

Forschungszentrum Jülich
in der Helmholtz-Gemeinschaft



Wissenschaft im Zeichen der Zeit

**Preisträger des Leibfried-Preises
im Forschungszentrum Jülich
2000–2005**

Rafael Ball (Hrsg.)



**Allgemeines
General**

Forschungszentrum Jülich GmbH
Zentralbibliothek

Wissenschaft im Zeichen der Zeit

**Preisträger des Leibfried-Preises
im Forschungszentrum Jülich
2000 - 2005**

Rafael Ball (Hrsg.)

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Allgemeines / General

Band/Volume 4

ISSN 1433-5565 ISBN 3-89336-411-0

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

Herausgeber
und Vertrieb: Forschungszentrum Jülich GmbH
Zentralbibliothek
D-52425 Jülich
Telefon: 02461 61-5368 · Telefax: 02461 61-6103
e-mail: zb-publikation@fz-juelich.de
Internet: <http://www.fz-juelich.de/zb>

Zusammenstellung: Roswitha Moes,
Cornelia Plott,
Zentralbibliothek, Forschungszentrum Jülich GmbH

Umschlaggestaltung: Grafische Betriebe, Forschungszentrum Jülich GmbH

Druck: Grafische Betriebe, Forschungszentrum Jülich GmbH

Copyright: Forschungszentrum Jülich 2005

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Allgemeines / General Band / Volume 4

ISSN 1433-5565
ISBN 3-89336-411-0

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie oder in einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	3
Günther Leibfried: "Die Nase auf dem Boden halten"	7
2000 VON REIBUNG IM ROHR, KAROS IM FERNSEHEN UND JOBS IM EXPORT ...	11
Roland Rzehak: "Fließt wie geschmiert"	15
Dietmar Knipp: Gesiebttes Licht.....	25
Joachim Müller-Kirchenbauer: Technologietransfer in der Kraftwerksindustrie	33
2001 VON KÄFERN, BIOREAKTOREN UND ANTIKEM GESTEIN	43
Sebastian Schmidt: Neue Bioreaktoren für die Krebstherapie	47
Peter Schroth: Wie man das Riechvermögen des Kartoffelkäfers für Biosensoren nutzbar machen kann	57
Simone Baer-Lang: NMR mit hyperpolarisiertem Xenon in hohen und niedrigen Magnetfeldern	65
2002 LANGLEBIGE GLÜHLAMPEN, DAS SPIEL DER NEUTRONEN UND VORBILD NATUR.....	75
Stephan Laue: Asymmetrische Transferhydrierung im chemischen Membranreaktor:	79
Torsten Markus: Die drahtlose Glühlampe - warum brennen moderne Leuchtmittel nicht ewig?	87
Kay Nünighoff: Billardspiel und siedende Atome im Schwermetall	95
2003 VON KOMMISSAR "GEN-CHIP", BENZIN-ZUSÄTZEN IM BODEN UND "BAUM-GREISEN" AUF DER SPUR DES KLIMAWANDELS.....	105
Tino Polen: Mit Kommissar <i>Gen-Chip</i> den Tätern auf der Spur	109
Volker Linnemann: MTBE – Ein Kraftstoffzusatz auf dem Weg nach oben?	115
Kerstin Treydte: "Baum-Greise" erzählen vom Klima vor 1200 Jahren	125
2004 VON STARKER KERAMIK, WACHSENDEN RISSEN UND OZON IM POLARWIRBEL.....	135
Juliane Mentz: Fasern machen Keramiken (fast) "unkaputtbar"	139
Robert Spatschek: Auf Biegen und Brechen	147
Ulf Winkler: Auf frischer Tat ertappt	153
2005 VON SELTENEN TEILCHEN, FEDRIGEN WOLKEN UND VERSCHLUNGENEN KETTEN	163
Peter Winter: Die Nadeln im Heuhaufen	167
Alexander Mangold: Eisigkalt, federleicht und schleierhaft: aus dem Leben einer Cirruswolke	175
Michaela Zamponi: Polymere – Molekulare Entfesselungskünstler	183

Vorwort

Wissenschaft transparent zu gestalten, Ergebnisse der Forschung im Dialog mit einer breiten Öffentlichkeit verständlich zu präsentieren und kritisch zu diskutieren ist eines der Ziele des Forschungszentrums Jülich.

Günther Leibfried (1915 – 1977) ist der Namensgeber des internen Jülicher Wissenschaftspreises. Der Physiker Günther Leibfried hat seit der Gründung des Forschungszentrums bis zu seinem frühen Tode die theoretische Physik in Jülich maßgeblich mitgestaltet. Lange bevor in Deutschland die öffentliche Debatte über die Notwendigkeit der Popularisierung von Wissenschaft geführt wurde, sah Leibfried es als eine besondere Herausforderung aber auch Selbstverständlichkeit an, gerade komplexe und anspruchsvolle wissenschaftliche Zusammenhänge allgemeinverständlich, lebensnah und abwechslungsreich darzustellen.

1990 wurde der Preis mit seinem Namen gestiftet und seitdem alljährlich an Doktoranden und Doktorandinnen vergeben, die ihre Arbeiten und Erkenntnisse in besonderer Weise transparent und populärwissenschaftlich aufbereiten und darstellen können.

Im vorliegenden Band werden die Beiträge der Leibfried-Preisträger und Preisträgerinnen des Forschungszentrums aus den Jahren 2000 bis 2005 veröffentlicht. Mit achtzehn allgemeinverständlichen Arbeiten bietet er "Wissenschaft kompakt", gibt einen Überblick über die Breite der Forschung in Jülich und will zugleich zur Nachahmung anregen.

Die Rezeption dieses Bandes wird zeigen, inwieweit dies gelungen ist. Ein Erfolg könnte auch andere Wissenschaftler motivieren, ihre komplexen, spannenden und interessanten Erkenntnisse so zu formulieren, dass sie einer breiten Öffentlichkeit zugänglich sind. Wissenschaft findet in und für die Gesellschaft statt und nicht in einem elitären Elfenbeinturm.

Joachim Treusch

Vorstandsvorsitzender des Forschungszentrums Jülich

Günter Leibfried

"Die Nase auf dem Boden halten"

Günther Leibfried – *1.6.1915 † 20.6.1977

Günther Leibfried war theoretischer Physiker - und das mit Leidenschaft. Seine wissenschaftliche Kreativität, seine kompromisslose Hingabe und sein präzises Denken bleiben in der Erinnerung von Kollegen lebendig. Doch er lebte diese Tugenden nicht nur, sondern forderte und förderte sie ebenso bei seinen Studenten. Leibfried wollte stets zum Kern der Dinge vorstoßen. Dabei versteckte der Theoretiker sich nicht im akademischen Elfenbeinturm hinter Formeln. "Die Nase auf dem Boden halten" war sein Motto, Bodenhaftung bewahren, nach dem Naheliegenden schnüffeln, nicht nach hochtrabenden Theorien. Seine Studenten hielt er an, es ebenso zu halten: den klaren Ausdruck zu suchen und sich nicht hinter großen Worten und abstrakten Modellen zu verschanzen. Obwohl Theoretiker suchte Leibfried für seine Forschung immer das Urteil des Experimentes. Er selbst begann seine Karriere in Göttingen als Schüler des Experimentalphysikers Hans Kopfermann. Vielleicht pflanzte sein Lehrer in ihm den Drang ein, seine Arbeiten über den Kristallaufbau von Metallen immer auf den Punkt zu bringen und die experimentelle Bestätigung zu suchen. Auch das war für ihn "die Nase auf dem Boden halten".

Leibfried kam früh ins neugeschaffene Forschungszentrum im Stetternicher Forst bei Jülich. Ab 1957 war er einer der Direktoren des Institutes für Reaktorwerkstoffe. Später initiierte er dessen Umwandlung in das Institut für Festkörper- und Neutronenforschung, aus dem 1971 das heutige Institut für Festkörperforschung entstand. Als er dann die Leitung eines der Theoretischen Institute übernahm, verzichtete er auf seinen Lehrstuhl in Aachen, um sich der neuen Aufgabe voll und ganz zu widmen. Dennoch klebte der 61-jährige Leibfried nicht auf dem Stuhl. 1976 lehnte er es ab für eine zweite 5-jährige Amtszeit berufen zu werden. Ein Beleg seines eigensinnigen und nicht konformistischen Wesens. Er empfand es als richtig und wichtig, dass junge Leute auch ihn hohen Positionen früh Verantwortung übernehmen. Er selber steckte seine Nase wieder ganz in Forschung und Lehre.

