzotriazolen grundsätzlich sehr viel lichtstabiler. Ihr Absorptionsvermögen verringert sich im Laufe der Zeit kaum. Die Leistungsfähigkeit des neuen Absorbers beträgt für eine 20 Mikrometer dicke Gießfolie aus PMMA auch nach über 20 000 Stunden unter Xenon-Belichtung noch mehr als

Die Grafik zeigt den hohen Absorptionsgrad und die Breite der Absorption des UV-Absorbers CGX UVA 006 im Vergleich zu anderen Chromophoren (Grafik: BASF).





Kunststoffe für Elektrik- und Elektronik-Anwendungen müssen hohe Flammenschutzanforderungen erfüllen, nach Möglichkeit frei von halogenhaltigen Flammenschutzmitteln sowie von Eigenfarbanteilen sein. Neben dem UL94-Beflammungstest (kl. Bild oben rechts) müssen sie z.B. einen Glühdrahttest bestehen (kl. Bild unten rechts): Bei einem Kontakt zum 750 °C heißen Glühdraht muss die Flamme am Prüfkörper nach fünf Sekunden verlöschen. Bis vor einigen Jahren genügte es, wenn der Kunststoff nach Entzündung an einem 850 °C heißen Glühdraht innerhalb einer Minute wieder erloschen war (Abb.: BASF).

80 Prozent des Ursprungswerts. Zum Vergleich: Bei einem Benzotriazol sinkt das Absorptionsvermögen bereits nach 5000 Stunden auf unter 50 Prozent des Ursprungswertes. Der lichtstabile UV-Filter kommt besonders für Außenanwendungen im langfristigen Einsatz von bis zu 20 Jahren infrage: von PM-MA-Laminierfolien für Fenster-

weltweite Jahresverbrauch von Flammenschutzmitteln lag laut einer Studie von Ceresana Research, Konstanz, 2006 bei über 1,5 Millionen Tonnen, was einem Verkaufsvolumen von ca. 1,9 Milliarden Euro entspricht. Die jährlichen Wachstumsraten schätzt die Studie auf fünf Prozent, da u.a. der Verbrauch von Kunststoffen in den letzten Jahren stark gestiegen ist. Bisher enthielten Flammenschutzmittel für Kunststoffe häufig Halogenide. Da diese im Brandfall Dioxine bilden können sucht man nach Alternativen. Ein gutes Brandschutzmittel ist z. B. auch Roter Phosphor. Er bildet eine Schicht aus Phosphor- und Polyphosphorsäuren auf der Oberfläche und lässt diese aufquellen. Diese Schicht wirkt isolierend und schützt das Material vor Sauerstoffzutritt. Ein großer Nachteil als Kunststoff-Brandschutzadditiv ist jedoch die Eigenfarbe des Roten Phosphors, der die Gestaltungsmöglichkeiten beim Design stark einschränkt.

Hier gibt es jetzt neue Lösungen: Die BASF erweitert ihr

profile und Fensterfolien aus PET oder PVC bis hin Einkaufszentren und Fußballstadien.

## Brennstopp nach fünf Sekunden

In der Europäischen Union werden jährlich über 4000 Menschen durch Feuer getötet und 80 000 verletzt. Damit wird die signifikante Bedeutung von Flamm-

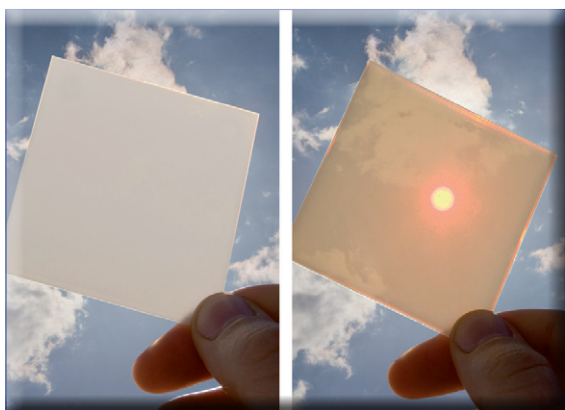
Angebot an flammgeschützten Polyamiden (PA) und Polybutylenterephthalaten (PBT) und führt das neue Produktprogramm Ultramid FFree und Ultradur FFree in den Markt ein. Die FFree-Typen kommen ohne halogenhaltige Flammenschutzmittel aus und eignen sich auf Grund ihrer hellen Eigenfarbe zur Fertigung elektrischer Bauteile in allen Farbtönen – das Kürzel FFree steht so für Flame Retardant (flammgeschützt) und Elektro/Elektronik, zugleich aber auch für Designfreiheit und für „frei von halogenhaltigen Flammenschutzmitteln“. Weitere Details ließen sich dem Segment-Leiter Elektroanwendungen der BASF Engineering Plastics Europe, Dr. Stephan Schnell, leider nicht entlocken.

Den neuen Kunststoffen werden besondere Wachstumschancen eingeräumt. Im Jahr 2009 wurden weltweit etwa 280 000 Tonnen flammgeschützter Polyamide und Polybutylenterephthalate verkauft. Der Anteil halogenfrei ausgerüsteter Werkstoffe unterscheidet sich in den beiden Fällen jedoch stark: Während schon fast die Hälfte der flammgeschützten Polyamide zu dieser Familie zu rechnen ist, zählt man bei PBT weniger als fünf Prozent dazu. Die Wachstumsraten halogenfrei flammgeschützter technischer Kunststoffe liegen mit geschätzten sechs bis zehn Prozent pro Jahr deutlich höher als die flammgeschützter Kunststoffe insgesamt. PBT dürfte am oberen Ende dieser Spanne liegen, da hier die Nachfrage nach halogenfreien Produkten besonders groß ist.

## Intrinsisch besser

Bislang wurde aufgezeigt, dass sich Kunststoffe durch Additive sowie durch computer-simulierte Verarbeitungsmethoden und Ausformungen für eine immer größere Zahl von Anwendungen optimieren lassen. Doch auch in der Grundsub-

Mit einer Modifikation der Morphologie des Polyesters PBT gelang es den Forschern, die Lasertransparenz von 30 auf etwa 60 Prozent zu steigern. Selbst beim einfachen Test im Sonnenlicht ist der Unterschied in der Lichtdurchlässigkeit zwischen konventionellem und neuem PBT bereits deutlich zu erkennen. Durch die verbesserte Lasertransparenz des Kunststoffs sind nun viel höhere Schweißgeschwindigkeiten möglich (Abb.: BASF).





stanz verschiedener Kunststoffe liegen Verbesserungspotenziale, wie die folgenden Beispiele zeigen.

So hat der Ludwigshafener Konzern jetzt ein Polybutylenterephthalat (PBT) entwickelt, das sich durch eine deutlich verbesserte Lasertransparenz auszeichnet. Polybutylenterephthalat (PBT), da ist sich die Fachwelt einig, lässt sich prinzipiell nicht gut laserschweißen. Mit einer geschickten Modifikation der Morphologie des Polyesters gelang es jetzt jedoch, seine Lasertransparenz von 30 auf etwa 60 Prozent zu steigern. Ein PBT mit einer so hohen und noch dazu so konstanten Lasertransparenz dürfte bislang einzigartig am Markt sein, so Dr. Peter Eibeck, Produktentwicklung Ultradur.

Durch die verbesserte Lasertransparenz sind nun deutlich höhere Schweißgeschwindigkeiten möglich, gleichzeitig wird das Prozessfenster erheblich breiter. War bei dem Standard-PBT mit einem 1064-Nanometer-Laser lediglich eine Schweißgeschwindigkeit von 5 bis 12 Millimetern pro Sekunde möglich, sind mit dem neuen Ultradur LUX nun Geschwindigkeiten von 10 bis 70 Millimetern pro Sekunde realisierbar.

Laserschweißen von teilkristallinen Thermoplasten ist prinzipiell schwieriger als bei amorphen Produkten, da der Laserstrahl an den Sphärolithen gestreut wird. Dieses allen teilkristallinen Kunststoffen eigene Problem ist bei PBT besonders ausgeprägt: Im Vergleich zu einer gleich dicken Polyamid 6 (PA 6)-Platte lässt PBT viel weniger Laserlicht durch, weil hier aufgrund der ausgeprägten Streueigung der rückwärts gerichtete Streuanteil höher ist. Außerdem wird der hindurchtretende Strahl stärker aufgeweitet.

Aus der Physik weiß man, dass die Ablenkung von Licht-

strahlen dann besonders gering ist, wenn die Streuzentren kleiner sind als die Wellenlänge des Lichts. Beim Nd-YAG-Laser, dem gebräuchlichsten Lasertyp, sind dies etwa 1000 Nanometer (also ein Mikrometer). Die Lösung bestand somit darin, das räumliche Wachstum der Sphärolithe auf eine maximale Größe von einem Mikrometer zu begrenzen, was nach zahlreichen Versuchen gelang.

Ein anderes Beispiel für intrinsische Verbesserung ist ein zäh-elastischer, rissbeständiger Schaumstoff, der genau wie klassisches Styropor transportiert, gelagert, verarbeitet und recycelt werden kann. Das Material zeichnet sich durch eine gute Verschweißung der Oberfläche sowie Lösemittelbeständigkeit und eine ansprechende Optik und Haptik aus. Durch die hohe Rissbeständigkeit ist es mehrfachstoß-sicher und eignet sich deshalb vor allem als Transportverpackung für hochwertige, stoßempfindliche Elektro- und Elektronik-Produkte. Der neue Kunststoff – E-por – besitzt einen sehr niedrigen Treibmittelgehalt von unter sechs Prozent, was erst Transport und Lagerung bei Raumtemperatur ermöglicht. Beim Verpackungshersteller wird er dann mit geringem Dampfbedarf geschäumt.

Möglich wurde die Entwicklung von E-por durch einen neuen Forschungsansatz: Die Forscher haben Schaumstoffe nicht länger als eine statische Mischung eines Polymers und eines Treibmittels betrachtet, wie es z.B. bei Interpolymeren der Fall ist. Sie entwickelten E-por vielmehr als komplexe Formulierung verschiedener Inhaltsstoffe, die sowohl miteinander als auch mit dem Treibmittel Pentan in Wechselwirkung treten. Dabei ist es gelungen, das Konzept der Schlagzähmodifizierung von polymeren Werkstoffen auf Partikelschaumstoffe zu über-

tragen. Diese Rezeptur wird in einem neuartigen Verfahren hergestellt. Der Kunde, der Schäumbetrieb, kann das Granulat dann mit herkömmlicher EPS-Technologie (EPS = expandierfähiges Polystyrol, Markenname Styropor) verarbeiten.

## Bioabbaubare Kunststoffe

Unter Palmen am Meer auf weißen Sandstränden – davon träumen viele, und es gibt sie auch. Nur mittlerweile fast nirgendwo zu übersehen sind Berge von Plastikmüll, wenn auch oft abgeschoben in eine von Touristen wenig einsichtige Ecke. Der durchschnittliche Abstand zwischen zwei Stücken Plastik soll in den Weltmeeren mittlerweile nur noch 80 Meter betragen. Kein Wunder, dass bioabbaubare Kunststoffe hier zum Hoffnungsträger werden.

Materialien werden als biologisch abbaubar bezeichnet, wenn sie durch Mikroorganismen, bzw. Enzyme z. B. im Boden abgebaut werden. Der Abbau erfolgt im Wesentlichen durch Oxidations- und Hydrolyseprozesse zu den Spaltprodukten Wasser, Kohlendioxid und Biomasse.

Unter diese Definition fallen neben verschiedenen Kunststoffen aus nachwachsenden Rohstoffen (Biokunststoffe) auch erdölbasierte Materialien wie Polyvinylalkohole, Polycaprolactone oder bestimmte Copolyester (z. B. Ecoflex von BASF). Nicht alle auf nachwachsenden Rohstoffen basierenden Biokunststoffe sind auch biologisch abbaubar (z. B. vulkanisierter Kautschuk).

Der Leiter der Forschung Biopolymere der BASF, Prof. Dr. Andreas Künkel, machte allerdings deutlich: Biologisch abbaubare Kunststoffe lösen Umweltprobleme nicht automatisch, nur weil sie sich kompostieren lassen. Ihr Einsatz ist nur sinnvoll, wenn sie bei gleicher Leistung nachhaltiger sind als nicht abbaubare Werkstoffe

– oder wenn sie sogar eine bessere Leistung bieten. Die biologische Abbaubarkeit soll einen Mehrwert schaffen – etwa, indem sie es erlaubt, organische Abfälle einer Kompostierung zuzuführen, anstatt sie zu verbrennen. Denn organische Abfälle bestehen zu einem erheblichen Anteil aus Wasser, was die thermische Verwertung sehr ineffizient macht. Wird die Folie dagegen mit dem Inhalt kompostiert, kann sich das sehr vorteilhaft auf die Umwelt auswirken.

Ausführliche Lebenszyklus-Analysen wie die von der BASF entwickelte Ökoeffizienz-Analyse helfen bereits seit vielen Jahren, sauber zwischen verschiedenen Produkt- und Verfahrensalternativen abzuwägen. Dazu berücksichtigen und bewerten sie den Ressourcenverbrauch, Umwelteinfluss und wirtschaftliche Effekte bei der Herstellung, in der Nutzungs- und End-of-life-Phase eines Werkstoffs in einer gegebenen Anwendung vollständig und quantitativ. Das macht diese Studien komplex: Eine umfassende Ökoeffizienz-Analyse kann nur von Life Cycle-Analysen-Experten durchgeführt werden und dauert einige Monate.

Hier setzt der neue Ecovio Eco-Efficiency Compass an. Der Anwender dieses Instruments kann über eine webbasierte Benutzeroberfläche mit Eingabemaske eine Vielzahl von Parametern mit einander kombinieren, die für das ökologische Profil seines geplanten Produkts, wie zum Beispiel eine Tragetasche, von Bedeutung sind. Dazu gehört neben der Wahl des Verpackungswerkstoffs – bei Bedarf bis auf die Monomer-Ebene hinab – auch das Beutelgewicht und die Art der Entsorgungstechnologie. So wird der gesamte Lebenszyklus des Produkts von der Rohstoffauswahl bis zur Entsorgung abgebildet. Für die Berechnung greift die Software auf eine

Reihe von Ökoeffizienz-Analysen und Steuerungsparameter hinsichtlich Materialien, Anwendungen und Entsorgungsszenarien zurück.

Wie der Name des Web-Öko-instruments schon andeutet handelt es sich dabei nicht um ein Allround-Talent: Zurzeit ist der neue Ecovio Eco-Efficiency Compass noch auf die Einschätzung der Ökoeffizienz von Tragetaschen und Schaumstoff-Schalen zugeschnitten – und natürlich den Ecovio-Kunststoff.

### Ecoflex mit Polymilchsäure

Unter dem Handelsnamen Ecoflex vermarktet die BASF seit 1998 biologisch abbaubare, aliphatisch-aromatische Copolyester. Im Unterschied zu „oxo-abbaubaren“ Kunststoffen benötigt Ecoflex keine Additive für den Abbau: sie sind frei von Schwermetallverbindungen und hinterlassen keine toxischen Rückstände. „Oxo-abbaubare“ Additive bestehen meist aus Metallionen (Kobalt, Mangan, Eisen, Zink) welche die Oxidation und den Kettenabbau in Kunststoffen, besonders unter Wärme, Luft und Sauerstoff beschleunigen. Ergebnisse dieses Kettenabbaus sind sehr kleine, kaum sichtbare Kettenfragmente, welche nicht biologisch abbauen, allerdings durch unsere Nahrungskette wandern.

Auch Ecovio wird wie Ecoflex von Mikroorganismen und deren Enzymen abgebaut, kein Wunder: Ecovio besteht aus Ecoflex, das alle Registrierungen für Kompostierbarkeit besitzt, und aus Polymilchsäure, hergestellt aus dem jährlich nachwachsenden Rohstoff Mais, der ebenfalls biologisch abbaubar ist (siehe dazu auch den Jugend forscht-Artikel von Kevin Siffert ab Seite 322 in dieser CLB). Ecovio-Kunststoffe können 45 Prozent Polymilchsäure enthalten.

Der neue Ecovio Eco-Efficiency Compass soll demnächst zusätzlich zu seinem Einsatz für

Tragetaschen und Schaumstoffschalen für weitere Produkte mit diesem Kunststoff verwendbar sein. Laut Künkel würden auch wichtige Entwicklungen auf dem Markt zeitnah eingearbeitet. Hier sei zum Beispiel Polyethylen aus „Bio-Ethanol“ zu nennen. Momentan implementierten die Fachleute Modelle für Papierbeschichtungen sowie für Schrumpffolien.

### 20 bis 30 Prozent Wachstum

Den Markt für bioabbaubare Kunststoffe bezifferte Künkel mit 70 000 Tonnen pro Jahr heute – nicht viel angesichts des gesamten Kunststoffmarktes, aber bemerkenswert trotzdem: Solche Kunststoffe gibt es ja erst seit etwa zehn Jahren. Die Wachstumsraten wären zudem mit 20 bis 30 Prozent rasant, sodass 2015 der Markt schon auf 400 000 Tonnen wachsen würde. Die Zukunft gehöre dabei wohl den zellulosebasierten Produkten. Bei ihnen werden weder Öl noch Rohstoffe aus Nahrungsmitteln eingesetzt, sondern pflanzliche Abfallstoffe. Die Arbeiten dazu befinden sich jedoch noch in Entwicklungen. Künkel rechnet mit einem kommerziellen Einsatz in fünf bis zehn Jahren. *RK*

Sieht den Markt für bioabbaubare Kunststoffe rasant wachsen: Forschungsleiter Biopolymere Prof. Andreas Künkel (Foto: RK).



## Plastisch verformbar

### Neue Eigenschaften für metallische Gläser

**Wie andere Gläser sind auch die metallischen Gläser spröde Materialien, was ihre technische Anwendung stark einschränkt. IFW-Forscher haben nun einen Mechanismus gefunden, wie metallische Gläser unter Zugbelastung plastisch verformbar werden.**

Metallische Gläser sind Legierungen, die nicht aus regelmäßig geordneten Kristallen bestehen, sondern wie Gläser oder Flüssigkeiten eine regellose Atomstruktur haben. Diese für Metalle sehr ungewöhnliche Atomanordnung hat eine einzigartige Kombination physikalischer Eigenschaften zur Folge. Metallische Gläser sind im Allgemeinen härter, korrosionsbeständiger und fester als gewöhnliche Metalle. Die für die meisten Metalle charakteristische plastische Verformbarkeit, die eine Voraussetzung für das Schmieden und Walzen ist, fehlt den metallischen Gläsern jedoch. Sie sind spröde und brechen wie Fensterglas. Dies schränkt mögliche Anwendungen dieser neuen Materialklasse natürlich deutlich ein.

Forscher des Leibniz-Instituts für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden haben nun einen Mechanismus der Verformung aufgedeckt, der die Sprödigkeit auf Zug belasteter metallischer Gläser mildert und sie plastisch verformbar macht. Hierzu haben sie Kupfer-Zirkon-Legierungen untersucht, die sich sowohl als kristalline Legierungen und als metallische Gläser herstellen lassen. In ihrem kristallinen Zustand haben diese Legierungen ein Formgedächtnis. Das heißt, dass sie sich an eine frühere Formgebung trotz nachfol-

gender Verformung scheinbar „erinnern“ und die ursprüngliche Form wieder annehmen.

Diese Eigenschaft scheint auch Auswirkungen auf die Verformbarkeit im Glas-Zustand zu haben. Bei mechanischer Belastung scheiden sich in dem Glas Nanometer große Formgedächtniskristalle aus, die ihrerseits eine ausgeprägte Neigung zur Bildung von Verformungszwillingen haben. Die chemische Zusammensetzung der Nanokristalle unterscheidet sich nicht von der des Glases. Damit sind nur geringfügige atomare Umordnungen nötig, um das Glas zu kristallisieren.

Die Zwillingsbildung wiederum ist Ausdruck des Formgedächtniseffekts, der auf kleinen Längenskalen bevorzugt über eine Scherverformung erfolgt. Beide Prozesse, die Bildung von Nanokristallen und die Bildung von Zwillingen, benötigen Energie, die aus der aufgewandten Verformungsenergie gewonnen wird. Damit kann das Entstehen von Mikrorissen verzögert werden, die das spröde Versagen des Materials bewirken. Als Resultat ergibt sich eine makroskopisch messbare plastische Dehnung bei gleichzeitiger Verfestigung des Materials.

Eine Phasenumwandlung unter mechanischer Belastung wurde auch im Falle bestimmter Keramiken genutzt, um die plastische Verformbarkeit dieser ebenfalls sehr spröden Materialklasse zu erhöhen. Obwohl die Struktur als auch die Art der atomaren Bindungen von metallischen Gläsern und Keramiken sehr unterschiedlich ist, lässt sich dieser Ansatz scheinbar universell nutzen.



Metallisches Glas nach einem Zugversuch (Foto: IFW Dresden).

### Proteine, Gene und Hormone

- Eine internationale Forschergruppe mit Beteiligung der Universität Göttingen hat zum ersten Mal das **Genom eines essbaren Hutpilzes entschlüsselt**. Der Wollstielige Mist-Tintling (*Coprinopsis cinerea*), auch Struppiger Tintling genannt, wächst in der Natur bevorzugt auf Pferdemit und Agrarabfällen. Im Mittelalter nutzte man seine Sporen als Tinte, heute wird er beispielsweise in Thailand als Delikatesse gezüchtet.

- **Biliproteine** werden in den Biowissenschaften bei bildgebenden Verfahren als Hilfsmittel eingesetzt, um definierte Strukturen und Prozesse sichtbar zu machen. Allerdings konnten die farbigen Bausteine in lebenden Organismen bisher nur relativ aufwändig in mehreren Schritten hergestellt werden. In Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern um Professor Kai-Hong Zhao an der Huazhong-Universität im chinesischen Wuhan hat ein Team um den LMU-Biologen Professor Hugo Scheer nun ein neues Verfahren entwickelt, mit dem die farbigen Proteine direkt in einem Schritt synthetisiert werden. Damit können Biliproteine nun genauso flexibel eingesetzt werden wie die fluoreszierenden Proteine vom GFP-Typ. Zusätzlich haben sie den entscheidenden Vorteil, dass man sie zwischen zwei verschiedenen Zuständen hin- und herschalten kann.