Seine Seminare waren für die Studenten ebenso spannend wie anspruchsvoll. Lange Zeit hielt er sie Abends um acht Uhr. Für Leibfried war immer die richtige Zeit, um Physik zu machen. Selten gab sich Leibfried mit eingefahrenen Methoden zufrieden, stets überraschte er seine Zuhörer mit neuen Ansätzen und Kniffen. Mit Kreide und Zigarre dozierte er oder ließ sich die Arbeit seiner Mitarbeiter erklären. Gab es bei abendlichen Diskussionen kein Ergebnis, begrüßte der Frühaufsteher seine Doktoranden am nächsten Morgen gerne mit dem heiteren Gruß "Na, können sie es jetzt?". Diese "Sticheleien" nahmen die Angesprochenen als konstruktive Herausforderung auf. Denn sie wussten, dass

Leibfried nicht nur die Nase auf dem Boden hatte, sondern auch die Ohren offen - für Ideen ebenso, wie für Probleme.

Leibfried wurde in Fraulautern im Saarland geboren und zog mit seiner Familie bald nach München. Das diese Zeit für den jugendlichen Leibfried prägend war, zeigte sich 30 Jahre später: In der Zeitschrift für Physik erscheint ein Artikel über Schallwellen in Festkörpern mit dem Titel "Betrefs: Glassischen und Gwandenschträuung fon fohnonen in Griesdahlen", den er komplett ins Bayrische übersetzt hatte. Nach dem frühen Tod der Eltern lebte er bei seiner Großmutter und legte in Hameln sein Abitur ab. Er studierte Physik in Göttingen und promovierte 1939 bei Richard Becker, der seinerseits Schüler von Max Planck war, und Georg Joos, dem Autor des noch immer gebräuchlichen Lehrbuchs der Theoretischen Physik. Fach- und Lehrkompetenz waren Leibfried somit in die akademische Wiege gelegt.

Mit dem 1990 entstandene Günther-Leibfried-Preis sieht sich das Forschungszentrum Jülich in der Tradition des Namenspaten, der 1977 an einem Schlaganfall verstarb. Ganz in seinem Sinne möchte der Vorstand Jülicher Absolventen motivieren, mit ihrer Arbeit an die Öffentlichkeit zu gehen und Forschung auf den Punkt zu bringen. Dafür hätte Günther Leibfried seinen Namen gerne gegeben.

2000

**Von Reibung im Rohr,
Karos im Fernsehen und
Jobs im Export**

Von Reibung im Rohr, Karos im Fernsehen und Jobs im Export

Wer gut schmiert ...

"Wer gut schmiert, der gut fährt". Dieser im allgemeinen Sprachgebrauch anders gemeinte Spruch hat einen ernst zu nehmenden Hintergrund: Innere Widerstände führen auch in Flüssigkeiten zu Reibungsverlusten. Deshalb müssen wir erhebliche Pumpleistungen aufbringen, um unser tägliches Wasser zum Hahn oder Öl durch lange Pipelines zu den Raffinerien zu befördern. Auch die Feuerwehrleute wissen davon ein Lied zu singen: Wird Wasser nämlich durch einen Schlauch gepumpt, so hängt die Reichweite des Strahls von den Reibungsverlusten im Schlauch ab. Verdopplung der Pumpleistung führt dabei nicht immer zur Verdopplung der Reichweite, weil das Wasser durch einen Schlauch gewöhnlich nicht glatt, sondern verwirbelt, also "turbulent" fließt. Dadurch steigen die Reibungsverluste mit zunehmender Pumpleistung steil an. Wunder wirkt aber schon ein Zusatz von nur 0,003 % Polyethylenoxid: Solche Polymere sind langkettige, fadenförmige und in sich verschlungene Gebilde aus überwiegend Kohlenstoff-Atomen und haben z.B. auf fließendes Wasser den Effekt eines Schmiermittels.

So erfreulich es auch ist, derartige Tricks und Kniffe zu kennen: Die Fließeigenschaften von Polymeren sind außerordentlich komplex und noch längst nicht verstanden. Beispielsweise werden in den genannten turbulenten Zonen der Strömung die verschlungenen Polymerketten gestreckt. Wie genau aber sieht diese Streckung aus? Und wie verändert ein deformiertes Polymer die Strömung selbst? Dies sind zwei zentrale Fragen, die nur beantwortet werden können, indem einzelne Polymerketten in der Strömung untersucht werden.

Technische Polymere sind für derartige Experimente meist viel zu klein. Daher wird als Modellpolymer die sehr viel längere DNS (Desoxyribonukleinsäure), die Trägerin der Erbsubstanz, benutzt. Jüngste Fortschritte in der Experimentierkunst ermöglichen es, ein DNS-Molekül an einem Ende in der Strömung fest zu halten und seine Deformation zu analysieren. Dr. Rzehak konnte diesen Vorgang mit Computersimulationen nachvollziehen und damit einige existierende abstrakte Modelle prüfen. Darüber hinaus ist ihm aber auch der zweite wichtige Schritt gelungen: den Einfluss des deformierten Polymers auf die Strömung selbst zu berechnen. Letzteres konnte in bisherigen Experimenten nicht gemessen werden, stellt aber einen weiteren wichtigen Schritt zum Verständnis fließender Polymerlösungen dar – einem Problem mit grundsätzlicher und auch ganz offensichtlicher praktischer Bedeutung.

Vier gewinnt!

"Gesiebttes Licht oder: Wie lernt ein optischer Sensor Farbsehen?" So war der Vortrag von Dr. Dietmar Knipp vom Institut für Schicht- und Ionentechnik überschrieben. Er hatte sich in seiner Doktorarbeit mit der Entwicklung eines neuartigen Farbsensors beschäftigt. Um dem Fernsehzuschauer den Eindruck hunderter Farbtöne zu vermitteln, wird bei konventionellen Kameras das Bild in grüne, blaue und rote Punkte zerlegt. Weil drei Punkte aber dreimal so viel Platz benötigen wie ein einziger, ist das Bild zum einen relativ grob und zum anderen treten Farbfehler auf, die man als Farb-Aliasing-Fehler bezeichnet. Beobachten kann man diesen Fehler zum Beispiel, wenn ein Fernsehsprecher ein karierte Krawatte trägt, die auf dem Bildschirm flimmert.

Abhilfe schaffen hier Sensoren, die die Farbinformation in der Tiefe detektieren – Bauelemente also, bei denen die Sensorkanäle zur Farbaufnahme übereinander und nicht nebeneinander angeordnet sind. Deren Neuerung besteht darin, dass nicht nur die vollständige Farbinformation an einem Ort, sondern auch sämtliche Sensorkanäle zur gleichen Zeit ausgelesen werden können. Diese beiden Bedingungen konnten bisher nicht gleichzeitig erfüllt werden. Entsprechend arbeiten die neuen Sensoren nach dem FZ-Jot-Prinzip: "Farbe zur selben Zeit an jedem Ort". Sie beruhen auf drei übereinander angeordneten Dioden. Einfallende Photonen kleiner Wellenlänge werden in der ersten Diode absorbiert, Photonen mittlerer und großer Wellenlänge in der zweiten bzw. dritten Diode. Hergestellt werden die Bauelemente aus amorphem Silizium. So lassen sich die optischen Eigenschaften von amorphem Silizium durch die Zugabe von Fremdatomen wie Kohlenstoff oder Germanium gezielt einstellen.

Ein weiterer Fortschritt in der Farbaufnahme ist möglich, wenn die Anzahl der Sensorkanäle erhöht wird. Hersteller von Farbfilmen für die klassische Fotografie haben es vorgemacht, indem sie die Zahl der Emulsionsschichten von drei auf vier erhöht haben. Vier gewinnt!

Kraftwerksbau in China nutzt heimischer Wirtschaft

Den Technologietransfer in der Kraftwerksindustrie untersuchte im Rahmen seiner Dissertation Dr. Joachim Müller-Kirchenbauer in der Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung.

Deutschland, die USA und Japan haben die weltweit modernste und effizienteste Kraftwerkstechnik, bauen in ihren eigenen Ländern aber nur noch wenige Kraftwerke. Genau anders dagegen China und Indien: Dort werden in großem Umfang Kraftwerke – vor allem Kohlekraftwerke – gebaut, allerdings mit weit niedrigeren Standards. Aus diesem Gegensatz ergibt sich für die Übertragung der Techniken, also den Transfer von Technologie und Know-how, ein hohes Potential. Die Schwellen- und Entwicklungsländer würden davon profitieren, weil sie fortschrittlichste Technologien erhielten; in den Industrieländern könnten die Kraftwerks

hersteller ihre Produktionskapazitäten besser auslasten sowie Wertschöpfung und Beschäftigung sichern.