- Natürliche Organismen können nur 20 Aminosäuren zum Aufbau ihrer Eiweißmoleküle verwenden, weil der genetische Code auf diese beschränkt ist. Jetzt ist es einem Team um Prof. Dr. Nediljko Budisa (TU Berlin) gelungen, **ein Protein gleichzeitig mit drei verschiedenen künstlichen Aminosäuren** auszustatten. So wurde mit einer Aminosäure ein fluoreszierender Chromophor mit blauer Fluoreszenz eingeführt, und eine weitere eingebaute Aminosäure sorgt für eine verbesserte Stabilität. Die dritte synthetische Aminosäure stattet das Protein mit einer Gruppe aus, die eine weitere Konjugation des Proteins mit Zucker- und Polyethylenglykol-Molekülen ermöglicht.

- Ein Wirkstoff aus Pilzen und niederen Tieren eignet sich eventuell als schlagkräftige **Waffe gegen resistente Bakterien**. Die Rede ist vom Plectasin, einem kleinen Eiweißmolekül, das selbst hochresistente Keime zerstören kann. Forscher der Universität Bonn haben zusammen mit dänischen und holländischen Kollegen aufgeklärt, wie die Substanz das macht. Demnach stört Plectasin die Bildung der Bakterienzellwand, so dass sich die Erreger nicht mehr teilen können. Es heftet sich an den Zellwand-Bestandteil Lipid II und verhindert so, dass dieser eingebaut wird.

- Neue Einblicke in das **Krankheitsbild „Chronische Schmerzen“** und damit innovative Ansätze für eine Therapie haben Wissenschaftler der Technischen Hochschule Wildau und ihre Kooperationspartner von der Mayo Klinik in den USA gewonnen. Danach werden chronische Schmerzen offenbar durch eine nachweisbare Umprogrammierung von über 2000 Genen im peripheren Nervensystem verursacht. Die Forscher hoffen, mit diesen Erkenntnissen eines Tages zu einer medikamentösen Therapie zu gelangen, in sich die Schmerzen durch gezielte Korrektur der Aktivität spezifischer Gene bekämpfen lassen.

## Riesiges Atmungsprotein durchleuchtet

### Mit Sequenzanalyse, 3D-Elektronenmikroskopie und Röntgenstrukturanalyse

**V**or der Küste Kaliforniens lebt die Schlüsselbohrschnecke *Megathura crenulata*. Ihren Namen hat die Meeresschnecke von einer großen Atemöffnung im Zentrum der Rückenschale, ihre Besonderheit verdankt sie jedoch einem speziellen Atmungsprotein, für das sich Biologen, Mediziner und Pharmazeuten interessieren. Dieses Sauerstofftransportprotein der Schnecke gehört nämlich zu den größten Proteinen überhaupt. Beim Menschen ruft es starke Immunreaktionen hervor. Deshalb wird es von Immunologen und Klinikern als Immunstimulator eingesetzt, z.B. bei der Immuntherapie von Tumoren. Zwei Abteilungen am Fachbereich Biologie der Johannes Gutenberg-Universität Mainz haben die molekulare Struktur dieses Proteins, das die Bezeichnung „Keyhole Limpet Häemocyanin“ (KLH) trägt, nun vollständig entschlüsselt. Zum Einsatz kamen dabei Sequenzanalyse, 3D-Elektronenmikroskopie und Röntgenkristallographie.

Häemocyanine sind blaue Blutproteine, die bei Schnecken, Tintenfischen, Spinnen und Krebsen den Transport von Sauerstoff im Körper bewältigen. Bei diesen blauen Blutfarbstoffen bindet Kupfer den Sauerstoff anstelle von Eisen wie beim Hämoglobin in unseren roten Blutkörperchen. Im Elektronenmikroskop erscheint das KLH-Molekül als Hohlzylinder mit einem Kragen an beiden Enden. Es hat einen Durchmesser von 35 Millionstel Millimeter. Das ist zwar unglaublich winzig, für ein Protein aber ganz außergewöhnlich groß.

Forscher hatten bereits die komplette Aminosäuresequenz des KLH ermittelt und herausgefunden, dass es aus acht verschiedenen Proteinbausteinen besteht, die sich in dem Riesenmolekül 20 Mal wiederholen. Erst an der räumlichen Struktur jedoch lässt sich erkennen, wie die einzelnen Bausteine des Riesenproteins zueinander stehen, wie der Mechanismus zur Aufnahme und Abgabe von Sauerstoff genau funktioniert und wie seine immunologischen Eigenschaften zustande kommen.

Von den acht Bausteinen des KLH sind sich sieben recht ähnlich. Sie bestehen jeweils aus etwa 420 Aminosäuren und ihre molekulare Struktur war bereits gut bekannt. Mit der 3D-Elektronenmikroskopie erstellte man nun aus tausenden elektronenmikroskopischer Bilder ein Computermodell des KLH. Dieses war detailliert genug, um wie in einem dreidimensionalen Puzzle die sieben bekannten Bausteine des KLH einpassen zu können – jeden Baustein 20 Mal. Damit war das gesamte KLH-Molekül aufgeklärt, außer dem Kragen, der den Zylinder auf beiden Seiten abschließt. Jeder Kragen wird aus zehn Kopien des achten Bausteins gebildet.

Der achte Baustein besitzt 100 Aminosäuren mehr, also insgesamt 520, und war in seiner Struktur noch ein völliges Rätsel. Nur die Röntgenstrukturanalyse konnte in diesem Fall eine atomare Auflösung liefern. Diese Technik in Kombination mit der 3D-Elektronenmikroskopie hatte auch zur Aufklärung der Ribosomen-Struktur geführt, wofür ihre Entdecker 2009 den Chemie-Nobelpreis erhielten.

Ein Protein ist nicht ohne weiteres unter der Röntgenapparatur zu sehen, sondern

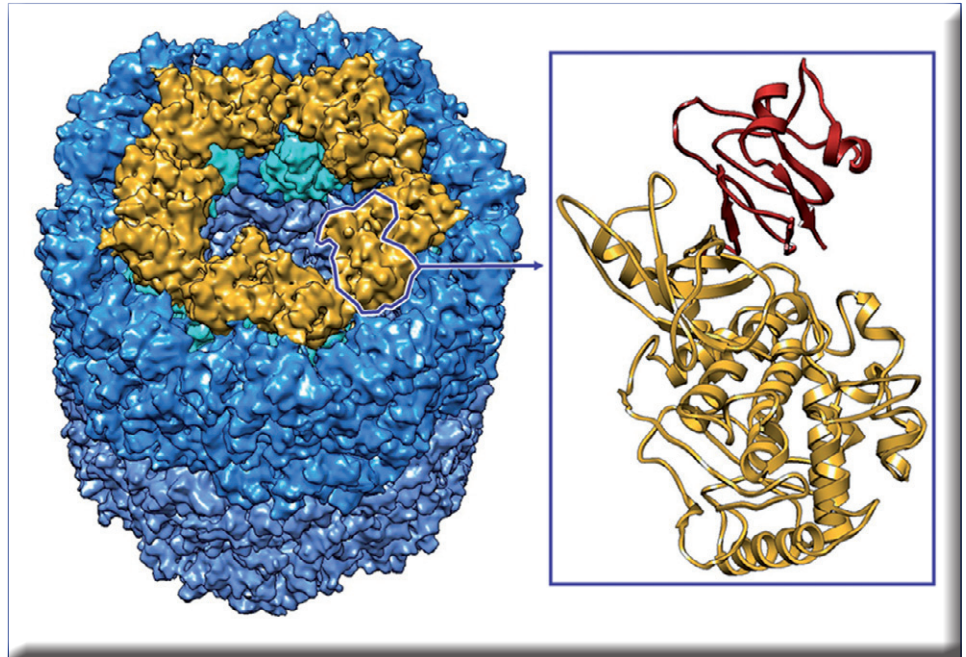
muss zuerst in sehr langwieriger Laborarbeit zu einem Kristall gezogen werden – eine feste Gitterstruktur, die ein Proteinmolekül natürlicherweise nie einnehmen würde. Der Prozess, bei dem die Proteine in einer Salzlösung ganz allmählich ausgefällt wurden, dauerte mehrere Wochen. Die richtigen Bedingungen beim Kragenbaustein herauszufinden, hat sogar Monate gebraucht. Zuvor musste der Kragenbaustein in großen Mengen von den anderen sieben Bausteinen abgetrennt werden. Das war biochemische Schwerarbeit.

Nach der erfolgreichen Kristallisation wurde die räumliche Struktur des KLH-Kragenbausteins mit Röntgenstrahlen aufgeklärt. Zum Vorschein kam ein Gebilde, das in seinem Vorderteil den übrigen sieben Bausteinen gleicht, aber am Hinterende ein weiteres Teil besitzt; in diesem stecken die zusätzlichen 100 Aminosäuren. Die Struktur dieses Zusatzteils stimmt auf erstaunliche Weise mit Proteinen aus der Cupredoxin-Familie überein. Allerdings fehlt deren übliches Kupferatom im Zentrum. Eine Recherche in den Protein-Datenbanken ergab, dass auch im Häemocyanin von Gliederfüßern wie Krebsen und Spinnen ein Bereich Cupredoxin-ähnlich ist, was bisher übersehen worden war.

Die Häemocyanine von Gliederfüßern und Weichtieren sind ganz unterschiedlich aufgebaut. Trotzdem gehen die Wissenschaftler nun davon aus, dass die Evolution beider Häemocyanin-Familien ähnlich verlief. In beiden Fällen waren die Cupredoxin-ähnlichen Domänen ursprünglich wahrscheinlich wichtig für den Erhalt des Kupferzentrums. Vielleicht haben sie früher dazu beige-

tragen, die Kupferionen in das Hämocyanin einzubauen und so die Sauerstoffversorgung zu verbessern, so ihre Vermutung. Heute allerdings haben die Cupredoxin-ähnlichen Domänen offensichtlich vor allem die Aufgabe, die Struktur der riesigen Hämocyanin-Moleküle zu stabilisieren. Nach Einpassen des Kragenbausteins in das KLH-Modell wurde nämlich deutlich, dass der Kragen nur über den Cupredoxin-ähnlichen Zusatz zusammenhält.

Die Kombination aus Sequenzanalyse, 3D-Elektronenmikroskopie und Röntgenstrukturanalyse hat es ermöglicht, das riesige, aus rund einer Million Atomen bzw. 68 000 Aminosäuren bestehende KLH bis in die molekularen Details aufzuklären. Das nächste gemeinsame Ziel ist nun, auf der Basis dieses Strukturmodells den Informationsaustausch zwischen den verschiedenen Bausteinen bei der kooperativen Sauerstoffbindung genau zu beschreiben. Bis heute ist zum Beispiel unklar, woher die verschiedenen aktiven Zentren „erfahren“, dass an einer Stelle



Die 3D-Elektronenmikroskopie erstellte das Modell des KLH1-Moleküls (links), die Röntgenstrukturanalyse lieferte die Feinstruktur des Kragenbausteins (Kasten). Die Cupredoxin-ähnliche Domäne ist hier rot dargestellt (Abb.: Institut für Molekulare Biophysik/Institut für Zoologie, Uni Mainz).

ihres Moleküls Sauerstoff gebunden wurde. Nur: alle reagieren darauf und binden nun ihrerseits die Sauerstoffmoleküle besser.

**Literatur**

Gatsogiannis C & Markl J (2009) "Keyhole limpet hemocyanin (KLH).

9-Å cryoEM structure and molecular model of the dodecamer reveal the interfaces and intricate topology of the 160 functional units. J. Mol. Biol. 385, 963-983

Jaenicke E, Büchler K, Markl J, Decker H & Barends T (2010). The Cupredoxin-like domains in haemocyanins. Biochem. J. 426, 373-378

## „Insulin“ vom Gemüsebeet Bittergurke senkt den Blutzuckerspiegel

**Bittergurke senkt den Blutzuckerspiegel und wirkt gewichtsreduzierend.**

Das ergaben Forschungsarbeiten, die von Wissenschaftlern der Universität Gießen und des Internationalen Gemüseforschungszentrums AVRDC in Taiwan gemeinsam durchgeführt wurden. Die in der Bittergurke enthaltenen Saponine wirkten vor allem gewichtssenkend, die Lipide senkten den Blutzuckerspiegel, und zwar bei Diabeteskranken Mäusen im Schnitt um 15 Prozent. In einem nächsten Schritt sollen sämtliche Bittergurkensorten, die in der Genbank des AVRDC lagern, auf ihre „Diabetes-

wirksamkeit“ getestet werden. Mit neuen Anbaumethoden will man das natürliche „Antidiabetopotenzial“ des Gemüses steigern.

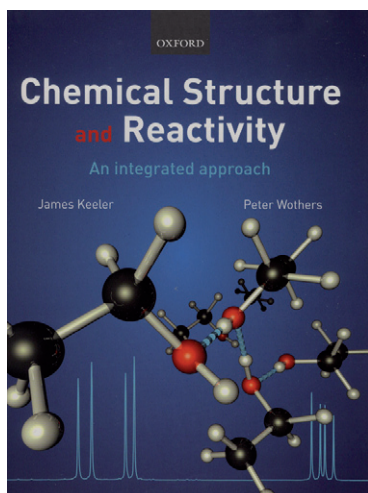
Insgesamt hat das AVRDC in seiner Genbank etwa hundert verschiedene Bittergurkensorten, die jetzt in einem zweiten Schritt auf ihre „Diabeteswirksamkeit“ untersucht werden sollen. Gleichzeitig wollen die Forscher auch herausfinden, mit welchen Anbautechniken die Wirkung am besten unterstützt werden kann, um so das natürliche Potenzial der infrage kommenden Sorten zu steigern und ein echtes diätetisches Lebensmittel auf den Feldern der Bauern wachsen zu lassen.

**Krankheiten:**

**Mechanismen und Möglichkeiten**

- Wissenschaftler des Universitätsklinikums Jena arbeiten an der Entwicklung eines molekularbiologischen Tests, der **Vorstufen von Gebärmutterhalskrebs** erkennen kann. In Verbindung mit dem DNA-Test auf die krebsauslösenden Papilloma-Viren erreicht das Verfahren eine 90 %ige Trefferquote.
- Der Nephrologie am Universitätsklinikum Freiburg ist ein erster Durchbruch bei der **Behandlung von Zysten** gelungen. In einer großen Studie konnte gezeigt werden, dass man mit dem Medikament Everolimus, welches sonst in der Nierentransplantation eingesetzt wird, das Wachstum von Nierenzysten verzögern kann.
- Das neue Krebsmedikament Sorafenib weckt Hoffnungen. Sorafenib wird bei fortgeschrittenem Leber- und Nierenkrebs eingesetzt und scheint auch gegen Krebsstammzellen bei **Bauchspeicheldrüsenkrebs** wirksam zu sein. Es zeigt sich besonders effektiv in Kombination mit Sulforaphan, einem pflanzlichen Inhaltsstoff des Brokkolis.

## Orbitale als „Schlüssel“ zum Verständnis von Chemischer Struktur und Reaktivität



James Keeler, Peter Wothers: *Chemical Structure and Reactivity: An Integrated Approach*; 944 Seiten; Verlag Oxford University Press, 2008; ISBN 978-0-19-928930-1 39,99 GBP.

Mit dieser Neuerscheinung verwirklichten die Autoren ihre Absicht, ein Lehrbuch für das Grundstudium (undergraduate) der Chemie in *einem* Band vorzulegen, in dem die Grundlagen der Anorganischen, Organischen und Physikalischen Chemie *gemeinsam* dargestellt sind. Jeder der beiden Teile des Lehrbuches besteht aus

10 Kapiteln:

Part I Die Grundlage (The fundamentals); Part II Darauf aufbauende Lehrinhalte (Going further). Die vereinheitlichende rationale Betrachtungsweise von Struktur und Reaktivität erfolgt insbesondere in den Kapiteln:

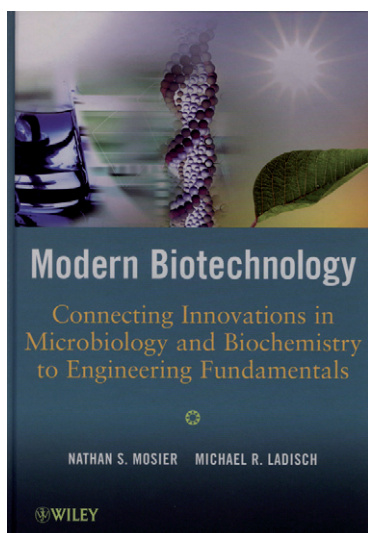
Molekulare Strukturen und Aggregatzustände der Materie (1), Elektronen in Atomen (2), Elektronen in zweiatomigen (3) und mehratomigen (4) Molekülen sowie Bindungen in Festkörpern (5), gefolgt von Ausführungen zu „Trends in bonding (7) und der Beschreibung

von Reaktionen auf der Grundlage von Orbitalen (8). Thermodynamische Gesetzmäßigkeiten werden in Kap. 6 und vertiefend in Kap. 17 sowie in Kap. 19 (Elektrochemie) behandelt.

Lehrinhalte aus der Organischen Chemie sind den Kapiteln Funktionelle Gruppen (9), Dreidimensionaler Aufbau (12) und Reaktionen von Verbindungen mit pi-Elektronensystemen (13) zugeordnet. Die Geschwindigkeit chemischer Reaktionen und Chemische Kinetik bilden die Lehrinhalte der Kapitel 10 und 18. Breiten Raum nehmen die Kapitel Spektroskopie (11) sowie Quantenmechanik, Energie-Niveaus und Spektroskopie (16) ein. Die Chemie der Hauptgruppen-Elemente wird in Kap. 14, die der Übergangsmetalle in Kap. 15 dargestellt. Das letzte Kapitel (20) enthält Angaben zu Dimensionen, Einheiten und mathematischen Grundlagen. Sämtliche Kapitel werden durch insgesamt 293, oft mehrteilige Fragen zur Kontrolle der Lernziele vervollständigt. Zudem enthalten 16 Kapitel „Weblink boxes“, die unter [www.oxfordtextbooks.co.uk/orc/keeler](http://www.oxfordtextbooks.co.uk/orc/keeler) zusätzliche Lehrinhalte erschließen.

Wünschenswert wäre ein ausführliches Sachverzeichnis anstelle des vorliegenden Index (nur 7 1/2 Seiten). Insgesamt liegt hiermit ein neues, mit vielen farbigen Abbildungen ausgestattetes, empfehlenswertes Lehrbuch der Chemie vor. *Dr. Dieter Holzner*

## Biotechnologie unter Einbeziehung verfahrenstechnisch geprägter Fachgebiete



Nathan S. Mosier, Michael R. Ladisch: *Modern Biotechnology: Connecting Innovations in Microbiology and Biochemistry to Engineering Fundamentals*; 464 Seiten; Verlag John Wiley & Sons, 2009; ISBN 978-0-470-11485-8; 84,90 Euro.

Diese Neuerscheinung will eine Brücke zwischen den Grundlagenfächern der zeitgemäßen Biotechnologie und der für die vielfältigen Anwendungen unerlässlichen Verfahrenstechnik (bioprocess engineering) schlagen. Teils Lehrbuch (mit insgesamt 80 „Homework Problems“ nach jedem der 14 Kapitel), teils Monographie (mit 565

Literaturhinweisen) richtet sich das Werk auch an Studenten der Agrikultur-Wissenschaften und der Bioverfahrenstechnik. Ergänzt durch eine chronologisch angeordnete Übersicht (5-seitige Tabelle) über die wichtigsten Entwicklungen bis 1998 belegt Kap.1 die umfassende Bedeutung der Biotechnologie. Auf der Grundlage der Rekombinanten DNA-Technologie gibt Kap.2 eine Einführung in die „Neue Biotechnologie“. Kap.3 beschreibt die Gewinnung industrieller Enzyme (wie Glucose-Isomerase) und deren Verwendung in

großtechnischen Verfahren zur Produktion von Glucose-Fructose-Sirup und von Biokraftstoffen.

Die folgenden Kapitel Mikrobielle Fermentationen (4; mit einer umfangreichen Tabelle über die in industriell durchgeführten Verfahren eingesetzten Prokaryoten und Eukaryoten), Modellierung und Simulation (5) sowie Bioreaktoren für Aerobe Verfahren beinhalten auch eingehende Beschreibungen der mathematischen und verfahrenstechnischen Grundlagen biotechnologischer Prozesse. Es folgen umfangreiche Kapitel über Enzyme (7; mit vielen Daten in einer 6-seitigen Tabelle), Enzym-Kinetik (8; mit zahlreichen mathematischen Ableitungen), Stoffwechsel-Reaktionen (9), Bioenergetik (10) und Stoffwechsel-Wege (11). Der folgende Teil umfasst die Bereiche Genetic Engineering (12), Metabolic Engineering (13) sowie Genome und Genomics (14).

Während der Einband und die Qualität des Textdrucks hochwertig sind, trifft dies auf eine Anzahl von dunkelgrau unterlegten Abbildungen nicht zu, die somit nur sehr eingeschränkt lesbar sind (wie Fig. 2.1/4.2/9.20/11.9.2 und 14.1).

Bei einer Neuauflage dieses interdisziplinär ausgerichteten Buches lassen sich solche Mängel, wie auch die fehlerhafte Wiedergabe einiger Strukturformeln (Biotin, Fig. 11.11/Streptomycin, Fig. 11.16) vermeiden. *Dr. Dieter Holzner*

## Grundlagen und Bedeutung der Glycowissenschaften

Hans-Joachim Gabius (Herausgeber): *The Sugar Code--Fundamentals of Glycosciences*; 569 Seiten; Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2009; ISBN 978-3-527-32089-9; 59,90 Euro.

Im Rahmen einer internationalen Zusammenarbeit mit 51 Wissenschaftlern legt Prof. Gabius hiermit eine umfassende Monographie über die Grundlagen der Glycowissenschaften vor. Das Werk umfasst fünf Teile in 30 Kapiteln, deren Texte durch zusätzliche Informationen (Info Box), Zusammenfassungen (Summary Box) und insgesamt 569 Literaturangaben ergänzt werden. Hervorzuheben sind noch das Glossar (32 Seiten) und einige besonders inhaltsreiche Tabellen, wie in Kap.7 (O-Glycosylierung: Strukturelle Diversität und Funktionen), Kap.15 (zur Geschichte der Lectinologie), Kap.17 und 18 (bakterielle und virale Lectine/ Pflanzenlectine). Leider enthält das Werk keine Abbildungen in Farbe: ein Sachverhalt, der die „Aussagekraft“ zahlreicher Abbildungen erheblich beeinträchtigt.

I Chemical Basis (5 Kapitel): Außer den strukturellen und stereochemischen Gegebenheiten als Grundlage für die einzigartige Vielfalt an Glycosylierungsmustern werden hier Verfahren zur Synthese von Glycosiden und Methoden zur Analyse von proteingebundenen Glycanen beschrieben.

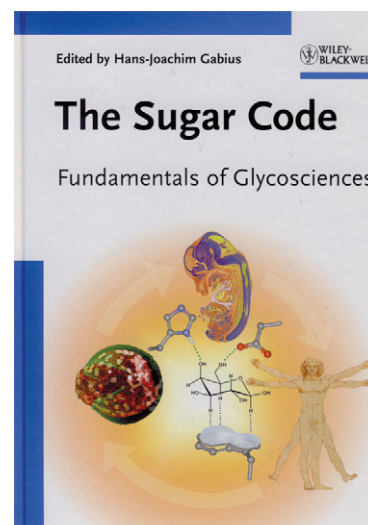
II In der Natur erfolgende N- und O-Glycosylierungen zu Glycoproteinen (4 Kapitel).

III In der Natur erfolgende Glycosylierungen zu Glycolipiden, Proteoglycanen und Chitin (3 Kapitel).

IV Protein-Kohlenhydrat-Wechselwirkungen (9 Kapitel auf 132 Seiten): wie Methoden zur Analyse solcher Wechselwirkungen; die Bestimmung der Spezifität (Glycan-Mapping und Arrays); die Vielfalt an Lectinen, ebenso wie Wege der Evolution von Lectinen.

V Biomedizinische Aspekte und Fallstudien (9 Kapitel auf 154 Seiten): wie durch fehlerhafte Glycosylierung bedingte Erkrankungen, Tiermodelle zur Ermittlung der Funktionalität von Glycanen, Glycobiologie mit der Erkenntnis, dass Zellen in äußerst variationsfähige Oligosaccharid-Ketten aufweisenden Glykokonjugaten überlebenswichtige Informationen codieren, Verbindungen mit Kohlenhydrat-Strukturen als therapeutische Wirkstoffe, Plättchen-Glycoproteine in der Hämatologie und schließlich Aspekte für die Neurobiologie.

Aufgrund der Vielfalt an Lehrinhalten, ihrer Bedeutung und Aktualität gehört dieses Buch in die Bibliotheken aller in dem interdisziplinären Bereich der Glycowissenschaften tätigen Arbeitsgruppen. *Dr. Dieter Holzner*



## Entwurf und Wirkung von Arzneistoffen

Gerhard Klebe: *Wirkstoffdesign*; 634 Seiten sowie DVD mit interaktiven Molekül-Modellen; Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2. Auflage 2009; ISBN 978-3-8274-2046-6; 89,95 Euro.

Die vollständig überarbeitete und erweiterte Neuauflage unterscheidet sich von „klassischen“ Lehrbüchern der Pharmazeutischen Chemie dahingehend, daß Arzneimittel-Wirkstoffe nicht nach Indikationsgebieten angeordnet sind, sondern daß alle Bereiche aktueller Arzneimittelforschung dargestellt sind mit der Zielsetzung, zu neuartigen Wirkstoffen zu gelangen. Dieses computergestützte Design erstreckt sich von der Suche nach neuen Leitstrukturen und Zielproteinen, der Bestimmung ihres räumlichen Aufbaus und der zwischen den beteiligten Molekülen auftretenden Wechselwirkungen bis hin zur Aufklärung der Wirkmechanismen. Dieses Lehrbuch besteht aus einer Einführung und fünf Teilen; mit Literaturangaben nach jedem Kapitel:

I Grundlagen der Arzneimittelforschung (5 Kapitel; einschl. Protein-Ligand-Wechselwirkungen).

II Die Suche nach der Leitstruktur (5 Kapitel; neue Screening-Technologien und Optimierung von Leitstrukturen)

III Experimentelle und theoretische Methoden (6 Kapitel; wie Kombinatorische Chemie und Molecular Modelling; ferner Gentechnologie als Schlüsseltechnologie für das Wirkstoffdesign unter Einbeziehung von Erkenntnissen aus der Sequenzierung zahlreicher Genome sowie

aus der Proteomics- und Metabolomics-Forschung, wie auch bei der Herstellung von Zielproteinen durch gentechnische Verfahren)

IV Quantitative Struktur-Wirkungsbeziehungen (QSAR) und Design-Methoden (5 Kapitel; einschl. Optimierung von ADME-Tox-Eigenschaften: Aufnahme/Verteilung/Metabolismus/Ausscheidung; ferner Protein-Modellierung)

V Erfolge beim rationalen Design von Wirkstoffen (11 Kapitel auf 270 Seiten; wie Inhibitoren von hydrolytisch spaltenden Metalloenzymen, ferner besonders umfangreiche Kapitel über Hemmstoffe für Transferasen und Hemmstoffe für Oxidoreduktasen und das abschließende Kapitel Biopharmaka: Peptide, Proteine, Nucleotide und Makrolide als Wirkstoffe). Dem Teil V liegt eine Einteilung nach Familien von Zielproteinen, wie Enzyme, Rezeptoren, Kanäle, Transporter und Oberflächenproteine, zugrunde.

Dieses mit 400 Abbildungen in Farbe und der DVD zur 3D-Visualisierung ausgestattete Lehrbuch richtet sich an Studenten der Pharmazie, Chemie und Biowissenschaften sowie an in dem Bereich Wirkstoffdesign tätige Mitarbeiter in der pharmazeutischen Industrie und kann diesen Zielgruppen nachhaltig empfohlen werden. *Dr. Dieter Holzner*



## 16-fach höhere Konzentration an Chaperonen angezüchtet

**Zu CLB 01-02/2010, 58-63:  
Proteinfaltung mit Escortservice – Chaperone zur Beschleunigung der Proteinfaltung**

Dem Team um Jeannette Winter, Biochemikerin und Leiterin der Emmy-Noether-Gruppe „Oxidative Stress“ im Department Chemie der TU München, gelang es nun, E. coli-Bakterien durch Evolution über mehrere Jahre hinweg stufenweise eine sehr viel höhere Hitzeresistenz anzuzüchten. Ihre Bakterien wachsen mittlerweile bei Temperaturen von 48,5 Grad Celsius. Hier scheint aber für den Organismus E. coli eine natürliche Grenze zu existieren. Höhere Wachstumstemperaturen erreichten die Forscher nicht.

Im Vergleich zu einer bei 37 Grad Celsius aus den gleichen Vorfahren gezüchteten Kontrollpopulation enthielten die hitzeresistenten Bakterien das als Hit-

zeschutzprotein bekannte GroE schon bei normalen Bedingungen in 16-fach höherer Konzentration. Allerdings hat die Hitzeresistenz ihren Preis: Da der Organismus durch den andauernden Stress Veränderungen im Erbgut trägt und sehr viel Energie in die Produktion von Hitzeschutzproteinen steckt, wächst er insgesamt langsamer als seine Vorfahren.

Dahinter steht ein komplexer Prozess: Jedes Protein besteht aus einer langen Kette von Aminosäuren. Erst durch kunstvolle Faltung zu einer dreidimensionalen Struktur wird daraus das funktionierende Protein. Dabei helfen Chaperone genannte Proteine, wie das GroE. Es stabilisiert Proteine, die bei höheren Temperaturen instabil werden und hilft, durch Mutationen instabiler gewordene Proteine trotzdem in ihre funktionale Form zu bringen.

## Neue Funktionen der Chaperone entdeckt – Rolle beim Alterungsprozess?

**Zu CLB 01-02/2010, 58-63:  
Proteinfaltung mit Escortservice – Chaperone zur Beschleunigung der Proteinfaltung**

Die Forschungsgruppe von Elke Deuring, Professorin für Molekulare Mikrobiologie an der Universität Konstanz, entdeckte neue Funktionen der als „Chaperone“ bekannten Proteinfaltungshelfer. Die Konstanz-Wissenschaftler bewiesen, dass Chaperone nicht nur wie bislang angenommen für die korrekte Faltung von Proteinen zuständig sind, sondern auch für die Funktionalität der Ribosomen unerlässlich sind. Damit nehmen Chaperone eine bislang unbekannte Schlüsselstellung in zellulären Prozessen ein. Chaperone helfen beim Zusammenbau der komplexen ribosomalen Untereinheiten. Wenn dieser Prozess gestört ist, gibt es weniger funktionstüchtige Ribosomen und viele Proteine können nicht wie benötigt hergestellt werden – für die Zelle eine

enorme Belastung, unter der sie nur noch sehr langsam wachsen kann.

Mit molekularbiologischen Techniken verhinderten die Mikrobiologen in Hefezellen die Bildung zweier Chaperonsysteme namens SSB-RAC und NAC und untersuchten den Effekt auf das Wachstum der Zellen. Fehlten beide Chaperone, wuchsen die Zellen deutlich schlechter als unbehandelte Kontrollzellen. In den Mutantenzellen befanden sich Ansammlungen von zusammengelagerten ribosomalen Bausteinen, darunter ribosomale Proteine und weitere Proteine, die für den Zusammenbau von Ribosomen notwendig sind. Die Zahl der korrekt zusammengesetzten, funktionellen Ribosomen war deutlich niedriger als in unbehandelten Wildtypzellen. Jetzt fragt man sich, ob Chaperone u.a. auch beim Alterungsprozess eine Rolle spielen.

## Das komplette Erbgut einer Braunalge entschlüsselt – Neues zur Photosynthese

**Zu CLB 01-02/2010, 48-56:  
Mikroalgen als Rohstoffproduzenten geeignet für Hochtechnologieprodukte**

Mit der weltweit ersten vollständigen Sequenzierung eines Braunalgengenoms gelang einem internationalen Forscherteam ein großer Sprung, um die Evolution zweier zentraler Voraussetzungen für höheres Leben auf der Erde zu verstehen – Vielzelligkeit und Photosynthese.

Im Laufe der Erdgeschichte hat sich aus Einzelern fünfmal unabhängig voneinander komplexes vielzelliges Leben entwickelt. Aus diesen fünf Linien sind die Tiere, die Pflanzen, die Pilze, die Rotalgen und die Braunalgen unabhängig voneinander entstanden. Evolutionsforscher haben sich deshalb das Ziel gesetzt, aus jeder dieser Gruppen jeweils ein Genom vollständig zu entschlüsseln und nach vergleichbaren Erbinformationen zu suchen. Für ein Braunalgengenom ist dieses Ziel nun erreicht. Die

Entschlüsselung eines Rotalgengenoms ist bereits beendet.

Man hat bei den Braunalgen besonders viele Gene für Kinasen, Transporter und Transkriptionsfaktoren gefunden. Solche Gene kommen auch bei Landpflanzen häufig vor, und man vermutet, dass sie für die Entstehung vielzelliger Organismen eine große Bedeutung besitzen.

Interessant: Grün- und Rotalgen konnten die Fähigkeit zur Photosynthese entwickeln, nachdem ihre Vorfahren lebende Cyanobakterien in sich aufgenommen und die Photosynthese damit gewissermaßen gekapert haben. Bei den Braunalgen ging man bisher davon aus, dass sie aus einer Verschmelzung von photosynthetisch inaktiven, farblosen Zellen mit einer einzelligen Rotalge entstanden. Nun weiß man, dass auch Braunalgen der Fusion einer Grünalge mit einer Rotalge entspringen.



## FRAP für alle – Einfache bis anspruchsvolle Photomanipulation in einem neuen flexiblen System

Olympus stellt als Teil seiner neuen xcellence Imaging-Station für Fluoreszenzanwendungen mit lebenden Zellen das hochentwickelte cell^FRAP-System vor. cell^FRAP ermöglicht – mit hardwarebasierter Gerätesynchronisation – einfache, mikrosekundenschnelle Photobleaching- und Photomanipulationsexperimente in Echtzeit. Dazu gehören FRAP-, FLIP-, FLAP-, Pattern Bleaching-, Photoaktivierungs- und Photokonversionsapplikationen, die dem Anwender anspruchsvolle Optionen für seine Experimente bieten. Darüber hinaus ermöglicht das flexible System simultane Lasermanipulation und -beobachtung auf Knopfdruck.

Intelligente Abtastalgorithmen, die sich nur auf definierte Regionen (ROI = Region of interest) beschränken, machen die Zeilenabtastung zwischen den ROIs überflüssig und sorgen so für eine höhere Abtastgeschwindigkeit. Mit cell^FRAP lassen sich mehrere ROIs simultan photobleichen und im Bild festhalten.

### FRAP leicht gemacht

In cell^FRAP wird FRAP nahtlos in „Experiment-Manager“ der xcellence-Software integriert, um vordefinierte, leicht durchzuführende Experimente zur Untersuchung von Zelldynamiken zu ermöglichen. Für die Manipulation sich schnell bewegendender Proben, wie zum Beispiel Viren oder intrazellulärer Strukturen wie Vesikel, können in sogenannten „Fire on Click“-Experimenten einfache und Mehrpunkt-Bleiche per Mausklick manipuliert und beobachtet werden.

### Anspruchsvolles FRAP

Das cell^FRAP-Modul ermöglicht unter anderem die folgenden hochentwickelten Techniken zur Photomanipulation: FLIP, FLAP sowie Photoaktivierungs- und Pho-

tokonversionsapplikationen. Im Advanced-Modus können die Anwender das System exakt auf ihre Anforderungen hin konfigurieren, auch wenn es dabei um extrem schnelle Bewegungen geht. Und wer sich monatelange Experimente ersparen möchte, greift auf das Pattern Bleaching zurück. Hier wird in einer vordefinierten Region ein Raster in die Probe geblichen (zum Beispiel jeweils in Abständen von einem Mikrometer). So können verschiedene Bewegungsrichtungen und Geschwindigkeiten in der gesamten Probe und nicht nur an einer Stelle beobachtet werden, ähnlich wie mit der zeitaufwändigen Fluorescent Speckle Microscopy (FSM).

### Schnelles FRAP

Die mit dem neuen Olympus cell^FRAP erreichte Schnelligkeit und Präzision bei FRAP wird durch die Kombination des Echtzeit-Controllers mit dem kamera-basierten Imaging möglich, was bis zu zehn Mal schneller ist als konfokal-basiertes FRAP mit Punktscanner. Dank der hardwarebasierten Synchronisation lassen sich die ersten Bilder während oder bereits 150 Mikrosekunden nach

Abschluss des eigentlichen FRAP-Experiments aufnehmen. Der Anwender erhält also nicht nur qualitativ hochwertige Aufnahmen, sondern erzielt auch quantitative Ergebnisse in der wichtigsten Phase des FRAP-Experiments.

### Flexibles FRAP

cell^FRAP ist eine Komplettlösung für sämtliche Photobleich-, Photokonversions- und Photokontrolltechniken und bietet somit deutlich mehr fürs Geld als gängiges konfokalbasiertes FRAP. Darüber hinaus ist es vollständig kompatibel mit den hochentwickelten xcellence-Modulen cell^TIRF und cell^SPIN, denn es kann unabhängig von den standardmäßigen Fluoreszenz- und Kameraausgängen des Mikroskops arbeiten. Das bedeutet: Das System ist extrem flexibel und schnell.

OLYMPUS DEUTSCHLAND GMBH  
Geschäftsbereich Mikroskopie  
Andrea Rackow  
Marketing Communication  
Tel: 040 / 2 37 73 - 4612  
Fax: 040 / 23 08 17  
E-Mail: mikroskopie@olympus.de  
www.olympus.de



## TIRF- Perfektion – gleichmäßig, gleichwertig, gleichzeitig

Olympus gehört bereits seit langer Zeit zu den führenden Spezialisten im Bereich der TIRF-Mikroskopie. Jetzt stellt das Unternehmen sein aktuelles, hochentwickeltes cell^TIRF-System vor. Es ist Teil der neuen xcellence Station für das Fluoreszenz-Imaging lebender Zellen und ermöglicht die ultrasensitive, simultane Multi-Color-TIRFM mit vier Laserlinien in jeweils unabhängigen Strahlengängen.

Zur Synchronisation der evaneszenten Eindringtiefe lässt sich der Einfallswinkel jedes Lasers individuell motorisiert justieren, wodurch Multi-Color-Aufnahmen mit hohem Kontrast und minimalem Hintergrundrauschen simultan generiert werden können. cell^TIRF empfiehlt sich daher insbesondere für Untersuchungen von Zellmembranen und -oberflächen sowie einzelnen Molekülen.

### Top-Objektive

Die anspruchsvolle Multi-Laser-Technologie mit unabhängigen Strahlengängen plus die derzeit breiteste Auswahl an neuen TIRFM-Objektiven sorgen für eine bisher nicht erreichte Empfindlichkeit und Präzision in der Multi-Color-TIRFM. Im Angebot von Olympus enthalten sind sechs TIRFM-Objektive von herausragender optischer Qualität. Dazu gehört



ein Objektiv mit der derzeit höchsten Auflösung (N.A. 1,69) sowie eines mit der höchsten Vergrößerung (150fach; N.A. 1,45). Das heißt, cell^TIRF ermöglicht TIRFM-Untersuchungen mit einer Eindringtiefe bis unter 40 nm.

Neu verfügbare Objektive mit höherer numerischer Apertur von 1,49 bei 100facher und 60facher Vergrößerung offerieren eine exzellente Winkelflexibilität für geringe Eindringtiefen. Das ist besonders bei der Untersuchung von Zellmembranen von Vorteil und sorgt zudem für ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis. Durch das perfekte Zusammenspiel von Softwareintegration, präziser Mechanik und diesen Objektiven kann der Anwen-

der die Eindringtiefe des Lasers per Knopfdruck automatisch bis auf den Nanometer genau einstellen. Ermöglicht wird dies durch die vollständige Integration von cell^TIRF in das Echtzeit-Imaging-System xcellence mit automatischer Erkennung und Konfiguration via ODB (Olympus Data Bus). Sie erlaubt das schnelle Umschalten und eine präzise Hardware-Kontrolle, inklusive TIRF-Kondensator und Laserlinien.

### Intelligente und intuitive TIRF-Steuerung

Ähnlich verhält es sich mit der intelligenten und intuitiven Handhabung von cell^TIRF, mit Hilfe der xcellence Software. Nur Klick ist für den Wechsel zwischen kritischem Winkel, definierter Eindringtiefe und Laser-Weitfeldbeleuchtung erforderlich. "Highly inclined and laminated optical (HILO) sheet imaging" ist dank entlang der x- und y-Achse einstellbarer Feldblenden für jeden Laserstrahl ebenfalls möglich. Feineinstel-

lungen lassen sich ganz einfach über das Mausrad oder die Tastatur vornehmen, Justierungen mit dem Schraubendreher gehören also der Vergangenheit an. In den Experiment-Manager der Software integriert ist zudem ein grafisches Tool, mit dem sich bestimmte TIRFM-Einstellungen für anspruchsvolle Applikationen – wie zum Beispiel TIRF Experimente mit variierenden Eindringtiefen – durchführen lassen.

### Flexibilität & Mehrwert

Olympus hat cell^TIRF so entwickelt, dass es auch in Kombination mit anderen Techniken eingesetzt werden kann, sodass sich die Investition schnell rentiert. So erlaubt das xcellence System das Fluoreszenz-Imaging von Lebendzellen in Echtzeit. Zudem kann es die konfokalen Module cell^FRAP für die Photokontrolle sowie cell^SPIN für laserbasierte Spinning-Disks aufnehmen. Das System ist vollständig kompatibel mit den meisten Mikroskoptischen, Image-Splittern, Piezoantrieben und AFM-Tischen.

OLYMPUS DEUTSCHLAND GMBH

Geschäftsbereich Mikroskopie

Andrea Rackow

Marketing Communication

Tel: 040 / 2 37 73 - 4612

Fax: 040 / 23 08 17

E-Mail: mikroskopie@olympus.de

www.olympus.de

## Neue und schnelle Methode zur Bestimmung des Gehaltes an Hydroxyprolin in Fleisch- und Wurstwaren



bestimmt man den Hydroxyprolinegehalt, da diese -Aminosäure nur in Kollagen und damit maßgeblich in Sehnen-, Knochen-, Knorpel- und Hautteilen vorkommt.

Ein hoher Gehalt an Hydroxyprolin gilt daher als Indiz für eine erhöhte Verwendung minderwertiger Rohstoffe.

Klassisch wird der Bindegewebsanteil so bestimmt, das zwischen 2 und 5 g Fleisch und Fleischerzeugnisse eingewogen werden und diese Matrix in mindestens 8 Stunden, häufig sogar bis zu 16 Stunden in einem Glasgefäß mit Salzsäure (selten auch mit Schwefelsäure) bei Siedehitze gekocht wird.

Zur Erleichterung der Arbeit, zur Erhöhung des Probendurchsatzes und vor allem zur Beschleunigung der Analyse wurde von CEM als Pionier und Marktführer in der Mikrowellen-Labortechnik

diese Arbeitsvorschrift auf das Mikrowellengerät MarsXpress hin übertragen.