Wer von diesen Beteiligten in welchem Maße davon profitiert, hängt aber stark von der "Spielart", Geschwindigkeit und Tiefe des Technologietransfers ab. China und Indien könnten konventionelle Kohlekraftwerke heute fast vollständig selbst bauen; Zulieferungen würden heute nur etwa 20 Prozent der gesamten Investition ausmachen. Einen höheren Importanteil, nämlich ein Drittel, hätten moderne Gas- und Dampfturbinenkraftwerke, deren Turbinenschaufeln zum Beispiel höchste Werkstoffgüten und Gussverfahren erfordern, die in China und Indien noch nicht beherrscht werden. Den höchsten Importanteil hätten Kohlevergasungskraftwerke mit über 40 Prozent des Investitionsvolumens. Immer sind es jedoch nur ausgewählte Komponenten, die – aus Sicht der Industrieländer – exportiert werden könnten. Bei einfacheren Komponenten genügt oft der Transfer von Wissen und Plänen. Mit zunehmender Zeit sinkt für die Schwellen- und Entwicklungsländer der Importbedarf. Dr. Müller-Kirchenbauer ging auch der Frage nach, welche heimischen Produktionssektoren von dem Transfer profitieren würden. Die beschäftigungsintensiven Produktionssektoren Metall- und Maschinenbau sind in den Zielländern bis auf wenige Ausnahmen selbst verfügbar. Transferiert werden müssten hingegen kapitalintensiv Verfahren, zum Beispiel die Erzeugung von Stahl, vor allem in höheren Güten, sowie Schmiede- und Gussverfahren. Auch wissensintensive Bereiche, zum Beispiel Dienstleistungen in der Planung und Informationstechnik, würden profitieren. Zwar sinkt im Laufe der Zeit der Exportbedarf für die Industrienationen pro Kraftwerksbau. Die steigende Zahl der Projekte sorgt hier aber für einen guten Ausgleich. Fazit: Die Kraftwerksmärkte Chinas und Indiens werden auch in Zukunft im heutigen Umfang zur Schaffung und Sicherung von Beschäftigung in Deutschland und anderen Industrienationen beitragen können.

"Fließt wie geschmiert"

Roland Rzehak

Wasser muss man schmieren, damit es besser fließt - wer hätte das gedacht? Die Feuerwehr weiß Bescheid und macht sich's zu Nutze (Abbildung 1).



Abbildung 1: Demonstration des Effekts der turbulenten Widerstandsverminderung mit Hilfe zweier Feuerwehrspritzen, im Bild links mit reinem Wasser, rechts mit Zusatz von 0.003% Polyethylenoxid. (aus Bailey & Koleske: Poly (Ethylene Oxide), Academic Press 1976.)

Wird Wasser durch einen Feuerwehrschauch gepumpt, so hängt die Reichweite des Strahls von den Reibungsverlusten im Schlauch ab. Erhöht man die Pumpleistung langsam, so nehmen die Reibungsverluste zunächst ebenfalls langsam zu, solange sich die Strömung im sog. glatten bzw. laminaren Bereich befindet. Eine höhere Pumpleistung bewirkt daher eine entsprechend größere Reichweite des Strahls. Bei einer gewissen Pumpleistung findet jedoch ein plötzlicher Übergang zu turbulenter Strömung statt, der zu einem steilen Anstieg der Reibungsverluste und zu einem Verlust an Bewegungsenergie der Flüssigkeit führt. Eine starke Erhöhung der Pumpleistung führt dann nur noch zu einer verhältnismäßig geringen Vergrößerung der Reichweite. Setzt man dem Wasser aber bestimmte Polymere in einer Konzentration von nur wenigen tausendstel Prozent zu, so ist die Reichweite des Strahls ein Mehrfaches derer eines Strahls aus reinem Wasser - natürlich gleiche Pumpleistung vorausgesetzt. Offensichtlich wirken die beigemischten Polymere wie ein Schmiermittel: Sie reduzieren die Reibungsverluste im Schlauch drastisch. In

Anbetracht der winzigen Beimengung ein spektakulärer Effekt, der als turbulente Widerstandsverminderung bezeichnet wird.

Ein Polymer - was ist das eigentlich?

Anders als einfache Moleküle wie Wasser, das aus nur drei Atomen zusammengesetzt ist, bestehen Polymere aus einer riesigen Anzahl von Bausteinen. Sie entstehen durch Aneinanderreihung kleiner Einheiten, den Monomeren, zu langen fadenförmigen Gebilden. Synthetische Polymere besitzen ein sog. Rückgrat, das zumeist aus Kohlenstoff-Atomen gebildet wird. An diesem Rückgrat hängen Seitengruppen, die im einfachsten Fall, dem Polyethylen (Abbildung 2), nur aus einem einzelnen Wasserstoff-Atom bestehen. Die Anzahl der Monomere, die zu einer Polymerkette verbunden sind, liegt typischerweise zwischen 100 und 10 000; die Länge der Kette ist damit kleiner als ein millionstel Meter. Aus synthetischen Polymeren bestehen viele Alltagsgegenstände: Joghurtbecher werden aus dem eben erwähnten Polyethylen hergestellt; Polystyrol, in aufgeschäumter Form bekannt unter dem Markennamen Styropor, dient als Verpackungsmaterial. Im Prozess der Herstellung liegen die Polymere jedoch meist geschmolzen oder in einer anderen Flüssigkeit gelöst vor, da sie in flüssiger Form leichter zu verarbeiten sind.

Auch viele biologische Materialien fallen in die Klasse der Polymere. Hier sind oft Untereinheiten verschiedener Art miteinander verbunden, um eine bestimmte biologische Funktion zu erfüllen. Bei der menschlichen Erbsubstanz DNS (Abbildung 2) sind dies die Basenpaare Guanin und Cytosin sowie Adenin und Thymin. Im menschlichen Genom sind mehrere Milliarden Basenpaare aneinander gereiht, so dass ein gestrecktes DNS-Molekül eine Länge von bis zu einem Meter besitzen kann. Trotz ihrer komplizierteren chemischen Struktur erscheinen auch Biopolymere als fadenförmige Objekte.

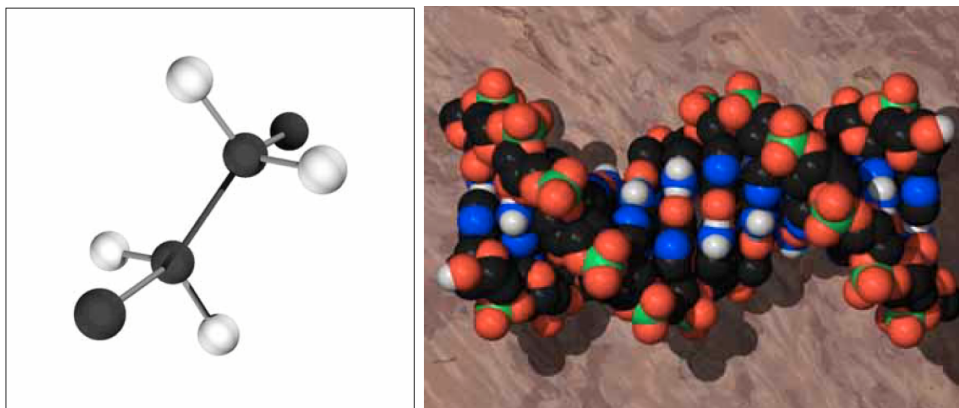


Abbildung 2: Ausschnitt einer Polyethylen-Kette (links) und eines DNS-Moleküls (rechts. Beim Polyethylen-Molekül sind vier Kohlenstoff Atome des Rückgrates (dunkel) zu sehen; die Wasserstoff Seitengruppen (hell) sind nur bei den mittleren

beiden davon gezeigt. Der abgebildete Teil der DNS-Doppelspirale umfasst 12 Basenpaare. (Nicht zu den Basen gehörige Wasserstoff-Atome sind nicht abgebildet. Bild von Paul Thiessen, <http://www.ChemicalGraphics.com>.)

Aus dem Blickwinkel des Physikers sind Polymerlösungen neben ihrer praktischen Bedeutung vor allem deshalb interessant, weil sie Eigenschaften von Flüssigkeiten und Festkörpern vereinen und ihr Verständnis daher eine wissenschaftliche Herausforderung darstellt. Im Festkörper besitzt jedes Teilchen seinen individuellen Platz; verlässt es diesen, so treten Kräfte auf, die es zurückziehen. Dieses Verhalten nennt man elastisch. In einer Flüssigkeit dagegen können sich die Teilchen frei bewegen und ihre Plätze ungehindert tauschen. Es treten keine Rückstellkräfte auf, wenn ein Teilchen seine Position verändert, sondern statt dessen Reibungskräfte, die proportional zur Geschwindigkeit des Teilchens relativ zu seiner Umgebung sind. Diese Reibungskräfte sind verantwortlich für die Viskosität (Zähigkeit) von Flüssigkeiten wie Öl. In einer Polymerlösung sind nun die Lösungsmittelteilchen frei beweglich, während jedes Monomer eine festgelegte Position innerhalb seiner Polymerkette besitzt. Nur die Polymerkette als Ganzes kann sich wiederum frei bewegen, allerdings viel langsamer als die Lösungsmittelteilchen. Als Konsequenz verhalten sich Polymerlösungen bei ruckartiger Deformation elastisch, da die Polymere dieser nicht folgen können; auf langsame Verformungen reagieren sie dagegen viskos. Ihre Fließeigenschaften sind somit außerordentlich komplex.

Was passiert nun in dem Feuerweherschlauch?

Nach gängiger Vorstellung treten die turbulenten Reibungsverluste nicht in allen Regionen der Strömung gleichmäßig auf. Es gibt vielmehr zeitlich veränderliche Bereiche mit hohen Reibungsverlusten und solche, die nahezu verlustfrei sind. In den Gebieten, in denen die Verluste ohne Polymer hoch wären, wird dieses gestreckt, entnimmt der Strömung Bewegungsenergie und speichert diese zwischenzeitlich durch seine Elastizität. Diese gespeicherte Energie kann es, ähnlich einer Uhrfeder, in den ruhigeren Strömungsgebieten wieder als Bewegungsenergie an die Strömung abgeben und so die Gesamtverluste senken.

Entscheidend für eine Verifikation dieser qualitativen Vorstellung und eine darüber hinaus gehende quantitative Vorhersage des Effektes ist daher die Frage: Wie wird eine einzelne Polymerkette in der Strömung gestreckt? Die denkbar einfachste Situation, an der sich diese Frage untersuchen lässt, ergibt sich für eine Strömungsgeschwindigkeit, die überall denselben Wert aufweist. Damit die Polymerkette nicht einfach mitgeschwemmt wird, hält man sie an einem Ende fest.

Diese Modellsituation stellt den Experimentator vor ein schwieriges Problem: Sie verlangt die Manipulation eines einzelnen winzigen Polymereleküls! Durch die Entwicklung neuer physikalischer Techniken wie Laser-Pinzette und Fluoreszenz-Mikroskop ist diese Aufgabe jedoch seit einiger Zeit beherrschbar. Der Schlüssel zum Erfolg liegt in der Verwendung von DNS als Modellpolymer. DNS kann mit molekularbiologischen Methoden ausgezeichnet präpariert werden und erlaubt durch

ihre für molekulare Maßstäbe riesige Größe - die verwendete DNS der sog. λ -Bakteriophage besitzt eine Länge von immerhin einem zehntel Millimeter - eine direkte optische Beobachtung (Abbildung 3).

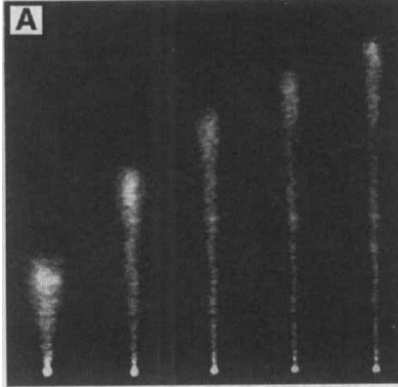


Abbildung 3: Experimentelle Aufnahmen eines in der Strömung gestreckten Polymers. Ein fluorescent markiertes DNS-Molekül wird am unteren Ende mit einer Laser-Pinzette festgehalten. Die Strömung ist von unten nach oben gerichtet; von links nach rechts sind Aufnahmen bei zunehmender Strömungsgeschwindigkeit abgebildet. Wegen der thermischen Zitterbewegung (siehe Text) ist nicht ein einzelner Schnappschuss des DNS-Moleküls zu sehen, sondern die durchschnittliche Fluoreszenzintensität der Überlagerung vieler Momentaufnahmen. (aus T.T. Perkins et al, Science 268 (1995) 83.)

Für den theoretischen Physiker stellt sich zunächst die Frage, welche die für das Verhalten eines Polymers wesentlichen und unverzichtbaren Eigenschaften sind, die in einem entsprechenden Modell auf jeden Fall berücksichtigt werden müssen. Die detaillierte chemische Struktur des Polymers ist hierfür offensichtlich von untergeordneter Bedeutung, denn turbulente Widerstandsverminderung kann mit vielen verschiedenen Substanzen erzielt werden. All diesen unterschiedlichen Substanzen ist jedoch eines gemein: Im Gegensatz zu kleinen Molekülen wie Wasser kann ein und dasselbe Polymermolekül eine Vielzahl räumlicher Anordnungen einnehmen, ähnlich wie sich ein Wollfaden auf viele verschiedene Arten aufknäueln lässt. Diese Eigenschaft bezeichnet man als Flexibilität.

Die Flexibilität synthetischer Polymere resultiert aus Rotationen um die Bindungen zwischen den Kohlenstoff-Atomen des Rückgrates, die nur schwach durch die Seitengruppen behindert werden. Für biologische Polymere, bei denen die einzelnen Monomere meist durch mehrere chemische Bindungen miteinander verbunden sind, sind solche Rotationen unmöglich. Durch die außerordentlich große Anzahl von Monomeren, aus denen ein Biopolymer zusammengesetzt ist, können sich aber kleine Variationen in den Bindungswinkeln akkumulieren, so dass am Ende doch ein vergleichbarer Effekt resultiert.

Wie modelliert man ein einzelnes flexibles Polymer ...

Ein Maß für die Flexibilität eines Polymers ist die Distanz entlang der Kette, nach welcher die Erinnerung an die Ausrichtung am Ausgangspunkt verschwunden ist: je kürzer diese Distanz, desto flexibler das Polymer. Unterteilt man die Kette in Abschnitte dieser Mindestlänge, sog. Kuhn'sche Segmente, so besitzen diese eine völlig zufällige Ausrichtung relativ zueinander. Ein stark vereinfachtes Polymermodell erhält man daher durch Aneinanderfügen einer Anzahl von N Schritten der Länge b mit zufälliger Ausrichtung zueinander, einem sog. Zufallsweg (Abbildung 4). Die durchschnittliche Reichweite D eines solchen Zufallswegs wächst wie die Quadratwurzel aus der Anzahl der Schritte, genauer $D = b \sqrt{N}$. Bei einem geradlinigen Weg ist dagegen die Reichweite gleich der gesamten zurückgelegten Wegstrecke, d.h. $D = bN$. Für $N = 10\,000$ ist also die räumliche Ausdehnung eines flexiblen Polymerknäuels - entsprechend der Reichweite des Zufallswegs - nunmehr 1% derer eines gleichlangen starren Stabes, bei dem alle Segmente in derselben Richtung aneinander gereiht sind! Um den Bezug des Modells zu einer konkreten Substanz herzustellen, sind die beiden experimentell leicht zugänglichen Größen Ausdehnung des Knäuels und Länge der Kette zu messen, woraus N und b berechnet werden können.

Eine Unzulänglichkeit dieses einfachen Modells ist, dass die Kette sich selbst schneiden kann, was bei einem realen Polymer natürlich nicht möglich ist. Abhilfe schafft die Einführung einer repulsiven Wechselwirkung zwischen den Segmenten. Dies führt zu einem sog. selbstvermeidenden Zufallsweg. Eine Konsequenz dieser zusätzlichen Wechselwirkung ist, dass die Ausdehnung des Polymerknäuels bei gleicher Anzahl von Segmenten größer wird. Es ist nun $D = bN^\nu$ mit $\nu = 0.6$ anstelle von $\nu = 0.5$ beim einfachen Zufallsweg. Für $N = 10\,000$ entspricht dies der 2.5-fachen Größe, bei längeren Ketten wächst der Unterschied weiter an. Man sagt, das Knäuel sei gequollen.

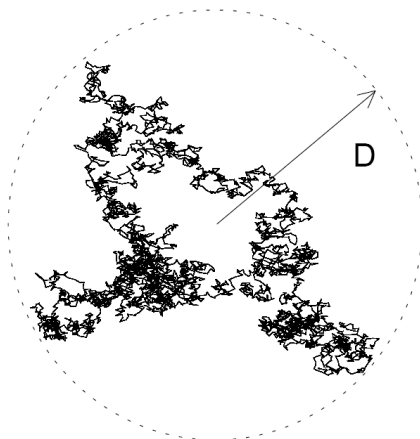


Abbildung 4: Einfacher Zufallsweg mit $N = 500$ Schritten einer Länge b , als Modell für ein flexibles Polymer mit $N = 500$ Kuhn'schen Segmenten. Die gesamte Wegstrecke ist $C = bN$, die Reichweite dagegen nur $D = b \sqrt{N}$.