Die Übertragung dieser Applikation hin auf das Aufschlußsystem MarsXpress geht exakt nach dieser Vorschrift vor. Nach eingehender Optimierung aller Parameter konnte eine Zeitverkürzung auf 30 min. erreicht werden. Es können zeitgleich bis zu 40 Proben bearbeitet werden. Ein weiterer Vorteil dieser Methode im MarsXpress liegt in mit einem Minimum an Platz- und Handhabungsaufwand.

CEM GmbH

Pionier und Marktführer in der Mikrowellen-Labortechnik

Carl-Friedrich-Gauß-Str. 9

47475 Kamp-Lintfort

Tel. + 49 28 42 - 96 44 0

Fax + 49 28 42 - 96 44 11

web: www.cem.de

## Neuigkeiten in der chemischen/biochemischen Synthese



Das Mikrowellen-Synthesegerät Discover S-Klasse Plus ermöglicht neue Perspektiven bei den chemischen/biochemischen Synthesen im Labor.

Synthesen in der Mikrowelle sind bis zu 100mal schneller und wesentlich bequemer durchzuführen als auf klassischem Wege. Dabei können ungefährliche Lösemittel eingesetzt werden, was die Sicherheit deutlich erhöht (Green Chemistry). Im Mikrowellenfeld werden häufig chemische Reaktionen möglich, die auf den bisherigen Weg nicht oder nur schlecht darstellbar sind.

Das Synthesegerät Discover S-Klasse Plus ist der vielseitigste Mikrowellen-Synthesizer auf dem Markt. Nur in diesem Mikrowellen-Synthesizer können Reaktionen unter Rückfluß, Festphasen-Reaktionen und auch Reaktionen in unterschiedlich großen Druckbehältern mit Volumina von 4 ml, 10 ml, 35 ml und 80 ml durchgeführt werden. Ferner stehen 4 unterschiedliche Autosampler zur Verfügung (für 12 Proben, 48 Proben, 72 Proben und 96 Proben).

Einblicke in die laufende Reaktion können Sie über die eingebaute Kamera erhalten. Campbell et al, berichten in der neuen Veröffentlichung „Rapid Microwave Synthesis and Purification of Porous Covalent Organic Frameworks“ über die visuelle Verfolgung der Reaktion in Druckbehältern.

Der vollständige Bericht: <http://www.cem.de/images/produkte/mikrowellen-synthese/COF%20Paper.pdf>. Weitere Infos über das Discover S-Klasse Plus unter [www.mikrowellen-synthese.de](http://www.mikrowellen-synthese.de).

### Neue Termine für Anwenderkurse zur Mikrowellen-Aufschlusstechnik

Die CEM GmbH bietet für 2010 folgende Ausbildungs- und Anwenderkurse zur Mikrowellenaufschlusstechnik in den eigenen Firmenräumen in Kamp-Lintfort am Niederrhein an:

- 10.+11. August 2010
- 07.+08. Dezember 2010

Im Rahmen dieser Kurse werden die Teilnehmer/innen in den theoretischen Grundlagen und insbesondere in der Methodenentwicklung für mikrowellenassistierte Aufschlüsse geschult. Bei den praktischen Übungen in kleinen Gruppen können die Teilnehmer/innen eigene Proben zum Seminar mitbringen, die dann anhand der individuellen Problemstellungen bearbeitet werden. Das Ziel dieser Anwenderkurse ist das eigenständige Entwickeln von Aufschlussmethoden.

Der Teilnehmerkreis richtet sich an Laboranten/innen, Ingenieure/innen, Chemiker/innen, etc.

Der erste Seminartag beginnt um 13.30 Uhr, es kann also vorher die Anreise erfolgen. Am 2. Seminartag endet die Veranstaltung um 14.30 Uhr, so das anschließend die Heimfahrt angetreten werden kann.

Der Kostenbeitrag für dieses 2tägige Seminar beträgt 490,00 EUR zzgl. MWSt. und beinhaltet:

- \* umfangreiche Seminarunterlagen
- \* zwei Mittagessen
- \* ein gemeinsames Abendessen
- \* eine Hotelübernachtung
- \* den Transfer zwischen dem Hotel

„Nibelungenhof“ in Xanten und den Schulungsräumen

\* und den Transfer am Seminartag zum ICE-Bahnhof Duisburg.

Die Anmeldung zu den Seminaren, kann per Mail an [info@cem.de](mailto:info@cem.de) oder per Fax erfolgen.

Folgende Seminarinhalte werden behandelt:

Übersicht der Aufschlußmethoden, Grundlagen der Aufschlußtechnik

- Materialgrundlagen und Werkstoffe für einen optimalen Mikrowelleneinsatz
- Grundlagen der Mikrowellen-Aufschlußtechnik
- Behältertechnik für Druckaufschlüsse
- Sicherheitsaspekte
- Applikationsbeispiele
- Praktikumsstart, Einweisung an den Geräten, Tipps
- Voraussetzungen für vollständige und verlustfreie Aufschlüsse
- Grundlagen zur Methodenentwicklung
- Richtlinien zur Auswahl der Säuren bei naßchemischen Aufschlüssen
- Komplikationen/Matrixeffekte/Interferenzen bei unvollständigen Aufschlüssen
- Entwicklung von Aufschlußvorschriften
- Datentechnik, PC-Labormanagement (Einsatz von spezieller CEM-Software)
- Verdampfungstechnik im Microvap

Weitere Mikrowellentechniken: offene Mikrowellenaufschlüsse im STAR; Continuous-Flow-Aufschlüsse; Lösungsmittel-extraktion; Proteinhydrolyse; Synthesen; Veraschungen/Sulfatveraschungen; Feuchte/Feststoffbestimmung; Fettbestimmung; Praktische Arbeit: Praktische Bearbeitung von selbst mitgebrachten Proben.

CEM GmbH

Pionier und Marktführer in der Mikrowellen-Labortechnik

Carl-Friedrich-Gauß-Str. 9

47475 Kamp-Lintfort

Tel. + 49 28 42 - 96 44 0

Fax + 49 28 42 - 96 44 11

web: [www.cem.de](http://www.cem.de)

# ERREICHEN HALTEN

Die CLB-Rubrik für Ausbildung und Weiterbildung

in Chemie, Labortechnik, Biologie, Biotechnik und verwandte Bereiche  
sowie für praxisorientierte Themen aus der Umwelt (bislang CLB Memory)

Juli / August 2010

## Nachfrage ungebrochen – Dienstleistungen steigen DPG und IdW veröffentlichen Studie zum Arbeitsmarkt für Physiker

**D**ie Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG) veröffentlichte in diesem Jahr in Zusammenarbeit mit dem Institut der deutschen Wirtschaft (IdW, Köln) in diesem Jahr eine Studie zur Arbeitsmarktentwicklung für Physiker. Die in dieser Studie präsentierten Daten beziehen sich auf männliche oder weibliche Personen, die über einen Abschluss eines physikalischen Studiengangs an einer Universität, Hochschule oder Fachhochschule verfügen. Für im Rahmen eines Lehramtsstudiums ausgebildete Physiker liegen in den verwendeten amtlichen Statistiken keine Daten vor, so dass diese Personengruppe nicht eingeschlossen werden konnte. Die Datenerhebung erfolgte mittels Sonderauswertungen des aktuellsten Mikrozensus 2007, der amtlichen Repräsentativstatistik über die Bevölkerung und den Arbeitsmarkt in Deutschland. Des Weiteren wurde die Arbeitsmarktstatistik der Bundesagentur für Arbeit verwendet.

In Deutschland lebten im Jahr 2007 insgesamt knapp 123 000 Physiker. Somit war jeder 670. Einwohner Deutschlands Physiker. 86 Prozent davon waren 65 Jahre alt oder jünger. Der Anteil weiblicher Physiker innerhalb der Gesamtpopulation betrug rund 14

Prozent. Knapp 12 Prozent aller Physiker hatten eine ausländische Staatsbürgerschaft. Der Anteil ausländischer Physiker ist seit 1995 um 50 Prozent gestiegen. Relativ zur Einwohnerzahl lebten die meisten Physiker in Bayern und Baden-Württemberg, die wenigsten in Sachsen-Anhalt und Thüringen. Knapp 38 Prozent aller Physiker waren promoviert, weitere 57 Prozent verfügen über einen Abschluss an einer Universität oder Hochschule, 5 Prozent waren Absolventen einer Fachhochschule\*.

Die Physikerpopulation rekrutierte sich zu 76 Prozent aus erwerbstätigen Personen und zu 21 Prozent aus Nichterwerbspersonen (Rentner und andere Personen, die dem Arbeitsmarkt nicht zur Verfügung stehen). Die Restgröße entfällt auf erwerbslose Personen. Innerhalb der Bevölkerung im typischen Erwerbsalter (bis 65 Jahre) beträgt die Erwerbsquote rund 87 Prozent. Im Vergleich zu anderen Akademikern weisen Physiker über den gesamten Erwerbslebenszyklus eine höhere Erwerbsquote auf. 14 Prozent der erwerbstätigen Physiker waren weiblich. 30 Prozent der weiblichen und 9 Prozent der männlichen Physiker waren teilzeiterwerbstätig (weniger als 32 Wochenstunden). 83 Prozent der teilzeiterwerbstätigen Physiker strebten keine Vollzeiterwerbstätigkeit an. Über drei Viertel aller erwerbstätigen Physiker waren

Angestellte, ein Achtel Beamte, ein Zehntel Selbstständige. Im Vergleich zum Jahr 1995 ist die Zahl erwerbstätiger Physiker um 7 Prozent gestiegen.

### Berufs- und Branchenflexibilität

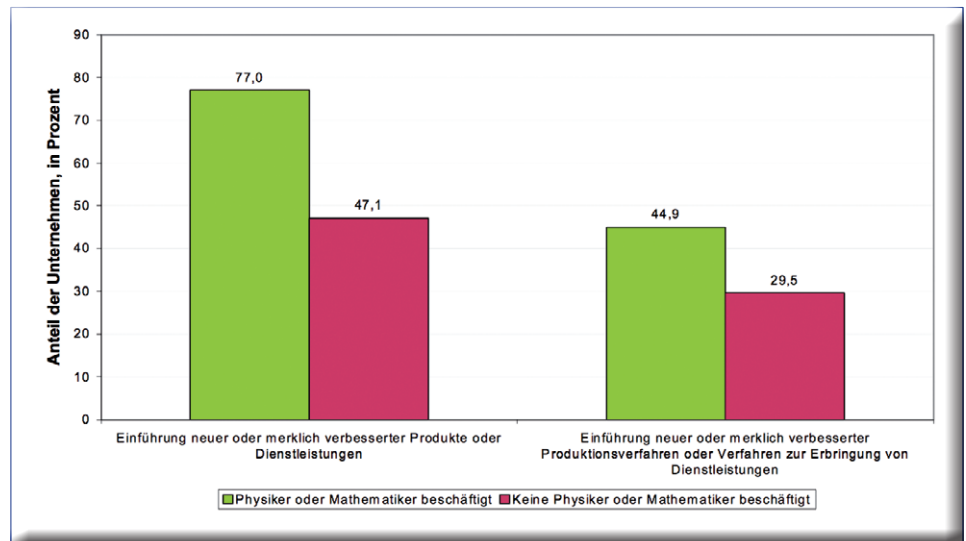
Physiker weisen eine sehr hohe Berufs- und Branchenflexibilität auf. Lediglich einer von vier gelernten Physikern arbeitet auch im Zielberuf Physiker. Viele Physiker arbeiteten in verwandten technisch-naturwissenschaftlichen Berufen, etwa als Informatiker, Mathematiker oder als Ingenieur. Viele Physiker arbeiteten aber auch in physikfremden Berufen, mehr als 10 Prozent etwa als Manager oder Unternehmensberater. Rund 71 Prozent aller Physiker waren im Dienstleistungssektor und lediglich knapp 29 Prozent im produzierenden Gewerbe beschäftigt. Im Vergleich zum Durchschnitt aller Akademiker arbeiteten Physiker deutlich häufiger in Branchen mit einer hohen Akademikerdichte. Knapp ein Drittel aller Physiker arbeitete im öffentlichen

\* Aus methodischen Gründen (vgl. Kapitel 1.1) zählt die vorliegende Studie Absolventen von Fachhochschulstudiengängen, in denen die theoretischen und experimentellen Grundlagen der Physik (einschließlich der Mathematik) nicht in dem Umfang vermittelt werden wie in einem Hochschulstudium, zur Gruppe der Physiker.

Dienst, weibliche Physiker signifikant häufiger als ihre männlichen Pendanten. Zwischen 1995 und 2007 ist die Physikerbeschäftigung im öffentlichen Dienst um knapp 20 Prozent gesunken, die Beschäftigung insgesamt hingegen nur um 15 Prozent. Insgesamt ist im Vergleichszeitraum eine generelle Strukturverschiebung der Physikerbeschäftigung zugunsten wissensintensiven Dienstleistungsbranchen zu verzeichnen. Die höchste Physikerdichte lag in den Branchen Forschung und Entwicklung, Datenverarbeitung und Datenbanken sowie im Hochschulbereich vor.

Entwicklungen des Arbeitsmarkts Unternehmen melden weniger als 10 Prozent ihrer offenen Stellen im Zielberuf Physiker der Bundesagentur für Arbeit. Das gesamtwirtschaftliche Stellenangebot im Zielberuf Physiker liegt somit um ein Vielfaches über dem Stellenangebot der BA. Im August 2009 betrug das gesamtwirtschaftliche Stellenangebot allein im Zielberuf Physiker rund 1800 Stellen. Das gesamte für gelernte Physiker relevante Stellenangebot belief sich zum selben Zeitpunkt auf rund 4900 Stellen. Im Zielberuf Physiker ist die Zahl arbeitsloser Personen seit dem Jahr 2000 von rund 2000 auf aktuell rund 1000 gesunken. Im Jahr 2007 lag die Arbeitslosenquote im Zielberuf Physiker bei rund 3 Prozent, im Jahr 2008 ist sie nochmals gesunken. Im Ausbildungsberuf Physiker liegt die Arbeitslosenquote sogar geringfügig niedriger.

**Mittelfristiger Fachkräftebedarf**  
In den Jahren 2008 bis 2012 scheiden jährlich 2200 erwerbstätige Physiker altersbedingt aus dem Erwerbsleben aus. Der resultierende demografiebedingte Ersatzbedarf erhöht sich kontinuierlich auf bis zu 3300 Personen in den Jahren 2028 bis 2032, wenn die stark besetzten Kohorten der heute 36-45-jährigen Physiker ersetzt werden müssen. Zusätzlich wird in Folge langfristigen Wirtschaftswachstums ein Expansionsbedarf in Höhe von bis zu 300 Physikern



77,0 Prozent aller Physiker oder Mathematiker beschäftigenden Unternehmen sowie 47,1 Prozent aller keine Physiker oder Mathematiker beschäftigenden Unternehmen haben innerhalb der zurückliegenden zwei Jahre neue oder merklich verbesserte Produkte oder Dienstleistungen hervorgebracht (Quelle: IW-Zukunftspanel 2009).

pro Jahr wirksam. Gelingt es nicht, wieder deutlich mehr Physikabsolventen hervorzubringen, drohen spätestens mittelfristig wieder manifeste Fachkräfteengpässe.

Jeder zweite in einem abteilungsgegliederten Unternehmen beschäftigte Physiker arbeitet in der Forschungs- und Entwicklungsabteilung. Physiker oder Mathematiker beschäftigende Unternehmen betreiben mit einer deutlich höheren Wahrscheinlichkeit Forschung und Entwicklung, weisen mit einer deutlich höheren Wahrscheinlichkeit Innovationserfolge auf und erzielen einen deutlich höheren Anteil ihres Umsatzes mit innovativen Produkten und Dienstleistungen als ihre Komplementärgruppe.

### Überdurchschnittliches Einkommen

Einkommen und Berufszufriedenheit Physiker des Absolventenjahrgangs 1997 erzielten zu sämtlichen erhobenen Zeitpunkten ein im Durchschnitt deutlich höheres Einkommen als der Durchschnitt aller Universitätsabsolventen. Zehn Jahre nach dem Examen lag das Bruttojahreseinkommen eines Physiklers rund 25 Prozent oberhalb des Vergleichswerts aller Universitätsabschlüsse sowie auf einem Niveau mit Informatik- und

Elektrotechnikabsolventen. Zehn Jahre nach dem Examen lag das gesamte Bruttojahreseinkommen eines Physiklers im Median bei 69.000 Euro und damit rund 25 Prozent oberhalb des Vergleichswerts aller Universitätsabschlüsse sowie auf einem Niveau mit Informatik- und Elektrotechnikabsolventen.

Das durchschnittliche persönliche Monatsnettoeinkommen (arithmetisches Mittel und Median) eines vollzeiterwerbstätigen Physiker lag im Jahr 2007 im Intervall zwischen 2900 und 3199 Euro. Der größte Unterschied ist zwischen verheirateten und nicht verheirateten Physikern zu verzeichnen. Mögliche Gründe hierfür sind ein eventuell höheres Durchschnittsalter verheirateter Physiker sowie eine günstigere Steuerklasse. In Deutschland sind knapp zwei Drittel aller Physiker verheiratet.

87 Prozent der Physikabsolventen geben an, sie würden wieder das gleiche Fach studieren. Damit weisen Physiker von allen Studiengängen (Universität oder Fachhochschule) die höchste Zufriedenheit mit ihrer Studienfachwahl auf. Im Durchschnitt aller Fachrichtungen würden nur 66 Prozent aller Absolventen das eigene Fach erneut studieren.

# Chemie für Wissenschaftsjournalisten

## Teil 2: Verschiedene Anwendungsbereiche: Von Energie bis Nanotechnik

Volker Wiskamp, Hochschule Darmstadt

**S**eit dem Wintersemester 2005/2006 gibt es an der Hochschule Darmstadt einen Bachelor-Studiengang „Wissenschaftsjournalismus“. Etwa 20 pro Jahr zugelassene Studierende werden in sechs Semestern dazu befähigt, aktuelle Themen aus Wissenschaft und Technik zu recherchieren und anschaulich für eine breite Öffentlichkeit darzustellen. Dieser zweiteilige Artikel stellt die Lehrinhalte für Chemie vor. Nach den Inhalten zu Grundlagen der Chemie sowie einem ersten Anwendungsbereich „Automobile“ zeigt dieser zweite Teil die Studieninhalte weiterer Anwendungen der Chemie.

### Chemie und Energie

Energiequellen, Energiebereitstellung, Energie-Sparen – das sind Themen, welche die Zukunft der Menschheit und des Planeten Erde maßgeblich prägen und über die Wissenschaftsjournalisten deshalb gewiss berichten werden. Folglich ist es sinnvoll, eine Seminareinheit

den vielfältigen Zusammenhängen zwischen Chemie und Energie zu widmen.

Zum Einstieg wird wiederholt, dass die Energiemenge im Universum zwar konstant bleibt, dass aber verschiedene Energieformen existieren, die sich in ständiger Umwandlung befinden: Lichtenergie kann endergonische chemische Reaktionen ermöglichen; bei exothermen Reaktionen wird Wärmeenergie an die Umgebung abgegeben; Reaktionen, bei denen ein Gas frei wird, leisten Volumenarbeit; in einer Batterie ist chemische Energie gespeichert, aus der bei Bedarf elektrische Energie werden kann; etc.

Nachdenklich werden die Studierenden, wenn ihnen mitgeteilt wird, dass der Energieverbrauch der Menschheit in den 180 Jahren zwischen 1800 und 1980 244 Milliarden Joule betrug und in der nur 19 Jahre umfassenden Periode danach, also von 1980 bis 1999, auf 117 Milliarden Joule angestiegen ist, dass aus 100 Tonnen einstigen pflanzlichen Lebens 4 Liter Benzin gewonnen werden können und dass wir die Energiemenge von über 400 Jahren strahlenden Sonnenscheins in einem Jahr verheizen. Die Bücher des australischen Biologen Flannery „Wir Wettermacher“ und „Wir Klimakiller“ [8], aus denen diese Denkanstöße stammen, sei den angehenden Wissenschaftsjournalisten als Lektüre sehr empfohlen.

Im folgenden Seminarteil geht es um die Wechselwirkung von elektromagnetischer Strahlung und Materie. Zunächst wird der mathematische Zusammenhang zwischen Strahlungsenergie, Frequenz, Wellenlänge und Wellenzahl festgehalten. Dann werden das Zustandekommen von Farbe bei der Absorption von sichtbarem Licht durch geeignete chemische Verbindungen, die Funktionsweise

eines Spektralphotometers und der Unterschied zwischen einem kontinuierlichen Spektrum (Lichtzerlegung durch ein Prisma) und einem Linienspektrum (Emissionslinien bei der flammenspektrometrischen Analyse von Alkali- und Erdalkaliverbindungen) besprochen. Anschließend werden die physikalischen Grundlagen der Infrarotspektroskopie und verschiedene durch IR-Licht angeregte Schwingungstypen diskutiert und einige Spektren betrachtet, u. a. auch das IR-Spektrum von Aspirin, welches die Studierenden in ihrem Praktikum bereits aufgenommen haben.

Als Beispiele für Photoreaktionen werden die Silberbildung bei der Photographie und die Photosynthese der grünen Pflanzen zitiert. Daran knüpft die Besprechung der Umwandlung von Sonnenlicht in elektrischen Strom inklusive der Herstellung und Reinigung des photohalbleitenden Siliziums an.

Der nächste Teil des Seminars widmet sich der Kernenergie (Abb. links). Wie wird spaltbares Urandioxid ausgehend von natürlicher Pechblende gewonnen und angereichert? Was passiert bei der Kernspaltung? Was bedeuten unterkritische, kritische und überkritische Masse? Wie funktioniert eine Atombombe bzw. ein Kernkraftwerk?

Weiter geht es mit den fossilen Brennstoffen Kohle, Erdöl und Erdgas. Deren Brennwerte und CO<sub>2</sub>-Bilanzen werden verglichen. Des Weiteren wird diskutiert, wie Brennwerte gemessen werden, z. B. durch Verbrennungskalorimetrie. Chancen und Risiken des auf der Erde in gewaltigen Mengen vorhandenen Methanhydrats werden beleuchtet. Die Biogas-Produktion wird hingegen nur kurz angesprochen, denn sie wird in der späteren Seminareinheit über nachwachsende Chemieprodukte ausführlich

Ende 1951 erzeugte der Forschungsreaktor EBR-I im US-Bundesstaat Idaho erstmals elektrischen Strom aus Kernenergie und erleuchtete am 20. Dezember gerade einmal diese vier Glühlampen. Derzeit betreiben 30 Länder 438 Kernreaktoren mit einer gesamten Anschlussleistung von etwa 370 Gigawatt (Stand Mai 2010; Foto: United States Department of Energy).



thematisiert. Selbstverständlich wird auch die Energiegewinnung durch die Müllverbrennung, das so genannte energetische Recycling, beachtet.

Abschließend werden noch einmal die Begriffe „Aktivierungsenergie“ und „Katalyse“ reflektiert und die Hauptsätze der Thermodynamik vertieft. Was Entropie bedeutet, hat Lucas eindrucksvoll formuliert [11]:

„Lokal und temporär bilden sich Strukturen durch Selbstorganisation; gleichzeitig entsteht Chaos an den Rändern des Systems. Das sind keine Gegensätze. Die beiden Prozesse gehören vielmehr zusammen und stehen in Übereinstimmung mit dem Entropiegesetz. Es gibt eine Koexistenz von Aufstieg und Niedergang. Bezogen auf die Zivilisation und Gesellschaft heißt das: Wir können Inseln der Ordnung schaffen, wenn wir Chaos in ihrer Umgebung akzeptieren. Entropie- und Chaosproduktion sind die Triebkraft für den Aufstieg innen und den Niedergang außen. Nichts anderes haben wir in der Vergangenheit getan. Wir haben in Teilbereichen der Welt Wohlstand und Überfluss geschaffen, und dabei die Ausbeutung und Schädigung eines großen Bereichs unserer Welt, insbesondere der natürlichen Welt, in Kauf genommen. Es gibt überall ein Innen und Außen, und es ist das Streben jedes einzelnen, drinnen zu sein und nicht draußen zu bleiben. Das Entropiegesetz ist die Triebkraft dieser Strukturbildung, aber auch das Gesetz ihres Preises. Das heißt auch: Es gibt keine Zukunft in der Welt ohne Entropieproduktion, es gibt nur die zweckmäßige Entscheidung über den Bereich, in dem wir Aufstieg wollen, und den Bereich, in dem wir Entropie abführen. Es gibt keine wirtschaftliche Blüte innerhalb von Stadtmauern ohne eine Mülldeponie außerhalb. Ein System kann sich nur so viel Ordnung leisten, wie es an entropischem Chaos nach außen abführen kann. Innerhalb dieses grundsätzlichen Rahmens aber gibt es im Detail einen weiten Gestaltungsfreiraum. Die Minimierung des Entropiezolls, den wir für unseren Aufstieg zahlen müssen, ist die

größte Aufgabe moderner Technik. Die Leitlinie dafür heißt: Vermeidung unnötiger Prozesse, unnötig hohen Energiedurchsatzes, unnötig naturfremder Chemikalien. Jede unnötige, nicht strukturbildend eingesetzte Aktivität ist ein Missbrauch, erzeugt vermeidbare Entropie, die aus dem System abgeführt werden muss. Jede erzeugte Struktur, jedes neue Produkt kostet einen Entropiepreis und ist damit eine Hypothek auf die Zukunft. Es ist daher sehr wohl die kritische Frage zu stellen, ob ein Produkt seinen Entropiepreis wert ist.“

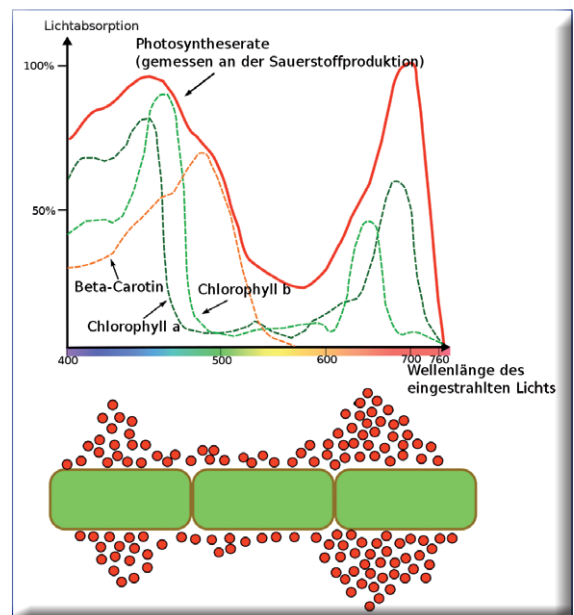
### Photosynthese und Stoffwechsel

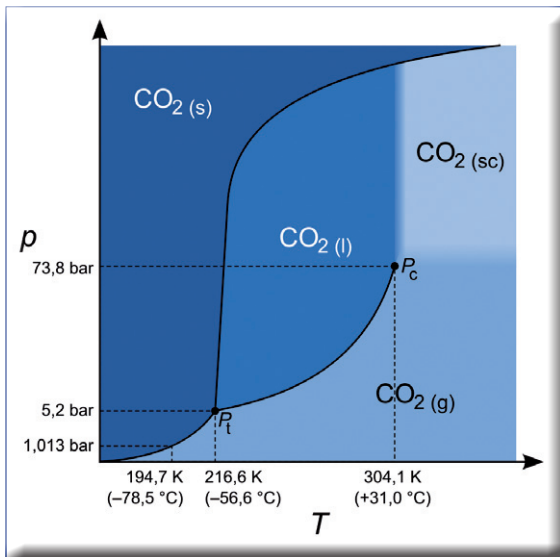
Dieser Seminarteil beinhaltet die beiden großen Themen der Biochemie. Wir beginnen mit der Betrachtung des Dünnschichtchromatogramms eines Blattextraktes und der Absorptionsspektren der verschiedenen Blattfarbstoffe (Abb. rechts), die in der so genannten Lichtsammelfalle konstruktiv als Photosensibilisatoren zusammenarbeiten und die Zerlegung von Wasser ( $2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^-$ ) ermöglichen. Das Schema der Lichtphase der Photosynthese wird ausführlich diskutiert. Anders als bei der Elektrolyse oder Pyrolyse von Wasser entsteht hierbei kein elementarer Wasserstoff, sondern der biochemische Wasserstoffspeicher NADPH/H<sup>+</sup>, der in der Dunkelphase der Photosynthese (Calvin-Zyklus) gebraucht wird, um Kohlenstoffdioxid zum Kohlenhydrat Glucose zu reduzieren. Die Energie des Sonnenlichtes wird darüber hinaus für die Kondensation von Adenosindiphosphat und Phosphat zu Adenosintriphosphat benötigt. Das energiereiche ATP darf deshalb als „Assistent der Sonne“ bezeichnet werden [12].

Es wird extra noch einmal betont, dass die Synthese von Glucose und Sauerstoff aus den anorganischen Grundbausteinen Kohlenstoffdioxid und Wasser eine endergonische und dass folglich die Umkehrreaktion, nämlich die Verbrennung des Zuckers, eine exergonische Reaktion ist. Mensch und Tier atmen den

Sauerstoff ein, den die Pflanzen zuvor produziert haben, und sie nehmen Nahrung zu sich, die direkt oder indirekt Glucose beinhaltet, welche ebenfalls pflanzlicher Herkunft ist. Mensch und Tier verbrennen die Nahrung und nutzen die dabei freigesetzte Energie, die von der Sonne geliehen ist, für die vielseitigen Aktivitäten in ihrem Leben. Mit einem Gefühl von Demut ist es deshalb erlaubt, die Photosynthese

Oben: Absorptionsspektren von Chlorophyll a, b und -Carotin. Mit der Absorption korreliert die Photosyntheserate (photosynthetisches Wirkspektrum). Unten: Engelmanscher Bakterienversuch (nicht maßstabgetreue Grafik). Das Ziel dieses Experiments bestand darin, die lichtabhängige Sauerstoffbildung bei der oxygenen Photosynthese in verschiedenen Bereichen des Lichtspektrums grob zu quantifizieren. Zu diesem Zwecke lenkte Theodor Wilhelm Engelmann einen Lichtstrahl durch ein Prisma, so dass ein Spektrum erzeugt wurde. Dieses projizierte er auf einen dünnen Algenfaden, der sich in einem wässrigen Medium befand, das Bakterien enthielt, die positiv chemotaktisch auf Sauerstoff reagieren. Je nach Farbe des Lichts, das auf den Algenfaden traf (vom langwelligen Rot über Orange, Gelb, Grün und Blau bis zum kurzwelligen Violett), produzierte das in den Chloroplasten enthaltene Photosynthesesystem mehr oder weniger Sauerstoff, worauf sich die Bakterien mehr oder weniger stark an den betreffenden Stellen ansammelten. Die Menge der angesammelten Bakterien nahm er als Maß für die Photosyntheserate, die der Sauerstoffproduktionsrate entspricht. Das Resultat zeigt, dass der Optimalbereich für die Photosynthese bei dem langwelligen Rot liegt sowie im kurzwelligen Blau. Dazwischen im Bereich von Grün und Gelb beträgt die Photosyntheserate nur etwa 10 %. Das erklärt auch das Pflanzengrün: während das rote und das blaue Licht fast vollständig absorbiert werden, wird sowohl das grüne, so wie auch das gelbe reflektiert (Abb.: Lanzi).





Im überkritischen Aggregatzustand hat Kohlendioxid deutlich andere Eigenschaften als unter Normbedingungen, die zwischen den Eigenschaften von Gas und Flüssigkeit liegen. So ist es genauso dicht wie eine Flüssigkeit, hat aber dieselbe Viskosität wie ein Gas. Überkritisches  $\text{CO}_2$  wird in der Industrie als Extraktionsmittel etwa zur Entkoffeinierung von Kaffee genutzt, weil es eine hohe Löslichkeit für eine Vielzahl organischer Substanzen aus Pflanzen aufweist. Der Prozessfortschritt kann dabei zum Beispiel online mittels NIR-Techniken verfolgt werden. Im Jahr 2007 wurden bereits ein Fünftel aller entkoffeinerten Kaffees durch Extraktion mit überkritischem Kohlendioxid hergestellt (Abb.: Sponk).

als das vielleicht größte Wunder der Natur zu bezeichnen [13]. Dieser metaphysische Gedanke ist in der Ausbildung von Wissenschaftsjournalisten angebracht, zumal diesen die verantwortungsvolle Aufgabe obliegt, Erkenntnisse, die ursprünglich in der Sprache der Fachwissenschaft formuliert worden sind, in andere Sprachen zu übersetzen.

Der Glucose-Abbau, die besondere Bedeutung des Zwischenproduktes Brenztraubensäure auch für die Milchsäure- bzw. Ethanol-Gärung, der Zitronensäurezyklus und die Atmungskette inklusiv einer biochemischen Spannungsreihe werden besprochen. Ergänzend wird erwähnt, dass Glucose, falls sie nicht direkt für die Energiegewinnung im Körper benötigt wird, zu Glycogen, so genannter menschlicher Stärke, polykondensiert (Kurzzeitspeicher) oder zu Fett (Langzeitspeicher) metabolisiert und so in chemischen Verbindungen gespeichert und deren Energiegehalt später abgerufen werden kann.

Primo Levi hat über zentrale Aspekte des Kohlenstoff-Kreislaufes ein Märchen geschrieben [14], das zum Schluss dieser Seminareinheit in verkürzter Form nacherzählt wird:

„Es war einmal ein Kohlenstoffatom im Kalkstein, der in einem Ofen auf über  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  erhitzt wurde. Da machte sich das Atom mit zwei Sauerstoffgefährten aus dem Staub. Die drei Kumpel wurde eine zeitlang vom Wasser im Ozean gebunden, dann aber wieder ausgespuckt, so dass sie vom Wind zu einem Weinberg geweht wurden. Dort ruhten sie sich in einem Blatt aus, bis ein Lichtstrahl sie traf, ein turbulentes Leben seinen Anfang nahm und erst zu einem vorläufigen Ende kann, als das C-Atom in ein Zuckermolekül in der Rebe eingebaut war. Mit viel Glück entging es dem Prozess der alkoholischen Gärung, wurde aber von einem Weintrinker verschluckt und in dessen Körper verstoffwechselt. Danach war es wieder mit zwei Sauerstoffatomen allein. Doch das freie Leben in der Luft war nur von kurzer Dauer. Kaum hatte eine Baumkrone die verbundenen drei Atome eingefangen, mussten sie als Holz zum Stabilisieren des Baumes beitragen. Bis ein Holzwurm sie aus der Sklaverei befreite. Der starb bald darauf. Jahre vergingen, und das Kohlenstoffatom wurde Teil des Humusbodens.“

### Lebensmittelchemie

In dieser Unterrichtseinheit werden schwerpunktmäßig Kohlenhydrate, Fette und Proteine sowie ausgewählte Mineralien und Vitamine in ihrer Bedeutung für das menschliche Leben gewürdigt.

Zunächst werden die drei Monosaccharide Glucose, Fructose und Ribose in ihren offenkettigen und zyklischen Formen präsentiert, danach ihre Kondensation zu Disacchariden (Saccharose, Maltose) und Polysacchariden (Cellulose, Stärke, Glykogen) diskutiert.

Im zweiten Seminarteil stehen gängige Triglyceride und die daran beteiligten Fettsäuren auf dem Programm. Der Mechanismus der alkalisch katalysierten Fettsäure-

(Verseifung) wird wiederholt und der Katabolismus von Fetten im menschlichen Körper anhand eines Übersichtsschemas erläutert.

Nun wird zu den Proteinen übergeleitet und den Studierenden bewusst gemacht, wie wichtig Wasserstoffbrückenbindungen für die charakteristischen Faltblatt- oder helicalen Strukturen der Eiweiße sind. Es wird begründet, wieso die Monomere dieser speziellen Polyamide, die Aminosäuren, gerne als „Bausteine des Lebens“ bezeichnet werden.

Warum Mineralien aufgenommen werden müssen, wird zunächst am Beispiel Fluorid verdeutlicht: Schon aus der Zahnpasta-Werbung dürfte es den Studierenden bekannt sein, dass Fluoridionen erforderlich sind, um den Zahnschmelz durch die Ausbildung von besonders hartem Calciumfluorid zu festigen. Natrium-, Kalium-, Chlorid-, Carbonat- und Hydrogencarbonationen müssen mit der täglichen Nahrung – in der richtigen Menge – eingenommen werden, denn sie sind maßgeblich am Stofftransport durch Zellwände beteiligt. Es wird kurz erklärt wie biochemische Pumpen funktionieren.

Von den zahlreichen Vitaminen werden lediglich Vitamin A und C mit ihren antioxidierenden Wirkungen vorgestellt. Des Weiteren wird die Bedeutung von Vitamin A für den Sehprozess betont. Auf die dazu im Praktikum bereits durchgeführten Modellversuche wird verwiesen.

Die mit der Nahrung aufgenommenen großen Moleküle (Stärke, Fette, Proteine) werden im Verdauungstrakt des Menschen in kleinere zerlegt. Dabei spielen der pH-Wert und mehrere Enzyme eine Rolle. Die Stärke-Verzuckerung, eine Acetal-Hydrolyse, wird durch den Biokatalysator Amylase im neutralen Medium (Speichel) ermöglicht. Die Fettsäurespaltung, eine Ester-Verseifung, wird durch Lipase, die Proteinspaltung, eine Säureamid-Hydrolyse, durch Proteasen katalysiert. Dies geschieht vorzugsweise im leicht alkalischen Medium, welches im Darm vorherrscht. Auch



Biotenside sind am Verdauungsprozess beteiligt. Insbesondere die wasserunlöslichen Öle und Fette werden mit Hilfe von amphiphilen Molekülen wie Gallensäure oder Lecithin im wässrigen Medium im Magen und Darm emulgiert und auf diese Weise für eine anschließende Verseifung besser zugänglich. Ohne Tenside würden Öle und Fette sprichwörtlich „schwer im Magen liegen“.

Das Kapitel Lebensmittelchemie wird abgerundet, in dem die Zuckerersatzstoffe Saccharin und Cyclamat, der Ölersatzstoff Olestra und der Aromastoff Vanillin vorgestellt werden. Des Weiteren wird das Verfahren zur Entcoffeinierung von Kaffee mit überkritischem Kohlenstoffdioxid (inklusive dem Phasendiagramm von CO<sub>2</sub>) besprochen (Abb. oben links).

### Wasserchemie

„Wasser ist Menschenrecht“ – so lautet der Titel einer Aktion der Organisation Brot-für-die-Welt [15]. Die humanitäre Kampagne wird mit Bildern und Texten vorgestellt, bevor untersucht wird, was die Chemie mit dem Thema zu tun hat: Einerseits haben chemische Produktionen maßgeblich zur Wasserkontamination beigetragen – und tun das immer noch –, andererseits beruhen alle Verfahren der Abwasseraufbereitung und Trinkwassergewinnung auf chemischen Prinzipien. Diese werden im Seminar besprochen.

Zunächst werden die Verfahrensschritte zur Trinkwassergewinnung aus einem Süßwasser-Uferfiltrat beleuchtet:

- Chlorung oder Ozonisierung zur Desinfektion des Wassers
- Flockung und Sedimentation von Teilchen, die das Wasser trüben; Aktivkohle-Behandlung zur Entfernung gelöster organischer Wasserinhaltsstoffe
- pH-Wert-Korrektur
- ggf. Enthärtung des Wasser
- Sicherheitschlorung zur Konservierung

Anschließend werden anhand des Artikels „Handicap in der Wü-

ste“ aus der für Wissenschaftsjournalisten sehr wichtigen Zeitschrift *Spektrum der Wissenschaft* [16] die beiden gängigen Verfahren zur Trinkwassergewinnung aus Meerwasser vorgestellt:

- Destillation durch mehrstufige Entspannungsdampfung
- Entsalzung durch Umkehrosmose

Die zweite Hälfte des Seminars widmet sich der Aufbereitung von Abwasser. Zunächst werden Standard- und weitergehende Methoden der maßgeschneiderten Entgiftung von Industrieabwässern vorgestellt:

- Neutralisation
- Sulfat-, Phosphat- oder Fluorid-Fällung als Calciumsalze
- Fällung von Schwermetallen (Hydroxid-, Carbonat-, Sulfid-Fällung)
- Reduktive Entgiftung starker Oxidationsmittel wie Permanganat oder Chromat
- Oxidative Entgiftung von beispielsweise Nitrit, Cyanid oder Sulfid mit Wasserstoffperoxid
- Bleichen von Farbstoffen mit Hypochlorit oder Wasserstoffperoxid
- Adsorption organischer Wasserinhaltsstoffe an Aktivkohle
- Weitergehende Abwasserbehandlung mit Ozon, Wasserstoffperoxid, photohalbleitenden Titandioxid und UV-Licht

Danach wird die Funktion einer kommunalen Kläranlage erläutert:

- Aerobe mikrobiologische Umwandlung von organischen Kohlenstoffverbindungen in Kohlenstoffdioxid
- Aerobe mikrobiologische Umwandlung von organischen



Auch die Physik hilft: Trinkwasseraufbereitung 300 m<sup>3</sup>/h mit Ultrafiltration im Wasserwerk Grundmühle (Foto: W.E.T. GmbH / BILD-BY).

Stickstoffverbindungen in Nitrat (Nitrifikation)

- Anaerobe mikrobiologische Reduktion von Nitrat zu Distickstoff (Denitrifikation)

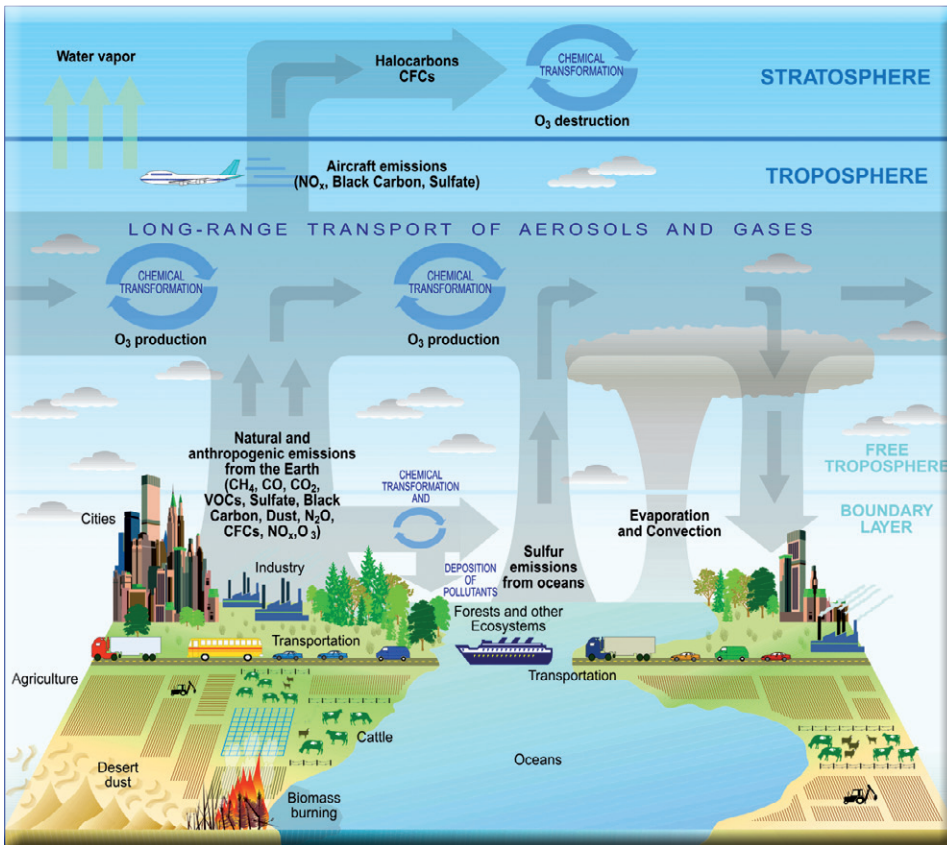
Schließlich wird noch kurz dargestellt, was mit den in kommunalen und industriellen Kläranlagen anfallenden *Schlämmen* je nach ihrer Art und Kontamination passiert:

- Lagerung auf einer Deponie
- Verwendung als Dünger
- Verbrennung mit Abgasreinigung (Gaswäsche oder -adsorption, Elektrofiltration)
- Vergärung zu Biogas (Methan)

Am Schluss dieser Seminareinheit lassen wir erneut *Soentgen* mit einem auch sprachlich sehr eindrucksvollen Text über „Lebendiges Wasser“ [5] zu Wort kommen, um noch einmal bewusst zu machen, dass Wasser in der Tat ein Lebenselixier ist, das es zu schützen gilt. Darüber sollten Wissenschaftsjournalisten immer wieder schreiben.