Des weiteren darf man sich das Polymerknäuel nicht statisch vorstellen. Vielmehr führen die einzelnen Segmente eine ständige Zitterbewegung aus, die sich aus der Umgebungstemperatur speist. Diese sog. Brown'sche Bewegung ist auch der Grund dafür, dass das Polymer eine zufällig geknäulte Anordnung annimmt: Präpariert man es in einem vollständig gestreckten Zustand und überlässt es dann sich selbst, so nimmt es im Laufe der Zeit durch stete zufällige Umordnung wieder eine Knäuelform an. Die Polymerkette verhält sich also ähnlich wie eine Feder. Da die Ursache ihrer Elastizität in der thermischen Zitterbewegung der Segmente liegt, spricht man von entropischer Elastizität. Wegen ihrer endlichen Länge ist die Polymerkette aber nicht beliebig stark streckbar.

Schwimmt das Polymer wie z.B beim Feuerwehrproblem in einem Lösungsmittel, das seinerseits einer Strömung unterliegt, so wirkt auf jedes Segment eine Widerstandskraft. Diese ist proportional zur Geschwindigkeit des Segments relativ zu der umgebenden Strömung (Stokes'sches Gesetz). Die Widerstandskräfte bewirken die Deformation des Polymerknäuels, die Gegenstand der Untersuchung ist. Des weiteren führt die Relativbewegung eines jeden Segments aber auch zu einer Veränderung des umgebenden Strömungsfeldes, da die Flüssigkeit in der Umgebung des Segments von diesem mitgeführt wird. Für die Widerstandskraft auf ein zweites Segment ist nun dessen Geschwindigkeit relativ zu dem veränderten Strömungsfeld maßgeblich. Sie hängt daher ab von der Lage und der Bewegung beider Segmente relativ zueinander, d.h. beide Segmente stehen miteinander in Wechselwirkung. Da diese durch das Lösungsmittel übertragen wird, spricht man von hydrodynamischer Wechselwirkung. Für das gesamte Polymer, bei dem nun viele Segmente paarweise miteinander wechselwirken, ergibt sich qualitativ, dass das Lösungsmittel im Innern des Knäuels sich mit diesem mitbewegt. Anders herum dringt ein äußeres Strömungsfeld nicht in das Knäuel ein, sondern wird um dieses herumgeleitet, als ob das ganze Knäuel ein massives Objekt wäre. Dieses Phänomen wird als "non-draining"-Effekt bezeichnet.

... in der Strömung?

Die bisher angesprochenen Effekte - Selbstvermeidung, begrenzte Dehnbarkeit und hydrodynamische Wechselwirkung - erlauben die Berechnung der Streckung eines Polymers in der Strömung auf der Basis des Modells Kuhn'scher Segmente nurmehr mittels Computer-Simulation. Um dennoch zu analytischen Ergebnissen zu gelangen, wurde ein weiter vereinfachtes Bild vorgeschlagen. Aus den experimentellen Bildern (siehe Abbildung 3) ist ersichtlich, dass das gestreckte Polymer die Form einer Keule annimmt, welche durch eine Aneinanderreihung von Kugeln entlang der Strömungsrichtung, sogenannten Blobs, modelliert wird (Abbildung 5). Je stärker das Polymer gestreckt ist, desto mehr, dafür aber kleinere Blobs resultieren. Die Teilkette innerhalb eines jeden Blobs betrachtet man wieder als Zufallsweg, d.h. man nimmt an, dass die dafür abgeleiteten Relationen zwischen der Anzahl der im Blob enthaltenen Segmente und seiner Größe gelten. Diese Annahme ist gerechtfertigt,

solange die elastische Energie der Teilkette innerhalb des Blobs klein ist gegenüber der thermischen Energie, die die Aufknäuelung bewirkt. Setzt man ferner voraus, dass sich aufgrund des "non-draining"-Effekts jeder Blob wie eine undurchdringliche Kugel verhält, so kann man die von der Strömung ausgeübte Widerstandskraft nach dem bekannten Stokes'schen Gesetz für die Kugel berechnen. Die Federspannung der Teilkette folgt durch Aufsummieren der Widerstandskräfte auf alle Blobs, gezählt vom freien Kettenende her. Aus diesen Modellannahmen lässt sich eine Formel für die Streckung L des Polymers in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit v ableiten; als Resultat ergibt sich ein Potenzgesetz $L = \text{const } v^\mu$.

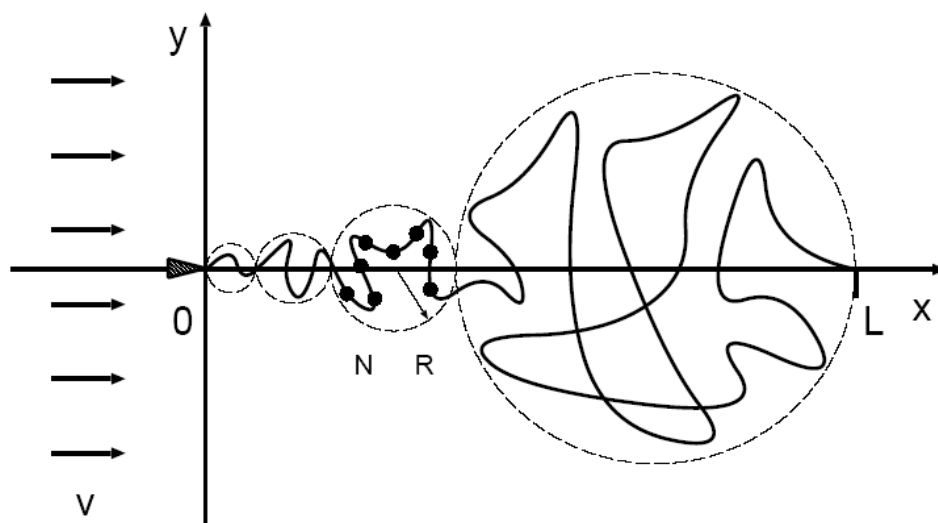


Abbildung 5: Blob-Bild für ein gestrecktes Polymer. Für jeden Blob (große gestrichelte Kreise) ist der Zusammenhang zwischen seiner Größe R und der Anzahl der Segmente N der darin enthaltenen Teilkette derselbe wie bei einem Zufallsweg. Das linke Ende des Polymers wird festgehalten. Die Strömung, die die Streckung bewirkt, ist durch die Pfeile angedeutet.

Diese Form des Streckungsgesetzes steht allerdings im Widerspruch zu den bisherigen experimentellen Befunden. Damit stellen sich folgende Fragen: Ist die Aufteilung der Polymerkette in eine Reihe von Blobs zur Berechnung der Streckung grundsätzlich fehlerhaft? Wurde möglicherweise an anderer Stelle zu stark vereinfacht, was durch geeignete Modifikationen korrigiert werden kann? Oder lagen einfach die experimentellen Parameter außerhalb des Gültigkeitsbereichs des Blob-Bildes? Eine genauere Betrachtung zeigt nämlich, dass das Potenzgesetz für die Streckung des Polymers nur in einem gewissen Bereich von Strömungsgeschwindigkeiten zutreffend sein kann. Die Größe dieses Bereichs hängt zudem stark von der Anzahl der Segmente in der Polymerkette ab.

Diese Fragen konnten wir anhand von Computer-Simulationen des detaillierteren Kuhn'schen Segmentmodells beantworten. Was im Prinzip so einfach klingt, ist in der praktischen Durchführung jedoch eine große Herausforderung. Der notwendige Rechenaufwand ist so enorm, dass nur speziell entwickelte effiziente Algorithmen es erlauben, das Problem auf modernen Supercomputern und unter beträchtlichem Einsatz von Rechenzeit zu lösen.

Ein wesentliches Ergebnis unserer Simulationen ist, dass die Annahme von ausschließlich undurchdringlichen Blobs nicht zutreffend ist (Abbildung 6). Vielmehr dringt die Strömung in die kleineren Blobs nahe dem festgehaltenen Kettenende zunehmend stärker ein. Dieser Effekt kann im Rahmen des Blob-Bildes qualitativ berücksichtigt werden, indem die Blobs für die Berechnung der Widerstandskräfte als aus einem für die Strömung undurchdringlichen inneren Kern und einer frei durchdringlichen äußeren Schale angenommen werden. Außerdem zeigen die Rechnungen, dass der Geschwindigkeitsbereich, in dem sich ein Potenzgesetz zeigen müsste, bei der Zahl von Segmenten, aus denen sich die bislang untersuchten DNS-Ketten zusammensetzen, noch verschwindend klein ist. Für einen unmittelbaren Vergleich sind daher Experimente mit längeren Ketten erforderlich.