### Atmosphärenchemie

Treibhauseffekt, saurer Regen, Ozonloch, Smog – „dankbare“ Themen, über die Wissenschaftsjournalisten viel berichten können und müssen. Deshalb widmet sich eine Unterrichtseinheit der Atmosphärenchemie, um den Studierenden die erforderliche Fachkompetenz zu vermitteln (Abb. oben).



Chemische und Transportprozesse in der Atmosphäre (Abb.: U.S. Climate Change Science Program / Phillipe Recacewicz).

Nach einer Auflistung der Komponenten der Luft wird betont, dass die Kohlenstoffdioxid-Konzentration aufgrund zunehmender Verbrennung der fossilen Rohstoffe Kohle, Erdöl und -gas zwecks Energiegewinnung rapide zunimmt (*Keeling-Kurve*). Da im  $\text{CO}_2$ -Molekül verschiedene Schwingungen durch Infrarotlicht, das ist Wärmestrahlung, die von der Erdoberfläche ausgeht, angeregt werden, ist das Zustandekommen einer Erwärmung der Erdatmosphäre mit steigendem  $\text{CO}_2$ -Gehalt, die einem Treibhauseffekt ähnelt, verständlich.

*Flannery*, dessen Bücher [8] den Studierenden schon an anderer Stelle zum Lesen empfohlen wurden, zitiert das Gedicht eines Aborigines, in dem die Verbrennung von Kohle, Öl und Gas sinngemäß als eine makabre Art bezeichnet wird, wie wir mit unseren einst lebenden Vorfahren umgehen, und dass diese Vorgehensweise sich rächen und die Menschheit sich durch den von ihr erzeugten Klimawandel selbst vernichten könnte. *Flannery* schildert weiterhin, dass sich große Teile des Barrier-Riffs,

dessen Korallen hauptsächlich aus Calciumcarbonat bestehen, durch die verstärkte  $\text{CO}_2$ -Absorption im Meer bereits aufgelöst haben. Dazu haben die Studierenden im Praktikum einen Modellversuch durchgeführt.

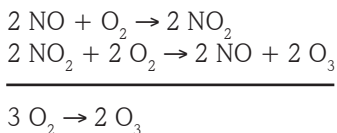
Im zweiten Seminarthema geht es um *sauren Regen*. Wenn schwefelhaltige Kohle verbrannt oder Metallsulfide geröstet werden, entsteht u. a. Schwefeldioxid. Gelangt dieses in die Luft, wird es vom Wind verweht, reagiert mit Sauerstoff weiter zu Schwefeltrioxid und dieses schließlich mit dem Wasserdampf der Luft zu Schwefelsäure. Diese gelangt beim nächsten Regen auf die Erde. Versauerte Seen und Böden können dann nur noch durch Kalken neutralisiert werden. Dabei lässt sich der Schwefelsäureeintrag in die Natur leicht unterbinden: Denn das bei den technischen Verbrennungsprozessen entstandene Schwefeldioxid muss nur durch einen alkalischen Wäscher geleitet werden und wird dabei unter Salzbildung aus dem Abgas entfernt. Nicht verhindert werden kann jedoch saurer Regen, der Salpeter-

säure enthält. Er entsteht nämlich bei Gewittern: Bei der elektrischen Glimmentladung werden die zweiatomigen Moleküle Distickstoff und Disauerstoff in ihre Atome „zerhackt“, die sich zu Stickstoffmonoxid neu kombinieren. Daraus entsteht (wie beim *Ostwald-Verfahren*, das die Studierenden aus der Erstsemester-Vorlesung kennen) durch Weiteroxidation Stickstoffdioxid, welches mit Wasser in der Luft zu Salpetersäure reagiert.

Ozon, dessen Struktur und Bindungsverhältnisse, Eigenschaften und Synthesen in Natur und Technik zunächst besprochen werden, spielt im Rahmen der Atmosphärenchemie eine doppelte Rolle. Die Ozonschicht in etwa 30 Kilometer Höhe über der Erdoberfläche schützt Mensch und Natur vor zu viel energiereicher UV- und kosmischer Strahlung. Unerwünscht ist Ozon hingegen, wenn es bei intensivem Autoverkehr und gleichzeitigem Sonnenschein als so genannter Photosmog entsteht und wegen seines hohen Oxidationspotenzials die Atemwege der Menschen gefährlich reizen kann. Dass insbesondere Dichlordifluorkohlenstoff,  $\text{F}_2\text{CCl}_2$ , die Ozonschicht über der Erde zerstört, war bei der Erfindung dieser halogenorganischen Verbindung und ihrer Anwendung als Kühl- und Treibmittel nicht zu ahnen. Doch dieser Stoff hat sich, einmal aus Sprühdosen und ausrangierten Kühlschränken entwichen, global in der Atmosphäre verteilt und in 30 Kilometern Höhe unter Einwirkung von UV-Strahlung in Radikale zersetzt. Chlorradikale wiederum bewirken eine katalytische Umwandlung von Ozon in Disauerstoff, und es entsteht ein Loch in der Ozonschicht. Nach dem Verwendungsverbot von Fluor-Chlor-Kohlenstoffen besteht berechnete Hoffnung, dass Ozon auf natürliche Weise recycelt wird und sich das Loch wieder schließt – vorausgesetzt es gelangen keine anderen ozonabbauenden Radikale in die Atmosphäre.

Das Thema Photosmog kam schon im Seminar „Chemie rund ums Auto“ zur Sprache. Jetzt werden die chemischen Zusammenhänge, die

zur Bildung von bodennahem Ozon führen, genauer beleuchtet: Im Motor des Autos wird Benzin verbrannt. Dabei wird es deutlich über 1000 °C heiß, so dass auch die Hauptkomponenten der Luft, Distickstoff und Disauerstoff miteinander reagieren. Das gebildete Stickstoffmonoxid verlässt dem Auspuff – sofern kein 3-Wege-Katalysator vorhanden ist –, kühlt sich ab und wird zu Stickstoffdioxid weiter oxidiert. Wenn nun die Sonne kräftig scheint, insbesondere um die Mittagszeit, kommt es zur Übertragung eines Sauerstoffatoms des Stickstoffdioxids auf ein Disauerstoff-Molekül, so dass Ozon entsteht und Stickstoffmonoxid übrig bleibt, erneut oxidiert wird und eine wiederholte lichtinduzierte Ozonsynthese bewirkt etc.



Eine erhebliche Luftbelastung und Gefahr für die Gesundheit stellen auch die vor allem von Dieselfahrzeugen verursachten Emissionen von nanopartikulärem Ruß dar. Diese können und müssen mit eingebauten Rußfiltern unterbunden werden.

### Nachwachsende Chemieprodukte

Unter nachwachsenden Chemieprodukten versteht man hauptsächlich solche, die aus Rohstoffen produziert werden, die auf die Syntheseleistung der Pflanzen zurückgehen (Abb. rechts). Man will damit insbesondere die knapper werdenden Erdölreserven schonen und auch neue Produkte erschließen, die aus den Zwischenprodukten der Petrochemie nicht zugänglich sind. Werden nachwachsende Chemieprodukte verbrannt, so wird damit idealerweise kein Beitrag zum Treibhauseffekt geleistet, weil die freigesetzten Kohlendioxidmenge zuvor der Atmosphäre bei der Photosynthese entzogen worden ist. Ein großes Thema im Kontext des Klimaschutzes und der Weltwirtschaft, das in der Ausbildung von

Wissenschaftsjournalisten seinen berechtigten Stellenwert hat.

Wir beginnen mit den so genannten nachwachsenden Kraftstoffen. Bei der anaeroben Vergärung von Zucker (aus Zuckerrohr oder -rüben) entsteht u. a. Ethanol, welches als Bioethanol dem klassischen Ottokraftstoff beigemischt bzw. diesen sogar komplett ersetzen kann. Die Triglyceride im Pflanzenöl können mit Methanol zu Fettsäuremethylestern und Glycerin umgeestert werden und dann als so genannter Biodiesel den konventionellen Diesellokraftstoff substituieren.

Dass bei der Verwertung von Bioethanol und Biodiesel Erdöl gespart wird, steht außer Zweifel. Ob diese Vorgehensweise aber insgesamt für die Menschheit und ihre Umwelt vorteilhaft ist, muss zumindest mit einem Fragezeichen versehen werden. Ein Kurzbericht aus der für Wissenschaftsjournalisten wichtigen Zeitschrift *Bild der Wissenschaft* [17], der an dieser Stelle im Unterricht gelesen wird, kommt zu dem Fazit, dass Biosprit dem Klima schade. Wenn Pflanzen nämlich nicht für die Ernährung der Bevölkerung sondern zum Verbrennen produziert werden, wird gerne überdüngt und werden im Übermaß Pflanzenschutzmittel eingesetzt, um den Ertrag zu steigern. Dabei wird übersehen oder sogar aus Profitgier ignoriert, dass die Böden und das Grundwasser kontaminiert werden. Bei überproportioniertem Einsatz von Stickstoffdüngern entsteht außerdem Lachgas, N<sub>2</sub>O, das ein über 300mal effektiveres Treibhausgas als CO<sub>2</sub> ist. Häufig werden Waldbestände abgeholzt, um Abbauf Flächen für Biokraftstoff zu erzeugen, was in Hinblick auf die erwünschte CO<sub>2</sub>-Bindung durch die Photosynthese kontraproduktiv ist. Außerdem bahnt sich eine neue Form von Kolonialismus an: Dritte-Welt-Länder produzieren Biosprit für die reichen Industrienationen und verlieren dadurch Boden, den sie für ihre eigene Ernährung dringend benötigen. Als Hausaufgabe lesen die Studierenden eine Untersuchung zur Ökobilanz von Bioethanol [18], um exemplarisch



Zu den nachwachsenden Rohstoffen gehört Sebacinsäure (Decandisäure, 1,8-Octandicarbonsäure); sie wird aus Rizinusöl gewonnen (Bild: Rizinuspflanze mit Blüten; eingefügt: Strukturformel von Sebacinsäure). Der Weltmarkt für Rizinusöl insgesamt beträgt jährlich ca. 600 000 Tonnen. Die Sebacinsäure gehört zur homologen Reihe der Dicarbonsäuren. Ihre Salze werden als Sebacate bezeichnet. Sie liegt damit zwischen der Azelainsäure und der Undecandisäure. Die Diester mit 2-Ethylhexanol und 1-Butanol finden Anwendung als Weichmacher für Kunststoffe, etwa der Sebacinsäuredibutylester. Sebacinsäure und besonders leicht ihr Dichlorid reagieren mit Hexamethylen-diamin (1,6-Diaminohexan) zu einem Polyamid, dem Nylon 6.10 (oder auch PA 6.10; Foto: Kickuth).

mit dieser Form einer wissenschaftlichen Dokumentation vertraut zu werden. Wissenschaftsjournalisten müssen das Thema nachwachsende Kraftstoffe unbedingt weiter verfolgen und Vor- und Nachteile kontrovers öffentlich diskutieren, um die Menschheit davor zu bewahren, dass sprichwörtlich der Teufel mit dem Beelzebub ausgetrieben wird.

Ein ganz anderes nachwachsendes Chemieprodukt ist Essgeschirr aus Stärke. Kartoffelstärke, ein Produkt der Photosynthese, kann z. B. zu einem Teller gepresst werden, auf dem in vielen Fast-Food-Restaurants Pommes mit Ketchup serviert

werden. Nach dem Mahl soll der gebrauchte Teller kompostiert und damit wieder in Biomasse verwandelt werden. Hier wird der große ökologische Vorteil von biologisch abbaubaren Makromolekülen ausgenutzt. Aber – fördern verrottbare Gegenstände die Wegwerfmentalität? Könnte man den benutzten Teller nicht auch einfach in den Wald statt auf den Komposthaufen schmeißen, wo er über kurz oder lang auch den Mikroorganismen zum Opfer fällt?

Sinnvoll ist es, dass einige Reststoffe aus der Lebensmittelindustrie eine zusätzliche Wertschöpfung erfahren: Aus Kokosnussschalen wird durch Dehydratisierung Aktivkohle als wichtiges Adsorbens gewonnen; aus den Schalen von Zitrusfrüchten können Terpene destilliert und als Lacklösemittel verwendet werden; aus Krabben- und Hummerschalen kann das Calciumcarbonat mit Salzsäure herausgelöst werden, so dass Chitin übrig bleibt, welches z. B. als Schwermetallbinder in der Abwassertechnologie geeignet ist.

Historisch gesehen wurden in der Kunststoffchemie besonders große Fortschritte erst erzielt, nachdem geeignete Grundbausteine, die aus der Erdölaufbereitung stammen, verfügbar waren. Wie wäre die Entwicklung verlaufen, wenn im ersten Drittel des letzten Jahrhunderts nicht ein Erölfeld nach dem anderen erschlossen worden wäre? Die Forscher hätten sich vermutlich mehr damit beschäftigt, Naturstoffe zu derivatisieren, um auf diese Weise Bausteine für Makromoleküle zu erzeugen. Mittlerweile wird diese Forschungsrichtung in Anbetracht des knapper werdenden Erdöls intensiv betrieben. Den Studierenden werden exemplarisch Möglichkeiten aufgezeigt, um aus Zuckern, Fetten und Ölen neue Makromoleküle zu synthetisieren:

- Entwässern von Fructose führt zu Hydroxymethylfurfural. Nach einer Weiteroxidation zur Furandicarbonsäure kann diese die erdölbasierende Terephthalsäure in Polyestern ersetzen.

- Dimerfettsäuren können anstelle konventioneller Oligoether oder -ester als Weichsegmente in Polyamiden oder Polycarbonaten zum Einsatz kommen.
- Neue Polyesterharze sind aus natürlichen Diolen, z. B. Ricinusöl, und mehrwertigen Säuren, z. B. Zitronensäure, zugänglich.
- Nach einer Epoxidierung der Doppelbindungen von ungesättigten Fettsäuren und anschließender Hydrolyse der Epoxide können die resultierenden Diole anstelle erölbasierender zur Synthese von Polyestern gelangen.
- Metathesereaktionen von ungesättigten Fettsäuren mit Ethen liefern Olefine, die aus Erdöl nicht zugänglich sind und die Polyolefinchemie bereichern können.

Ob die neuen Produkte Marktreife erlangen werden, bleibt abzuwarten.

## Pflanzenschutz

Rein rational betrachtet ist die Ernährung der Weltbevölkerung ohne den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln nicht möglich. Andererseits vermittelt insbesondere die Bio-Food-Welle den Eindruck, Insektizide, Herbizide und Fungizide seien Produkte des Teufels (Abb. rechte Seite). Wissenschaftsjournalisten können in diesem Meinungskonflikt moderierend wirken. Deshalb widmet sich eine Seminareinheit der historischen Entwicklung auf dem Sektor des chemischen Pflanzenschutzes. Das Thema ist auch wissenschaftstheoretisch interessant. Denn immer wieder hatten wohlgemeinte Entwicklungen negative Begleiterscheinungen. Überraschende Erkenntnisse wurden gewonnen, welche die Entwicklung weiterer Pflanzenschutzmittel maßgeblich beeinflussten. Im Einzelnen besprochen werden folgende Aspekte:

- DDT, Malaria, Persistenz und Resistenz
- Trichlorphenol-Derivate, Agent-Orange, Dioxin und Seveso
- Lindan und Kopfläuse
- Sevin und Bhopal

- Parathion und andere Phosphorsäureester
- Vorprodukte von Pflanzenschutzmitteln und Chemische Waffen
- Armer Borkenkäfer – ein Sexuallockstoff als tödliche Falle
- Von der Idee bis zur Großeinsatz – Entwicklungsstufen eines Pflanzenschutzmittels

Selbstverständlich wird erwähnt, dass sich moderner Pflanzenschutz nicht auf chemische Methoden beschränkt, sondern diese mit physikalischen (z. B. Einzäunung als Schutz vor Fressfeinden, Bejagung von solchen, Unkraut jäten), biologischen (Züchtung bestimmter Pflanzeigenschaften) und biotechnologischen (gentechnologisch veränderte Pflanzen) Verfahren kombiniert.

## Chemie und Medizin

Da die angehenden Wissenschaftsjournalisten in ihrem Studium auch eine Grundausbildung in Humanbiologie, Krankheitslehre, Pharmakologie und Toxikologie erhalten, passt dazu sehr gut eine Unterrichtseinheit über Arzneimittelchemie und sonstige chemische Methoden in der Medizin. Nach einer kurzen Einführung über allgemeine Möglichkeiten zur Krankheitsbekämpfung und zur generellen Funktion von Arzneimitteln wird die historische Entwicklung der Arzneimittelkunde aufgezeigt, die eng mit berühmten Persönlichkeiten verbunden ist.

*Hippokrates* betonte als erster die ethische Verantwortung des Mediziners und kann deshalb als Begründer der *Berufsethik* bezeichnet werden. (An dieser Stelle werden die Studierenden an ihr Bioethik-Seminar erinnert.)

*Galenus von Pergamon* ist der Namensgeber eines bedeutenden Zweiges der Pharmazie, der Galenik. Er machte sich Gedanken darüber, wie ein Wirkstoff am besten an seinen Wirkungsort gelangt und kann deshalb als ein Anwendungstechniker unter den Medizinern bezeichnet werden. Heute sind die gängigen Applikationsformen die Tablette, die Spritze, die Infusion,

die Salbe, die Tropfen, das Saft, das Spray, das Zäpfchen. Zu diesem Themenkomplex besprechen wir zusätzlich die „Verpackung“ von hydrophoben Wirkstoffen in Cyclo-dextrinen.

*Hildegard von Bingen* war wegweisend für die Suche nach Wirkstoffen im Pflanzenreich. Dieser Bereich der Medizin ist nach wie vor aktuell.

*Paracelsus* hat Ruhm erlangt durch seine Weisheit, dass es nur auf die Dosis ankomme, ob ein Stoff giftig ist oder nicht. Hierzu wiederholen wir, was wir im Seminar über Lebensmittelchemie über das Mineral Fluorid herausgefunden haben: Wenig Fluorid ist erforderlich zum Härten des Zahnschmelzes; chronischer Fluorid-Überschuss führt häufig zu Osteoporose; eine hohe Dosis Fluorid ist meistens tödlich, weil die Calciumionen im Blut als Calciumfluorid ausgefällt werden. *Paracelsus* hätte die erst etwa 10 Jahre alte Erkenntnis, dass Stickstoffmonoxid in sehr geringer Konzentration für den Menschen essentiell ist, grundsätzlich vorausgesagt. Bis zu dem Zeitpunkt war NO nur als gefährliches Atemgift bekannt; inzwischen weiß man, dass es auch ein Botenstoff ist. Dieser Befund hat die Entwicklung des Potenzmittels Viagra ermöglicht – eine für die Studierenden sehr aufschlussreiche Geschichte. *Paracelsus* hatte auch schon den Gedanken geäußert, dass es für jede Krankheit ein Gegenmittel gibt. Wie Recht er hat, wird den Studierenden an vier Beispielen verdeutlicht.

- Bei einer Kohlenstoffmonoxid-Vergiftung wird das am zentralen Eisen des Hämoglobins komplexierte CO mit Sauerstoff verdrängt, den der Patient unter einem Sauerstoffzelt in hoher Konzentration einatmet.
- Bei einer Schwermetallvergiftung haben sich die entsprechenden Kationen an funktionelle Gruppen lebenswichtiger Enzyme gebunden. Von dort können sie mit Hilfe von chelatisierend wirkenden Ligandmolekülen, die als Medikamente verabreicht werden,

wieder abgelöst werden (Chelatkomplextherapie).

- Sodabrennen ist auf eine Überproduktion von Salzsäure im Magen zurückzuführen. Die überschüssige Säure kann mit basischen Substanzen (Antacida), u. a. Magnesiumoxid, neutralisiert werden.
- Eine Methanolvergiftung wird u. a. mit relativ viel Ethanol behandelt, das der Patient trinken muss. Ethanol beschäftigt dessen Oxidationsenzyme so sehr, dass sie „nicht dazu kommen“, auch das Methanol zu Ameisensäure zu oxidieren, die sonst zu einer gegebenenfalls tödlichen Versauerung des Blutes führen könnte (kompetitive Enzymhemmung).

Anhand dieser Beispiele wird deutlich, welchen wissenschaftlichen Anspruch die Medizin hat: Sie will die molekularen Grundlagen der Krankheiten verstehen, um dann dagegen u. a. mit geeigneten chemischen Gegenmitteln vorzugehen. Ein Säureschaden wird mit einer Base behandelt, ein oxidativer Schaden mit einem Reduktionsmittel etc.

Als weitere Meilensteine der Medizin werden die Arbeiten von *Jenner* (Pockenschutzimpfung), *Sertürmer* (Reindarstellung von Morphin), *Koch* (Entdeckung von Milzbrand-, Cholera- und Tuberkulose-Bazillen), *Pasteur* (Tollwutimpfung), *Behring* (Entdeckung von Diphtherie- und Tetanus-Toxinen) und *Ehrlich* (Salvarsan) kurz gewürdigt.

Danach werden drei Arzneimittelklassen ausführlicher besprochen,

- Antibiotica (Penicilline, Sulfonamide)
- Starke Schmerzmittel (Morphin und seine Derivate und Antagonisten)
- Schwache Schmerzmittel (Aspirin, Paracetamol)

wobei auf das Erkennen von Leitstrukturen und chemische Möglichkeiten zu deren Eigenschaftsvariation großer Wert gelegt wird.

Auf die Bedeutung der Chiralität und Racemisierung bei Wirkstoffen wird am Beispiel des Thalidomids (Contergan) eingegangen.

Am Beispiel der Insulin-Produktion und einer Partialsynthese von Cortison wird aufgezeigt, welches großes Potenzial in der Gentechnik steckt, um neue Medikamente zu entwickeln und in größerer Menge zur Verfügung zu stellen.

Vom Cortison ausgehend wird die Grundstruktur der Steroide (Leitstruktur) beleuchtet und erklärt, wie manchmal nur geringe Molekülvariationen zu höchst unterschiedlichen Wirkstoffen führen: Gallensäure – ein Biotensid, Testosteron – ein Geschlechtshormon und Dopingmittel mit muskelaufbauender Wirkung, Ethinylestradiol – ein Ovulationshemmer, verwendet in der Anti-Baby-Pille.

Da der Weg von der Idee für ein neues Medikament bis zur kli-



Versprühung des Entlaubungsmittels Agent Orange im Mekong-Delta am 26. Juli 1969 (Foto: US-Army).

nischen Prüfung und Markteinführung sehr weit ist und lange Zeit in Anspruch nimmt, wird eine in den letzten Jahren häufig verwendete Strategie, um möglichst rasch neue Wirkstoffe zu finden, erläutert: die Kombinatorische Chemie, insbesondere unter Ausnutzung von Festphasensynthesen. Im vorletzten Seminarteil werden vielseitige andere Aspekte zum Thema Chemie und Medizin beleuchtet, wobei sich mühelos Querbeziehungen zu klassischen Inhalten des Chemieunterrichtes herstellen lassen:

- **Komplexchemie:** Einsatz von Platin-Komplexen in der Krebstherapie
- **Radiochemie:** Bestrahlungstherapie bei Krebs unter Ausnutzung des radioaktiven Zerfalls des Isotops Co-60
- **Spektroskopie:** NMR-Spektroskopie in der Diagnostik (Computertomographie)
- **Analytische Schnelltests:** Bestimmung von Blut-Parametern
- **Elektrochemie:** Elektrophoretische Enzymbestimmung im Blutserum
- **Biologisch abbaubare Polymere:** Chirurgisches Nähmaterial aus Polymilchsäure
- **Silicone:** Künstliche Gefäße, Kontaktlinsen oder Brustgele aus Polysiloxanen

Abschließend erfolgt eine Einführung in die Gedankenwelt der Homöopathie. Diese versucht einer Krankheit mit einem Mittel zu begegnen, das eine ähnliche Krankheit auslöst. Nach *Hahnemann* können nämlich zwei Reize, die große Ähnlichkeit miteinander haben, nicht nebeneinander im Körper bestehen, so dass der stärkere Reiz den schwächeren auslöscht. So schlägt *Hahnemann* z. B. Benzoesäure gegen Rheumatismus bzw. Ameisensäure gegen Allergien vor, Stoffe, welche die entsprechenden Beschwerden auch selbst auslösen.

Die Wirkung eines homöopathischen Stoffes soll durch Verdünnung (Vergrößerung der Oberfläche) steigen. Die Herstellung so genannter „Potenzen“ erfolgt z. B. durch Verdünnen des

(festen) Stammpreparates mit Milchzucker auf einen Massenanteil von 1:10 (D1), 1:100 (D2), 1:1000 (D3) etc. Die Verabreichung sehr kleiner Wirkstoffmengen ist auch für die Biochemie nach *Schüßler* charakteristisch. Diese basiert nicht auf dem Ähnlichkeitsprinzip, sondern geht davon aus, dass anorganische Salze wesentliche Bestandteile der Zellen sind, dass Verringerungen dieser Salze Krankheiten verursachen können und dass demzufolge Salzdefizite durch Zufuhr der entsprechenden Stoffe in homöopathischen Dosen behebbar sein sollten. Hier liegt ein Stein des Anstoßes. Man kann sich einfach nicht vorstellen, dass eine Arznei, die z. B. 1:1 000 000 000 000 (D12) verdünnt ist, noch effizient sein kann, zumal der Wirkstoff auch mit modernster Analytik nicht mehr nachgewiesen bzw. von den allgegenwärtigen Verunreinigungen (Rauschen) unterschieden werden kann. (Eine Verdünnung von D26 entspricht der eines Tropfens in allen Weltmeeren.) Um den Studierenden diese Problematik bewusst zu machen, eignet sich folgendes Experiment: Es werden verschiedene Potenzen des *Schüßler*-Salzes Kaliumiodid hergestellt und versucht, das Iodid mit Silbernitrat als schwerlösliches Silberiodid nachzuweisen, um herauszufinden, bei welcher Verdünnung die Nachweisgrenze liegt: Schon nicht mehr nachweisbar ist das Halogenid in D4 (zu *Schüssler*-Salzen siehe auch CLB 10/2008, Seiten 382-389). An die Besprechung der Versuchsergebnisse schließt sich eine kontroverse Diskussion über Möglichkeiten und Grenzen der Naturheilkunde im Vergleich zur Schulmedizin an. Wenn ein Stoff nicht nachweisbar ist, heißt das nicht unbedingt, dass er nicht vorhanden ist. Kann es dann nicht auch sein, dass er eine Wirkung zeigt, vergleichbar einem Katalysator? Für einige homöopathische und *Schüßler*-Mittel wurden nämlich signifikante Wirkungen nachgewiesen, die über den Placeboeffekt hinausgehen, für andere hingegen nicht. Wirkungsmechanismen sind

kaum bekannt. Dies macht den Schulmediziner stutzig. Er will nämlich – wie oben gesagt – chemische Prozesse bei einer Krankheit und ihrer Therapie mit naturwissenschaftlichen Gesetzen beschreiben. Ist Homöopathie also Glaubenssache, oder ist die Wissenschaft nur noch nicht so weit, in ihrem Sinne die verschiedenen Naturheilverfahren zu verstehen?

## Drogen und Doping

Der Übergang vom Thema „Chemie und Medizin“ zum Thema „Drogen und Doping“ ist fließend. Denn Drogen und Dopingmittel wirken ähnlich wie Medikamente, und häufig werden solche als Drogen oder zum Doping missbraucht. Über Drogenhandel, -konsum und -tote sowie über Dopingsünder und -fahnder und seit einiger Zeit auch über Hirn-Doping hört, sieht und liest man ständig etwas in den Medien. Ein großes Thema also für Wissenschaftsjournalisten – und voller chemischer Gesichtspunkte.

Wir beginnen mit der Doping-Definition des IOCs, berichten über Doping in der Antike, erste Dopingfälle in der Neuzeit, Doping in der DDR, prominente Dopingfälle der letzten Jahre und behandeln dann auf Basis einiger Publikationen [19-22] folgende Themen:

- Testosteron & Co – Muskelaufbau und Vermännlichung
- Kreatin – Supplementierung oder Doping?
- Carnitin – der Wahnsinn beim Bodybuilding
- Nimmermüde – die Stimulanzien Adrenalin, Amphetamin, Ephedrin und Ecstasy
- Coffein – der akzeptierte Muntermacher
- Opioide – die harten Drogen, ihre Ersatzstoffe und Antagonisten
- EPO – Blut- und Gendoping
- Ritalin, Modafinil & Co. – Hirndoping für eine Eins in der Klausur

## Nanotechnologie

Dem Herstellen von und Arbeiten mit Materialien, deren Einzelteilen von Umfang und Länge her nicht größerer als 100 Nanometer sind und für die nicht mehr

die Gesetze der makroskopischen Welt, sondern die der Quantenphysik gelten, wird ein besonderes Innovations- und Zukunftspotenzial zugeschrieben. Gleichzeitig gibt es viele Stimmen, die vor möglichen Gefahren warnen, die gerade von so kleinen Teilchen ausgehen können. Diese Stimmen berufen sich beispielsweise auf Erfahrungen mit Asbest, pyrogener Kieselsäure oder Ruß, also Materialien, die zwar hervorragende anwendungstechnische Eigenschaften haben, gleichzeitig wegen ihrer Kleinheit aber auch lungenzerstörend und krebserzeugend wirken. Da aus der Forschung und Technik fast täglich über neue Nanomaterialien berichtet wird, sollten sich die angehenden Wissenschaftsjournalisten bereits in ihrem Studium damit befassen haben.

Zunächst wird an Beispielen verdeutlicht, in welcher Hinsicht

- Mechanik
- Oberflächenaktivität
- Reologisches Verhalten
- Optik

sich nanopartikuläre Materialien besonders auszeichnen. Als analytische Methode zur Charakterisierung der „Winzlinge“ – 1 Nanometer verhält sich zu 1 Meter etwa so wie der Durchmesser einer Haselnuss zum Durchmesser der Erde – wird exemplarisch die Rasterkraftmikroskopie besprochen.

Danach werden typische Anwendungen von Nanomaterialien und Verfahren zu ihrer Herstellung präsentiert:

- Selbstreinigende Oberflächen, dem Lotus-Effekt abgeschaut
- Ionenimplantation; Titanitrid in der Medizintechnik, z. B. künstliches Kniegelenk
- Sonderkeramiken für kratzfeste Glasbeschichtungen (Scanner) oder nanoporöse Filter
- Oberflächenveredlung, durch Gasphasenabscheidung, den Sol-Gel-Prozess oder die Langmuir-Blodgett-Beschichtung
- Magnetische Flüssigkeiten zur gezielten Tumorbekämpfung
- Molekulare Elektronik – Wie fließt Strom durch ein einzelnes Molekül?

- Verstärkende Füllstoffe (Kohlenstoff-Nanoröhren) [23]
- Neue Halbleiter für die Mikroelektronik (Kohlenstoff-Nanoröhren) [23]
- Effektpigmente und Perlglanzpigmente – Farbe ohne Farbstoff
- Sonnenschutz durch nano-Titan-dioxid
- Antibakterielle Oberflächen mit nano-Silber

#### Literatur

- [1] A. Arni: Verständliche Chemie für Basisunterricht und Selbststudium. – 2. Aufl., Wiley-VCH, Weinheim 2003
- [2] D. Stoltzenberg: Fritz Haber – Chemiker, Nobelpreisträger, Deutscher, Jude. – Wiley-VCH, Weinheim 1998
- [3] U. Deichmann: Flüchten, Mitmachen, Vergessen – Chemiker und Biochemiker in der NS-Zeit. – Wiley-VCH, Weinheim 2001
- [4] H. Martin: Polymere und Patente – Karl Ziegler, das Team, 1953-1998. – Wiley-VCH, Weinheim 2001
- [5] J. Soentgen: Die sinnliche Stoffe-fahrung und ihre Bedeutung für den Chemieunterricht. – Staatsexamenarbeit, Universität Frankfurt 1993
- [6] J. Soentgen: Chemie und Liebe: ein Gleichnis – Die Chemie als Schlüssel zu den „Wahlverwandtschaften“ von Goethe. – Chemie in unserer Zeit 30 (1996), Heft 6, S. 295-299
- [7] J. Neffe: Darwin – Das Abenteuer des Lebens. – 2. Aufl., Bertelsmann-Verlag, München 2008
- [8] T. Flannery: Wir Wettermacher. – Fischer-Verlag, Frankfurt 2006; T. Flannery: Wir Klimakiller – Wie wir die Erde retten können. – Fischer Taschenbuch Verlag, Frankfurt 2007
- [9] I. Parchmann, R. Demuth, B. Ralle, A. Paschmann, H. Huntemann: Chemie im Kontext. – Praxis der Naturwissenschaften / Chemie in der Schule (PdN-ChiS) 50 (2001), Heft 1, S. 2-8
- [10] S. Satyapal, J. Petrovic, G. Thomas: Volltanks mit Wasserstoff. – Spektrum der Wissenschaft 2007, Heft 7, S. 80-87
- [11] K. Lucas, VDI-Nachrichten, 24.5.1991
- [12] V. Wiskamp: Das Wunder des Lebens – Gedanken zu einer Biochemie-Vorlesung. – Shaker Verlag, Aachen 2008, S. 19-22
- [13] V. Wiskamp, H.-L. Krauß: Chemie macht Sinn – Thermodynamik, Entropie und Chemisches Weltbild. – Chemie & Schule 22 (2007), Heft 1, S. 22-25
- [14] P. Levi: Das Periodische System. – 5. Aufl., Deutscher Taschenbuchverlag, München 2002, S. 241-250
- [15] F. Kürschner-Pelkmann, D. Scher, B. Wiesmeier: 10 Fragen zum Menschenrecht auf Wasser. – Brot für die Welt, Stuttgart, S. 11 (bzw.: Eine Welt 2002, Heft 2, S. 13f); www.menschenrecht-wasser.de
- [16] M. Fischetti, K.-D. Linsmeier: Handikap in der Wüste – Meerwasserentsalzung. – Spektrum der Wissenschaft 2008, Heft 5, S. 96-97
- [17] Nachrichtlich: Biosprit schadet dem Klima. – Bild der Wissenschaft 2008, Heft 5, S. 9
- [18] D. Bernhardt: Ökobilanz von Bioethanol. – Germanwatch e. V., Berlin 2006, <http://www.germanwatch.org/handel/eth06.htm>
- [19] V. Wiskamp, M. Holfeld, W. Prose: Chemie und Gesundheit. – Praxis Schriftreihe Chemie, Band 56, Aulis Verlag Deubner, Köln 2005
- [20] V. Wiskamp, M. Holfeld, H. Gebelein: Chemie und Sport. – Praxis Schriftreihe Chemie, Band 57, Aulis Verlag Deubner, Köln 2005
- [21] S. Schleim: Neuro-Enhancement – Schöne neue Doping-Welt? – Spektrum der Wissenschaft 2008, Heft 11, S. 134-137
- [22] V. Wiskamp, M. Holfeld: Hirndoping. – Chemie in Labor und Biotechnik 60 (2009), Heft 5, S. 183-186
- [23] A. K. Geim, P. Kim: Wunderstoff aus dem Bleistift. – Spektrum der Wissenschaft 2008, Heft 8, S. 86-93

#### Der Autor:

Dr. Volker

Wiskamp ist Professor für Chemie an der Hochschule Darmstadt. Seine Hauptarbeitsgebiete sind fächerverbindender und interdisziplinärer Unterricht, Bildungspartnerschaften zwischen Schule, Hochschule und Industrie, Hochbegabten-Förderung sowie Experimentalunterricht.



# Halbleiter in Naturwissenschaft und Technik

Mehrere richtige Antworten pro Frage sind möglich.

- 1** Wer schuf die Grundlagen, um die elektrische Leitfähigkeit eines Gegenstands zu bestimmen?  
**A** Stephen Gray.  
**B** Georg Simon Ohm.  
**C** Ferdinand Braun.  
**D** Greenleaf Whittier Pickard.  
**E** Walter Schottky.
- 2** Grundsätzlich als Halbleiter verwendbar sind ...  
**A** manche Metalle oder Halbm-  
metalle, elementar.  
**B** alle Nichtmetalle, elementar.  
**C** manche organischen Verbind-  
ungen.  
**D** nur Metalle, elementar.  
**E** manche Verbindungen von  
Metallen mit Nichtmetallen.
- 3** In der Nähe des absoluten  
Temperaturnullpunkts sind  
Halbleiter ...  
**A** Isolatoren.  
**B** Leiter.  
**C** Nichtleiter.  
**D** Heißleiter.  
**E** Kaltleiter.
- 4** In welcher Form werden  
Halbleiter verwendet?  
**A** Als amorphe Festkörper.  
**B** In Lösung.  
**C** Als Einkristall.  
**D** Als Polykristall.  
**E** Gasförmig.
- 5** Unter welchen Bedingungen  
ist ein Material als Halbleiter zu  
bezeichnen? Wenn der spezifische  
elektrische Widerstand ...  
**A** kleiner als  $10^{-4} \Omega \cdot m$  ist.  
**B** größer als  $10^{-4} \Omega \cdot m$  ist.  
**C** zwischen  $10^{-4} \Omega \cdot m$  und  $10^{-6}$   
liegt.  
**D** zwischen  $10^{-4} \Omega \cdot m$  und  $10^6$   
liegt.  
**E** größer als als  $10^6 \Omega \cdot m$  ist.
- 6** Welche Verbindung ist ein  
II-VI-Verbindungshalbleiter?  
**A** GaAs.  
**B** ZnSe.  
**C** InSb.
- 7** Welche Halbleiter kristallisieren  
in einer Diamantstruktur?  
**A** GaP.  
**B** ZnS.  
**C** Si.  
**D** Ge.  
**E** CdTe.
- 8** Welche Elemente werden nur  
unter erhöhtem Druck halblei-  
tend?  
**A** Bi.  
**B** Ca.  
**C** B.  
**D** S.  
**E** P.
- 9** Nach einer n-Dotierung ...  
**A** hat ein Halbleitergitter zusätz-  
liche Elektronen.  
**B** fehlen einem Halbleitergitter  
Elektronen.  
**C** ist die Leitfähigkeit erhöht.  
**D** ist die Leitfähigkeit erniedrigt.  
**E** ändert sich die Leitfähigkeit  
nicht.
- 10** Welche Elemente dienen zur  
p-Dotierung von Si?  
**A** B.  
**B** P.  
**C** In.  
**D** As.  
**E** Al.
- 11** Welches sind typische Konzen-  
trationen von Si-Halbleitern für  
eine starke Dotierung?  
**A** 1 Donator pro  $10^{10}$  Si-Atome.  
**B** 1 Akzeptor pro  $10^8$  Si-Atome.  
**C** 1 Donator pro  $10^6$  Si-Atome.  
**D** 1 Akzeptor pro  $10^4$  Si-Atome.  
**E** 1 Akzeptor pro  $10^2$  Si-Atome.
- 12** Welche Aussage trifft auf  
organische Materialien zu?  
**A** Sie sind im Allgemeinen  
elektrisch leitend.  
**B** Systeme mit einer konjugierten  
Struktur können den elektrischen  
Strom leiten.
- 13** Bei welchem organischem  
Stoff wurde als erstes elektrische  
Leitfähigkeit beobachtet?  
**A** Benzen.  
**B** Naphthalin.  
**C** Polyacetylen.  
**D** Polyanilin.  
**E** Pentacen.
- 14** Lässt sich nichtleitender  
Kunststoff leitend machen?  
**A** Nein.  
**B** Ja, durch Dotierung mit Cl.  
**C** Ja, durch Dotierung mit Na.  
**D** Ja, durch Dotierung mit Br.  
**E** Ja, durch Dotierung mit Si.
- 15** Was trifft auf den Begriff  
Thermistor zu?  
**A** Thermistor ist eine Abkürzung.  
**B** Thermistor steht für Kaltleiter.  
**C** Thermistor steht für Heißleiter.  
**D** Thermistor ist griechisch und  
bedeutet thermisch leitend.  
**E** Thermistor steht für Heiß- und  
Kaltleiter.
- 16** Was trifft auf den inneren  
photoelektrischen Effekt zu?  
**A** Er wurde im 19. Jahrhundert  
entdeckt.  
**B** Albert Einstein hat ihn 1905  
quantenphysikalisch gedeutet.  
**C** Er ist Grundlage von Photowi-  
derständen in Dämmerungsschal-  
tern und Lichtschranken.  
**D** Er ist umsetzbar mit Halbleiter-  
materialien wie CdS.  
**E** Er ist Grundlage von Photozel-  
len und der Photoelektronenmi-  
kroskopie.