Darüber hinaus erlauben Computer-Simulationen auch die Untersuchung von Schwankungen der Polymerstreckung, die aus der thermischen Bewegung der Segmente resultieren, ebenso wie das Studium der Dynamik der Polymerkette nach einem An oder Ausschalten der Strömung. Dieses zeitabhängige Verhalten ist für eine Polymerkette, die sich in einem turbulenten Strömungsfeld befindet, von besonderer Bedeutung.

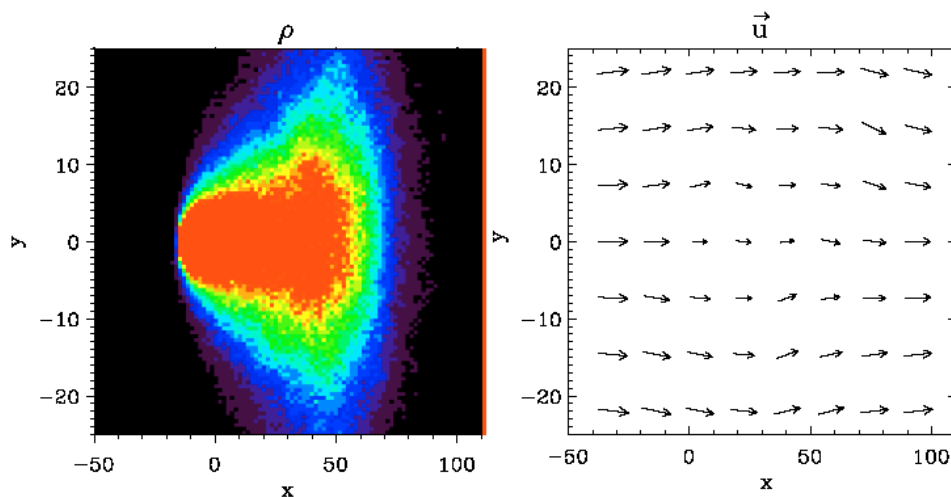


Abbildung 6: In einer Computer-Simulation berechnete Dichte ρ der Kuhn'schen Segmente (links) und verändertes Strömungsfeld \vec{u} (rechts). Die Dichte der Segmente (rot: groß violett: niedrig) gibt Aufschluss darüber, welchen Raumbereich das Polymerknäuel einnimmt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Strömung um diesen

Bereich herum verläuft. Allerdings ist auch im Innern dieses Bereichs eine nichtverschwindende Strömungsgeschwindigkeit zu beobachten.'

Die Ergebnisse der Simulationen geben auch hier wichtige Anregungen für die weitere Entwicklung vereinfachter Modellvorstellungen, mit denen sich experimentelle Resultate in einfacher Weise beschreiben lassen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass durch die präzise quantitative Berechnung aller Aspekte der Streckung eines Polymers in einer einfachen Strömung ein kleiner aber wichtiger Schritt hin zum Verständnis komplizierter Phänomene wie der turbulenten Widerstandsverminderung getan werden konnte. Die Ergebnisse verdeutlichen zudem, dass Fortschritte in einem quantitativen Naturverständnis am ehesten erzielbar sind durch enges Zusammenwirken dreier Herangehensweisen - experimentelle Beobachtung, theoretische Modellbildung und Computer-Simulation.

Gesiebttes Licht

Wie lernt ein optischer Sensor Farbsehen?

Dietmar Knipp

Abstract

Die Aufnahme und Verarbeitung optischer Informationen gewinnt in fast allen Bereichen des täglichen Lebens an Bedeutung. Schon bald werden Bildtelefone oder transatlantische Videokonferenzen ebenso zu unserem alltäglichen Leben gehören wie Digital- und Videokameras. Sehr häufig ist Farbe ein wesentlicher Bestandteil der aufgenommenen Information. Ziel der im Folgenden beschriebenen Arbeit ist die Entwicklung neuartiger optischer Sensoren zur Farberkennung. So wird die Farbinformation bei den hier vorgestellten Sensoren in der Tiefe des Bauelements getrennt und nicht wie bei konventionellen Bildaufnehmersystemen üblich räumlich voneinander getrennt (nebeneinander). Mit einem einzigen Bildpunkt ist man so in der Lage die vollständige Farbinformation zu ermitteln. Dies hat den Vorteil das die Auflösung künftiger Sensorchips deutlich erhöht werden kann und das der störende Einfluss des Farbmoiré-Effekts ausgeschaltet werden kann.

Einleitung

Das visuelle System des Menschen ist der wahrscheinlich am Besten verstandene Teil des Gehirns. Die Augen können als eine Art Verlängerung des Nervensystems aufgefasst werden. Die Netzhaut, welche aus Nervenzellen besteht, ist hierbei in Schichten verschaltet und übernimmt bereits einen Teil der Informationsverarbeitung, die für das Sehen notwendig ist. So treffen in jedem Augenblick unzählige Photonen, die zu verschiedenen Farben im Lichtspektrum gehören, auf die Netzhaut. Jedes Photon besitzt eine Energie und damit auch eine zugehörige Wellenlänge. Das für Menschen sichtbare Spektrum erstreckt sich über einen Wellenlängenbereich von etwa 380nm bis 680nm. Das Auge enthält aber nicht für jede mögliche Wellenlänge unterschiedliche Rezeptoren, sondern lediglich drei verschiedene Typen. Fällt nun Licht auf unsere Netzhaut, werden die drei Rezeptortypen je nach Energie der einfallenden Photonen unterschiedlich angeregt. Man spricht aufgrund der drei unterschiedlichen Rezeptortypen auch von einem Dreibereichsverfahren zur Farbdetektion. Vorgeschlagen wurde diese Betrachtung der Farbe von Young und Hermann von Helmholtz¹.

¹ Hermann von Helmholtz hat wesentliche Beiträge zur Medizin, zum Hören, zum Sehen, zur Neuropsychologie und zur Thermodynamik geliefert.

Konventionelle Bildaufnehmer

Technische Systeme wie Digitalkameras, Scanner oder auch Videokameras arbeiten ebenfalls nach einem solchen Dreibereichsverfahren. Fällt Licht auf das aufzunehmende Objekt, so wird ein Teil des Lichts reflektiert und fällt auf den Sensor, welcher dieses mittels Absorptionsfilter in die Anteile für rot, grün und blau zerlegt. In der Regel werden als Sensoren kristalline Dioden oder CCDs (Charge Coupled Devices) eingesetzt, die das detektierte Signal an eine Signalverarbeitung weitergeben. Dargestellt ist dies in Abbildung 1. Als Detektor werden hier Dioden eingesetzt, die den erzeugten Photostrom an Vorverstärker weitergeben. Dieser Teil des Bildaufnehmersystems wird als Farbanalyse oder auch als Farbmessung bezeichnet.

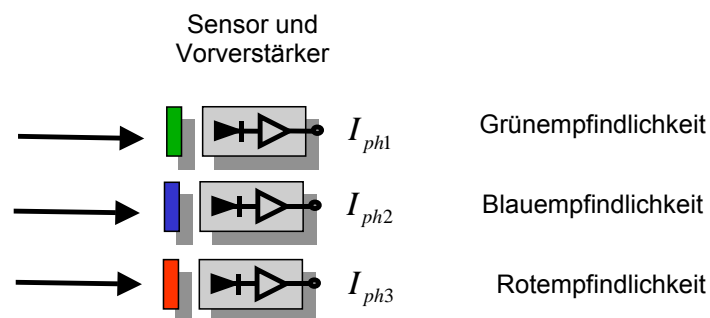


Abbildung 1: Farbmessung mittels dreier Dioden mit vorgeschalteten Absorptionsfiltern.

Nach einer Übertragung und gegebenenfalls Speicherung der Signale wird mittels einer Farbmischung aus den Signalen wieder eine Farbe erzeugt. Nachteilig an einer Farbinformationsaufnahme mit optischen Filtern ist, dass die Farbe räumlich voneinander getrennt detektiert wird. Dies führt bei der Integration zu flächigen Sensorfeldern, wie man sie zum Beispiel in Digitalkameras oder auch Videokameras vorfindet, dazu, dass drei Bildpunkte zur Erzeugung eines Farbbildpunktes benötigt werden. Damit reduziert sich die mögliche Ortsauflösung von Digital- und Videokameras. Weiterhin tritt durch die Aufnahme der Farbinformation an unterschiedlichen Orten des Objektes der Farbmoiré-Effekt auf. Dieser Effekt ist im alltäglichen Leben zum Beispiel beim Fernsehen zu beobachten. Trägt ein Fernsehsprecher eine karierte Krawatte oder ein gestreiftes Jackett, so beobachtet man in diesem Bereich des Bildes häufig ein Flimmern, obwohl andere Objekte auf dem Bildschirm scharf erscheinen. Dieses Flimmern ist auf die Anordnung der optischen Filter des Kamerasystems zurückzuführen, welche das gerade ausgestrahlte Bild aufgenommen hat.

Farbe nach dem FZ-Jot Prinzip

Abhilfe schaffen hier Sensoren, welche die Farbinformation in der Tiefe detektieren. Bauelemente also, bei denen die Sensorkanäle zur Farbaufnahme übereinander und nicht nebeneinander angeordnet sind. Ähnlich dem Aufbau eines Dias, welches aus drei Filterschichten (Emulsionsschichten) besteht, werden die Farbanteile für blau, grün und rot aus dem einfallenden Spektrum herausgefiltert. Die Neuerung der Sensoren besteht nun darin, dass nicht nur die vollständige Farbinformation an einem Ort sondern auch sämtliche Sensorkanäle zur gleichen Zeit ausgelesen werden können. Diese beiden gemeinsamen Bedingungen konnten mit bisherigen Sensoren nicht erfüllt werden. Dies drückt sich auch im **FZ-Jot** Prinzip aus: "**F**arbe zur selben **Z**eit an **j**edem **O**rt".

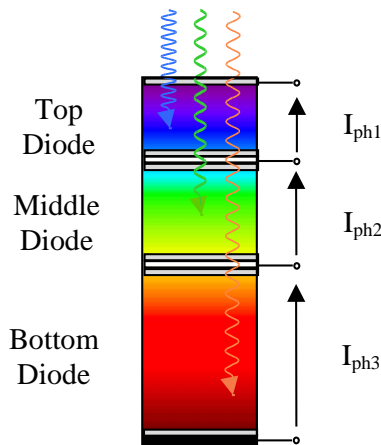


Abbildung 2: Schematischer Aufbau eines Farbsensors bestehend aus drei gestapelten Dünnschichtdioden.

Die im Rahmen dieser Dissertation entwickelten und realisierten Sensoren basieren auf drei übereinander angeordneten Dioden. Die optische Bandlücke der Absorberschichten in den einzelnen Dioden sind so gewählt, dass einfallende Photonen kleiner Wellenlänge in der ersten Diode absorbiert, während Photonen mit mittlerer und großer Wellenlänge tiefer in das Bauelement eindringen. Die Photonen mittlerer Wellenlänge werden in der mittleren Diode absorbiert, während die Photonen mit einer großen Wellenlänge erst in der dritten Diode absorbiert werden.

Gesiebtes Licht

Zur einfachen Erläuterung des Funktionsprinzips des Sensors lässt sich dieser am Besten mit einem "Lichtsieb" vergleichen. Ziel des "Lichtsiebes" ist es die Farbanteile aus dem einfallenden Licht heraus zu filtern. Erreichen lässt sich dies durch ein Sieb mit unterschiedlich großen Löchern. Die einfallenden Photonen entsprechen bei dieser Betrachtung Kugeln mit unterschiedlichem Durchmesser. Photonen hoher

Wellenlänge werden als Kugeln mit großen Durchmesser und Photonen mit kleiner Wellenlänge als Kugeln mit kleinerem Durchmesser betrachtet.

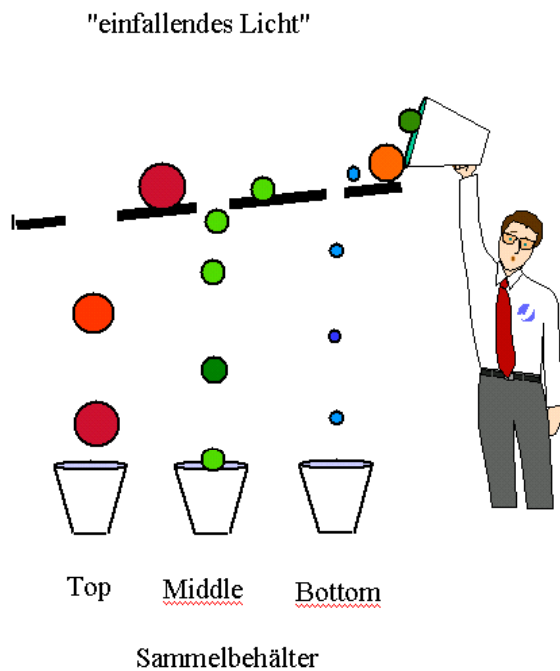


Abbildung 3: Funktionsprinzip eines Lichtsiebes. Die Photonen unterschiedlicher Wellenlänge entsprechen Kugeln unterschiedlichen Durchmessers.

Rollen die Kugeln über das Sieb, so fallen diejenigen Kugeln durch das erste Loch des Siebes, welche einen geringen Durchmesser besitzen. Aufgefangen werden sie in einem Behälter. Kugeln mit einem mittleren und großen Durchmesser rollen über das erste Loch hinweg. Kugeln mittleren Durchmessers fallen durch die mittlere Öffnung in den zweiten Behälter. Große Kugeln rollen ein weiteres mal weiter und fallen schließlich durch die große Öffnung in den dritten Behälter. Somit ist eine solche Siebvorrichtung in der Lage Kugeln nach ihrem Durchmesser zu sortieren. Überträgt man dies auf den Sensor, so werden dort Photonen nach ihrer Wellenlänge sortiert. Dies wird erreicht, indem die Bandlücke der Absorberschichten in den einzelnen Dioden abnimmt. Die optische Bandlücke des Absorbers in der ersten Diode (Top Diode) ist groß und nimmt für die zweite (Middle Diode) und dritte Diode (Bottom Diode) jeweils ab. Infolge dessen ist die erste Diode blau-, die zweite Diode grün- und die dritte Diode rot empfindlich. Die unterschiedlich großen Löcher des Siebes entsprechen hierbei Absorbermaterialien mit unterschiedlicher optischer Bandlücke.

Als Ausgangsmaterial für die Herstellung der Sensoren wird amorphes Silizium und dessen Legierungen eingesetzt. Amorphes Silizium unterscheidet sich dahingehend von kristallinem Silizium, dass es im Gegensatz zu kristallinem Silizium keine regelmäßige Gitterstruktur besitzt. Die Vorteile von amorphem Silizium in der Optoelektronik liegen in der hohen Absorption im sichtbaren Spektralbereich, welche etwa um den Faktor 20 höher ist als im kristallinen Silizium. Hergestellt werden die Schichtsysteme in einer PECVD- (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)-Anlage. Die niedrigen Herstellungstemperaturen dieses Prozesses erlauben die Herstellung von Schichten auf unterschiedlichen Trägermaterialien wie Glas, kristallinem Silizium aber auch Kunststofffolien. Um nun mit einem solchen Sensor unterschiedliche Farben zu detektieren, bedarf es eines speziellen Designs der Sensorstruktur. Erreichen lässt sich dies durch die gezielte Einstellung der Absorberschichten und der optischen Bandlücken der verwendeten Materialien in den einzelnen Bereichen des Sensors. So wird zur Absorption von Licht hoher Energie dem amorphen Silizium Kohlenstoff beigegeben. Dies führt zur Aufweitung der optischen Bandlücke. Reduzieren lässt sich die Bandlücke durch Beigabe von Germanium. Weiterhin lässt sich durch die Wahl der Absorberschichtdicken die Farbtrennung gezielt einstellen. Die Kontaktierung der einzelnen Dioden erfolgt mittels transparenter leitfähiger Schichten. Im konkreten Fall wurden gesputterte Zinkoxidschichten eingesetzt.

Damit ist zwar das Funktionsprinzip und der Aufbau des Sensors erläutert, aber die konkreten Anforderungen an die spektralen Empfindlichkeiten lassen sich daraus nicht ableiten. Wie schwierig es ist, die Empfindlichkeit festzulegen, wird im Folgenden deutlich.

Mit den Augen des Sensors

Die Bewertung der Farbaufnahme im Hinblick auf ihre Qualität lässt sich immer auf die Empfindlichkeit des menschlichen Auges zurückführen. Dementsprechend muss die menschliche Wahrnehmung von Farbe bei der Optimierung der Empfindlichkeit der Sensoren berücksichtigt werden. Dies ist insbesondere im Bereich von Digitalkameras und Videokameras von wesentlicher Bedeutung. Wer möchte nicht, dass die Farben des Meeres oder der Berge möglichst wirklichkeitsgetreu auf seinen Urlaubsphotos und -videos festgehalten werden? Wie müssen aber die spektralen Empfindlichkeiten des Sensors optimalerweise aussehen um eine Kamera bauen zu können die eine hervorragende Farbwiedergabe liefert? Optimalerweise sind die spektralen Empfindlichkeiten der Sensoren und der menschlichen Rezeptoren gleich. Nur in diesem Fall lassen sich die Farben mittels eines Ausgabesystems (Bildschirm oder Drucker) so wiedergeben wie sie im Originalbild vorliegen. Anderenfalls treten Farbfehler auf. Man versucht also bei der Entwicklung der Sensoren sich dem Optimalverlauf möglichst anzunähern. Will man nun unterschiedliche Sensoren miteinander vergleichen oder die Farbaufnahme eines Sensors optimieren, so bedarf es einer quantitativen Vergleichsmethode.