# Bezugsquellenverzeichnis

## ANALYSEN

Analytische Laboratorien  
Prof. Dr. H. Malissa u. G. Reuter GmbH  
Postfach 1106, D-51779 LINDLAR  
Tel. 02266 4745-0, Fax 02266 4745-19

Ilse Beetz  
Mikroanalytisches Laboratorium  
Postfach 1164, D-96301 Kronach  
Industriestr. 10, D-96317 Kronach  
Tel. 09261 2426, Fax 09261 92376

## ARBEITSSCHUTZARTIKEL



Roth GmbH + Co. KG  
Postfach 10 01 21  
D-76231 Karlsruhe  
Tel. 0721 56060

## CHEMIKALIEN



Roth GmbH + Co. KG  
Postfach 10 01 21  
D-76231 Karlsruhe  
Tel. 0721 56060

**GERBU** Biotechnik GmbH  
Am Kirchwald 6, D-69251 Gaiberg  
Tel. 06223 9513 0, Fax: 06223 9513 19  
www.gerbu.de, E-mail: gerbu@t-online.de

## DEUTERIUMLAMPEN



06151/88 06-0  
Fax 06151/89 66 67  
www.LOT-Oriel.com

## DICHTUNGSSCHEIBEN AUS GUMMI MIT AUFVULKANISierter PTFE-FOLIE

GUMMI WÖHLEKE GmbH  
Siemensstr. 25, D-31135 Hildesheim  
Teletex 5 121 845 GUMWOE  
Tel. 05121 7825-0

## FTIR-SPEKTROMETER-ZUBEHÖR



06151/88 06-0  
Fax 06151/89 66 67  
www.LOT-Oriel.com

## GEFRIERTROCKNER

Zirbus technology  
D-37539 Bad Grund  
Tel. 05327 8380-0, Fax 05327 8380-80  
Internet: http://www.zirbus.de

## GEFRIERTROCKNUNGSANLAGEN



Martin Christ GmbH  
Postfach 1713  
D-37507 Osterode/Harz  
Tel. 05522 5007-0  
Fax 05522 5007-12

## HOHLKATHODENLAMPEN



06151/88 06-0  
Fax 06151/89 66 67  
www.LOT-Oriel.com

## KÜHL- UND TIEFKÜHLGERÄTE



Föhrenstr. 12  
D-78532 Tuttlingen  
Tel. 07461 705-0, Fax 07461 705-125  
www.hettichlab.com  
info@hettichlab.com

## KÜVETTEN

Hellma GmbH & Co. KG  
Postfach 1163  
D-79371 Müllheim  
Tel. 07631 182-0  
Fax 07631 135-46  
www.hellma-worldwide.com  
aus Glas, Spezialgläser, Quarzgläser

## LABORCHEMIKALIEN



Roth GmbH + Co. KG  
Postfach 10 01 21  
D-76231 Karlsruhe  
Tel. 0721 56060

## LABOREINRICHTUNGEN

Wesemann GmbH & Co. KG  
Postfach 1461, D-28848 Syke  
Tel. 04242 594-0, Fax 04242 594-222  
http://www.wesemann.com

## LABORHILFSMITTEL



Roth GmbH + Co. KG  
Postfach 10 01 21  
D-76231 Karlsruhe  
Tel. 0721 56060

## LABOR-SCHLÄUCHE UND -STOPFEN AUS GUMMI

GUMMI WÖHLEKE GmbH  
Siemensstr. 25, D-31135 Hildesheim  
TeleTex 5121845 GUMWOE  
Tel. 05121 7825-0

## LABORZENTRIFUGEN, KÜHLZENTRIFUGEN



Föhrenstr. 12  
D-78532 Tuttlingen  
Tel. 07461 705-0, Fax 07461 705-125  
www.hettichlab.com  
info@hettichlab.com



Sigma Laborzentrifugen GmbH  
Postfach 1713  
D-37507 Osterode/Harz  
Tel. 05522 5007-0  
Fax 05522 5007-12

## LEITFÄHIGKEITS-MESSGERÄTE



HANNA Instruments  
Deutschland GmbH  
Lazarus-Mannheimer-Straße 2-6  
D-77694 Kehl am Rhein  
Tel. 07851 9129-0 Fax 07851 9129-99

## MIKROSKOPE



Labor- und Routine-  
Mikroskope  
Stereolupen und  
Stereomikroskope

Helmut Hund GmbH  
Postfach 1669 · 35526 Wetzlar  
Telefon: (0 64 41) 20 04-0  
Telefax: (0 64 41) 20 04-44

OLYMPUS OPTICAL CO.  
(EUROPA) GMBH  
Produktgruppe Mikroskope  
Wendenstr. 14-18  
D-20097 Hamburg  
Tel. 040 237730  
Fax 040 230817  
email: microscopy@olympus-europa.com

Große  
Anzeigen zu  
teuer? Hier  
kostet ein  
Eintrag nur  
6 Euro pro  
Zeile, ein  
Millimeter  
pro Spalte  
3 Euro!

## Bezugsquellenverzeichnis

### OPTISCHE TAUCHSONDEN

Hellma GmbH & Co. KG  
Postfach 1163  
D-79371 Müllheim  
Tel. 07631 182-0  
Fax 07631 135-46  
www.hellma-worldwide.com  
aus Glas, Speziallaser, Quarzgläser

### PARTIKELANALYSE



☎ 0 61 51/88 06-0  
Fax 0 61 51/89 66 67  
www.LOT-Oriel.com

### PH-MESSGERÄTE



HANNA Instruments  
Deutschland GmbH  
Lazarus-Mannheimer-Straße 2-6  
D-77694 Kehl am Rhein  
Tel. 07851 9129-0 Fax 07851 9129-99

### REINIGUNGSMITTEL FÜR LABORGLAS



Roth GmbH + Co. KG  
Postfach 10 01 21  
D-76231 Karlsruhe  
Tel. 0721 56060

### SAUERSTOFF-MESSGERÄTE



HANNA Instruments  
Deutschland GmbH  
Lazarus-Mannheimer-Straße 2-6  
D-77694 Kehl am Rhein  
Tel. 07851 9129-0 Fax 07851 9129-99

### STERILISATOREN

Zirbus technology  
D-37539 Bad Grund  
Tel. 05327 8380-0, Fax 05327 838080  
Internet: <http://www.zirbus.de>

### TEMPERATUR-MESSGERÄTE

Amarell GmbH & Co KG  
D-97889 Kreuzwertheim  
Postfach 1280  
Tel. 09342 9283-0  
Fax 99342 39860



### TEMPERATUR-MESSGERÄTE



HANNA Instruments  
Deutschland GmbH  
Lazarus-Mannheimer-Straße 2-6  
D-77694 Kehl am Rhein  
Tel. 07851 9129-0 Fax 07851 9129-99

### THERMOMETER

Amarell GmbH & Co KG  
D-97889 Kreuzwertheim  
Postfach 1280  
Tel. 09342 9283-0  
Fax 99342 39860



### VAKUUMKONZENTRATOREN

Zirbus technology  
D-37539 Bad Grund  
Tel. 05327 8380-0, Fax 05327 838080  
Internet: <http://www.zirbus.de>

## CLB-Geschichte

Fortsetzung von Umschlagseite 3

Chemie und Praxis der Kunststoffe

27

Durch diese Vernetzung entsteht aus den ursprünglichen Fadenmolekülen ein dreidimensionales Netzmolekül, was sich, wie in einem späteren Kapitel noch näher erläutert werden wird, in einer technisch bedeutungsvollen Eigenschaftswandlung auch nach außen bemerkbar macht. Hierzu genügen schon geringe Vernetzungsgrade und sogar einfache Kettenverzweigungen können, wenn sie in stärkerem Maße auftreten, die Eigenschaften des Polymerisates merkbar beeinflussen.

#### Technische Polymerisation

Technisch wird die Polymerisation so durchgeführt, daß man das Monomere nach Zufügung des Katalysators erwärmt. Nach einer kurzen Induktionszeit setzt die Polymerisation ein, und es muß nun für eine gute Abführung der Polymerisationswärme gesorgt werden, da anderenfalls die Reaktion sogar explosionsartig durchgehen kann bzw. unregelmäßig wird und ein minderwertiges Polymerisat von sehr schwankendem Molekulargewicht erhalten wird. Da bei diesem Verfahren der Polymerisationsansatz immer zäher wird und schließlich sogar zu einem festen Block erstarrt, spricht man hier von „Blockpolymerisation“. Technisch ist dieses Verfahren nicht leicht durchzuführen, da die Ableitung der Reaktionswärme Schwierigkeiten bereitet; es ist daher auf relativ kleine Ansätze beschränkt.

Keine Schwierigkeiten macht die Wärmeableitung bei der sog. Lösungspolymerisation. Hier wird das Monomere in einem Lösungsmittel gelöst und darin nach Katalysatorzusatz polymerisiert. Dadurch daß das entstehende Polymere in Lösung bleibt, kann bis zum Schluß gut gerührt und dabei die Wärme an einen Kühlmantel gut nach außen abgeführt werden. Das Verfahren ist aber teuer, außerdem ist es schwierig, das Lösungsmittel von dem Polymeren restlos abzutrennen, auch sind die Polymerisate nicht sehr hochmolekular.

Das bevorzugte Verfahren ist heute die Emulsionspolymerisation. Das Monomere wird in Wasser mit Hilfe eines Emulgators emulgiert, mit einem wasserlöslichen Katalysator und eventuell auch mit einem Regler versetzt und anschließend unter Rühren polymerisiert. Da die Viskosität der Emulsion sich dabei kaum ändert, kann von Anfang bis Schluß gut gerührt werden, die auftretende Wärme wird an einen Kühlmantel abgegeben. Die gleichmäßige Temperaturverteilung über den ganzen Ansatz gewährleistet ein weitgehend homogenes Polymerisat, das in kolloider Verteilung anfällt und durch Koagulation oder Eindampfen

28

Chemie und Praxis der Kunststoffe

vom Wasser abgetrennt werden kann. Notwendig ist ein gutes Auswaschen, um die Zusatzstoffe (Emulgatoren, Regler, Schutzkolloide) möglichst weitgehend zu entfernen. Die Emulsionspolymerisation läßt sich auch kontinuierlich gestalten.

Ebenfalls in wäßriger Emulsion arbeitet die Perlpolymerisation, nur mit dem einen Unterschied, daß hierbei ein Katalysator verwendet wird, der nicht in Wasser, sondern im Monomeren löslich ist. Die Polymerisation setzt also innerhalb der einzelnen Tröpfchen selbst ein, wobei die Wärme an das umgebende Wasser abgeführt wird. Die Polymerisatteilchen haben also nahezu die gleiche Größe (von einer geringen Kontraktion durch die Dichtezunahme abgesehen) wie die Monomeren-tröpfchen und scheiden sich als feste Perlen ab, die sich absetzen, gewaschen und getrocknet werden. Demgegenüber haben die Polymerisatteilchen bei der Emulsionspolymerisation nur ca.  $\frac{1}{1000}$  des Durchmessers der Monomeren-tröpfchen, da hier die Polymerisation im wäßrigen Medium vor sich geht, wo die Monomerenkonzentration infolge der äußerst geringen Löslichkeit des Monomeren in Wasser sehr klein ist. Die Polymerisatteilchen scheiden sich daher in kolloidaler Feinheit aus und bleiben im Wasser schweben.

**Tabelle 1**

**Tabelle 2**

Monomeres	Formel	Umwandlungszeit*
Äthylen Vinylverbindungen	$\text{CH}_2 = \text{CH}_2$ $\text{CH}_2 = \text{CHR}$ (R = $\text{C}_6\text{H}_5$ , Cl, OCO · $\text{CH}_3$ , COOR, CN)	stabil bis 700° Stunden bei 100°
Butadien Diästylen Vinylacetylen	$\text{CH}_2 = \text{CH} - \text{CH} = \text{CH}_2$ $\text{CH}_2 = \text{C}(\text{CN}) = \text{CH} - \text{CH}_2$ $\text{CH}_2 = \text{CH} - \text{C} \equiv \text{CH}$	Wochen bei 100° Minuten bei 0° Stunden bei 50°

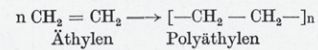
\* Zeit, nach der die Hälfte des Monomeren in Polymeres umgewandelt ist.  
Nach Houtwink: Grundriss der Technologie der synthetischen Hochmolekularen.

gehörenden Kunststoffe deshalb vollsynthetische. Die organische Chemie bietet zu dieser Synthese drei Wege:

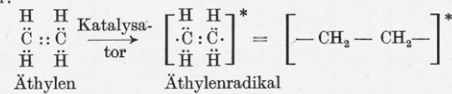
- Die Polymerisation,
- Die Polykondensation,
- Die Polyaddition.

*Polymerisation*

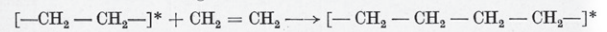
Unter Polymerisation verstehen wir den Zusammentritt von zwei, mehreren oder vielen ungesättigten, d.h. Doppel- oder Dreifachbindungen enthaltenden Molekülen dadurch, daß die ungesättigten Bindungen aufgerichtet werden und sich gegenseitig unter Bildung eines entsprechend größeren Moleküles absättigen. Die Polymerisation ist also dadurch gekennzeichnet, daß der Sättigungsgrad zunimmt, das polymere Molekül die gleiche Bruttozusammensetzung wie das eingesetzte monomere hat, und daß im Verlaufe der Polymerisation keine niedermolekularen Nebenprodukte entstehen. Der einfachste Fall ist dieser:



Die Polymerisation wird durch Katalysatoren (z. B. Peroxyde) eingeleitet. Diese haben die Aufgabe, einzelne monomere Moleküle<sup>2)</sup> zu aktivieren, d.h. deren Doppelbindungen unter Radikalbildung aufzurichten:

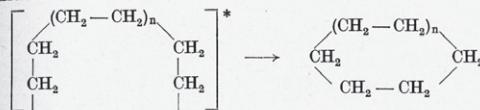


Diese sogenannte Startreaktion ist endotherm, die notwendige Energie muß zugeführt werden, z. B. durch Erwärmen, Bestrahlen mit energiereichen Lichtquanten (UV-Licht) u. ä. Der gebildete Polymerisationskeim (Radikal mit zwei einsamen Elektronen, die Außenelektronen der Atome sind in der Formel durch Punkte bezeichnet) ist als solcher nicht lebensfähig, sondern lagert sofort ein inaktives monomeres Molekül unter erneuter Radikalbildung an:

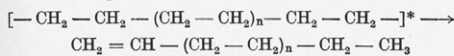


<sup>2)</sup> Als Monomere bezeichnet man Stoffe, deren Moleküle eine gewisse Selbständigkeit besitzen, nicht wie bei den Polymeren zu Makromolekülen vereinigt sind.

Diese Folgereaktion geht nun durch Paarung der einsamen Elektronen unter Bildung einer C—C Hauptvalenz exotherm weiter, bis keine monomeren Moleküle mehr zur Verfügung stehen oder schon vorzeitig die Reaktion zum Stillstand kommt, indem durch Kettenabbruchreaktionen Radikale vernichtet werden. Als Abbruchreaktionen kommen Ringschlüsse



**Wasserstoffwanderung**

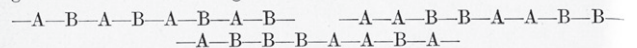


und schließlich auch Umsetzungen mit Fremdstoffen (Sauerstoff, Wasser) in Frage.

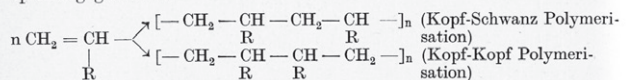
Es leuchtet ein, daß der Polymerisationsgrad, d.h. die Anzahl der Monomeren im polymeren Molekül davon abhängig ist, an wieviel Stellen die Startreaktion einsetzt, wie hoch also die Katalysatorkonzentration ist. Sehr viele Startstellen bewirken bei gegebener Anzahl von monomeren Molekülen einen niedrigen Polymerisationsgrad. Es muß allerdings noch darauf hingewiesen werden, daß das Polymerisat als Folge der verschiedensten Abbruchreaktionen aus Molekülen verschiedenen Polymerisationsgrades besteht, d.h. also „polymerhomolog“ ist. Die Polymerisationsfreudigkeit der einzelnen Monomeren ist nun sehr verschieden und hängt weitgehend von der Stellung und der Zahl der Doppelbindungen im Molekül und der Art und der Stellung von Substituenten ab. Doch kann hier die Theorie der Polymerisation nur in großen Zügen skizziert werden, daher soll folgende Tabelle die Unterschiede in der Polymerisationsfreudigkeit nur als Tatsache ohne nähere Begründung bringen (siehe Tabelle 2, Seite 23).

Interessant ist, daß monomere Moleküle nicht nur mit gleichartigen, sondern auch mit anderen Monomeren polymerisiert werden können, selbst wenn diese für sich allein gar nicht polymerisationsfähig sind. Technisch macht man von dieser „Mischpolymerisation“ sehr viel Gebrauch, und es liegt auf der Hand, daß hierdurch eine große Zahl von Polymerisaten herstellbar ist, besonders wenn man beachtet, daß auch

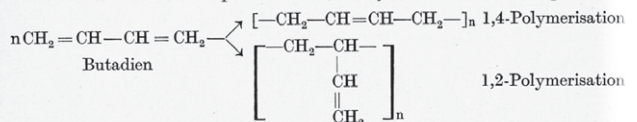
bei gleichem Ansatzverhältnis der Monomeren A und B das erhaltene Polymerisat ganz verschieden aufgebaut sein kann, indem die Monomeren geordnet oder wahllos eingebaut werden, z. B.:



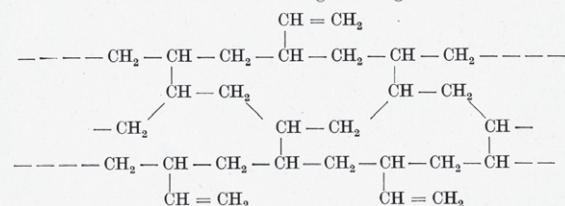
Aber auch bei der Polymerisation eines einzigen Monomeren (Isopolymerisation) gibt es Isomeriemöglichkeiten, von denen hier nur ein Beispiel angegeben sei:



In der Praxis wird nie die eine oder andere Form rein vorliegen, sondern es wird stets ein Gemisch aus allen Polymerisationsmöglichkeiten das Polymerisat aufbauen. Jedoch kann man durch „Reaktionslenker“ die eine Form vor der anderen mehr oder weniger bevorzugen. Bei der Polymerisation des Butadiens macht man hiervon Gebrauch, indem man durch Zusatz von Merkaptanen die 1,4-Polymerisation bevorzugt, die zu



linearen Molekülen führt. Dies ist wichtig, da bei der 1,2-Polymerisation durch die aus der Molekülkette herausstehenden Vinylgruppen Querverbindungen zu benachbarten Ketten geschlagen werden können und eine unerwünschte Vernetzung die Folge ist.





Das Online-Magazin  
für Labor und Analytik

---

25.02.2008
Kontakt
Abos
Werbung
Service
Referenzen
Profil
FAQ
AGB
Impressum
DE
EN

---

Das Online-Magazin für Labor und Analytik

[Sitemap](#) [Profisuche](#)

---

**Aktuelles und Neues**

- ANALYTIK NewsFlash
- Produktneuheiten
- Labor Nachrichten
- Labor Stellenmarkt
- Labor Veranstaltungen
- Diskussionsforum
- Biete/Suche
- Webseite des Monats

**Labor Branchenbuch**

- Hersteller, Händler
- Laboratorien
- Sonstiges

**Analytik Weblinks**

- Analysetechniken
- Qualitätssicherung
- Arbeitssicherheit
- Fachliteratur
- Laborsoftware
- Sonstiges

**Ihr Ansprechpartner**



Dr. Torsten Beyer

**Labor Partnerseiten**

- LabFirms.de
- LabCrawler.com
- LaborShop.de
- Chemiker.info
- Chemie-Datenbanken

++ ANALYTIK NEWS Aktuell ++

Produktneuheiten
Stellenmarkt
Nachrichten
Veranstaltungen
Links

Das Online-Labormagazin ANALYTIK NEWS ist ein Angebot der Dr. Beyer Internet-Beratung und bietet bereits seit 1998 tagesaktuelle, unabhängige, redaktionell geprüfte Informationen aus den Bereichen Labor und Analytik.

In unseren wöchentlichen und monatlichen Email-Newslettern informieren wir mehr als 30.000 Anwender im deutschsprachigen Raum über Produktneuheiten, Nachrichten, Fachartikel, Veranstaltungen, Stellenangebote und vieles mehr.

---

**ANALYTIK NewsFlash Extra: Februar 2008**
Archiv
ANALYTIK NewsFlash abonnieren
Inserieren

*Monatlicher Newsletter mit Meldungen, Fachartikeln, Produktneuheiten, Veranstaltungen, Linktips u.v.m.*

- **Produktneuheiten:** a1 envirotech, Berghof, Gilson, LAUDA DR. R. WOBSER, Metrohm, Retsch, Sartorius
- **Fachbeiträge:** Lichtstreuung und Universelle Kalibration - Einsatzmöglichkeiten und Grenzen  
Zweidimensionale kapillarelektrophoretische Methoden: Sehr geringe Matrixempfindlichkeit
- **Veranstaltungen:** Dr. Schömer | QMBalance, Martin Christ Gefriertrocknungsanlagen, Sartorius,
- **Webseite des Monats:** CS-Chromatographie Service GmbH

-> ANALYTIK NewsFlash Extra lesen

---

**Labor Produktneuheiten**
alle
ANALYTIK NewsFlash abonnieren
RSS-Feed
Laborprodukt inserieren

*Aktuelle Neuheiten aus Labor, Analytik und Messtechnik inklusive Laborsoftware und Qualitätskontrolle*

- **MS Spezialitäten für mobile oder besonders schnelle MS-Messungen**  
Das Constellation CT-1128 ist ein mobiles GC/MS System auf der Basis eines Agilent 5975 Quadrupol. Bei einer Größe von nur 39x42x66 cm (HxTxB) und einem Gewicht von nur 34 kg besitzt das System alles...
- **Sicheres Wägen toxischer, pulverförmiger Substanzen im Labor: Wägekabine SWC - denn Sicherheit geht vor**  
Aktive Forschung und Entwicklung in der pharmazeutischen und chemischen Industrie erzeugen immer effektivere Medikamente und Zubereitungen. Für Forscher und Labormitarbeiter bedeutet dies jedoch eine...
- **Gilson's neue einzigartige Purification Plattform!**  
Profitieren Sie von Gilson's neuer einzigartiger Purification Plattform die allen Ihren analytischen und präparativen HPLC-Anwendungen gerecht wird! Gilson's neue Detektionslösungen (171 und 172 DAD)...
- **Reduzieren Sie Ihr Probenvolumen mit CentriVap - kontrolliert heizen bis +100°C und kühlen bis -4°C**  
Heizen und Kühlen in einem Gerät, das geht nur mit dem CentriVap von Labconco. Temperieren Sie Ihre Proben während des Einengens zwischen -4°C und +100°C mit individuell anpassbarem Temperaturprogramm...
- **Bis zu 20 Proben gleichzeitig zerkleinern und homogenisieren: Die neue Schwingmühle MM 400**  
Die neue Schwingmühle MM 400 von RETSCH ist das ideale Gerät für die schnelle und effiziente Homogenisierung kleiner Probenmengen im Labor. Sie zerkleinert unterschiedlichste Materialien wie z.B. Tab...

-> alle Produktneuheiten    -> Chromatographie    -> Spektroskopie    -> Probenvorbereitung

---

© 2000-2008 Dr. Beyer Internet-Beratung    Kontakt    Link vorschlagen    Abos    Werbung    AGB    Impressum

### Die Adresse für Analytik-Literatur



## Was Sie bei uns finden

- Verschiedene E-Mail-Newsletter
- Produktneuheiten
- Stellenmarkt
- Nachrichten und Fachbeiträge
- Veranstaltungskalender
- Diskussionsforum und Pinwand
- Laborbranchenbuch „LabFirms“
- Linksammlung und Suchmaschine