Hierzu führt man einen Farbfehler ein, der sich für jede einzelne Farbe berechnen lässt. Berücksichtigt man, dass der Mensch in der Lage ist ca. 200 Farbtöne, 20 Sättigungsstufen und etwa 500 Helligkeitsstufen zu unterscheiden so ergeben sich etwa 2 Mio. Farben die ein Mensch unterscheiden kann. Die Berechnungen werden allerdings nur für eine repräsentative Anzahl von Farben durchgeführt. Anschließend ermittelt man einen mittleren Fehler, der es erlaubt die Qualität der Farbaufnahme im Vergleich zu anderen Sensoren zu bewerten und den Sensor im Hinblick auf einen minimalen Farbfehler zu optimieren. Unter Zuhilfenahme dieser Berechnungen ist es gelungen einen Sensor herzustellen. Der experimentell realisierte Sensor zeigt eine sehr gute Farbaufnahme im Vergleich zu kommerzieller Bildsensoren. Um auch zukünftig den stetig steigenden Anforderungen an die Farbaufnahme gerecht zu werden, muss der Farbfehler auch weiterhin gesenkt werden. Dies lässt sich erreichen, indem man die Anzahl der Sensorkanäle erhöht. So wurde die Anzahl der Sensorkanäle von drei auf vier erhöht. Im Vergleich zu Bildsensoren, die mit optischen Filtern arbeiten, ist dies sehr leicht möglich, da lediglich eine weitere Diode dem Sensorstapel hinzugefügt werden muss. Auch in diesem Fall lässt sich unter zur Hilfenahme der Berechnungen ein geeignetes Design des Diodenstapels ermitteln. Ähnliche Pläne verfolgt die Firma Fuji, welche als erster Hersteller von Chemiefilmen die Anzahl der Emulsionsschichten von drei auf vier erhöht hat und damit ebenfalls die 4-Farbschicht-Technologie eingeführt hat.

Vier gewinnt!

Was für die Chemiefilme gilt, dass lässt sich natürlich auch auf Halbleitersensoren anwenden. Durch die höhere Anzahl der Sensorkanäle kann das einfallende Spektrum besser aufgenommen und nachgebildet werden. So zeigen die Berechnungen, dass sich die Farbaufnahme deutlich verbessert, wenn man im spektralen Bereich zwischen grün und rot noch einen weiteren Farbkanal für gelb oder orange einführt. Dies ist schematisch in Abbildung 4 dargestellt.

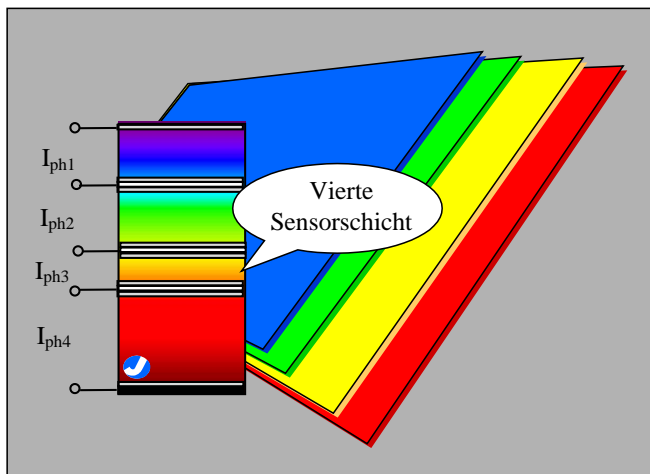


Abbildung 4: Aufbau eines Farbsensors mit vier Sensorschichten

Mit einem solchen vierten Kanal ist es möglich, die Qualität der Farbanalyse deutlich zu verbessern. Dargestellt wird dies am Beispiel eines Farbtondiagramms in Abbildung 5. Eingezeichnet sind hier 8 typische Testfarben eines Testfarbensatzes. Die Originaltestfarben sind rot dargestellt. Die Abbildung 5 lässt sich wie folgt verstehen: je kleiner der Abstand der grünen und blauen Punkte von den roten Punkten, desto genauer ist die Farbreproduktion des Sensors. Die grünen Punkte entsprechen hierbei den Testfarben eines Sensors mit drei Sensorkanälen. Die Punkte in blau entsprechen dem Verlauf eines Sensors mit vier Sensorkanälen. Man sieht, dass die blauen Punkte deutlich näher an den roten Punkten liegen als die grünen Punkte. Damit wird die Überlegenheit eines Sensors mit vier Sensorkanälen deutlich. Vier gewinnt!

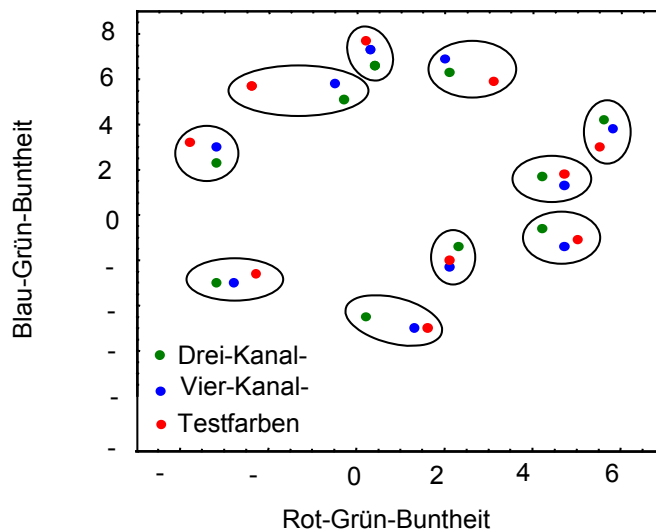


Abbildung 5: Bunttondiagramm für 8 Testfarben

Im Rahmen der hier vorgestellten Dissertation ist es gelungen, einen farbmoiré-freien Sensor zu realisieren, der die Farbinformation an einem Ort ermittelt, wobei alle drei oder vier Sensorkanäle gleichzeitig ausgelesen werden können. Herkömmliche Bildaufnehmer arbeiten mit optischen Filtern und besitzen daher grundsätzlich einen Farbmoiré-Fehler. Die Qualität der Farbanalyse der Sensoren liegt im Bereich von kommerziellen Bildaufnehmern für drei Kanäle und kann deutlich verbessert werden bei der Anwendung von vier Kanälen. Mit diesen Bauelementen eröffnen sich völlig neue Möglichkeiten für die Digitale Photographie. So werden die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Sensoren in einem BMBF geförderten Projekt mit dem Ziel der Entwicklung neuartiger Bildaufnehmer für die digitale Bildverarbeitung fortgesetzt.

Technologietransfer in der Kraftwerksindustrie

Joachim Müller-Kirchenbauer

Deutschland verfügt neben den USA und Japan über die weltweit modernste und effizienteste Kraftwerkstechnik. In keinem dieser Länder werden aber heute noch in großem Umfang Kraftwerke gebaut, wie das in den 1960-er oder 1970-er Jahren der Fall war. Dagegen baut kein Land so viele Kraftwerke wie China, vor allem für die Verstromung von Kohle: in den letzten zehn Jahren ist dort mehr Kraftwerksleistung installiert worden als in Deutschland insgesamt vorhanden ist. Auch in Indien werden in großem Umfang neue Kraftwerke gebaut.

Die hochentwickelten Kraftwerkstechniken werden also hierzulande und in anderen Industrieländern nur noch wenig nachgefragt; in Schwellen- und Entwicklungsländern besteht hingegen enormer Bedarf. Aus diesem Gegensatz ergibt sich für die Übertragung der Techniken, also den Transfer von Technologie und Know-how, ein hohes Potenzial.

Die Schwellen- und Entwicklungsländer (Zielländer des Transfers) könnten davon profitieren, indem sie über fortschrittlichste Technologien verfügen würden. In den Industrieländern (Ursprungsländern des Transfers) könnten die Kraftwerkshersteller ihre bestehenden Produktionskapazitäten besser auslasten oder deren Stilllegung vermeiden. Aus Sicht der Regierungen in den Industrieländern besteht die Aussicht (oder Hoffnung) auf Schaffung oder Sicherung von Wertschöpfung und Beschäftigung.

Wer von diesen Beteiligten in welchem Maße vom Technologietransfer profitiert, hängt aber stark von der Spielart, der Geschwindigkeit und der Tiefe des Technologietransfers ab. Daher wurde am Forschungszentrum Jülich untersucht, wie sich die Produktion von Kraftwerken heute zwischen Schwellen- und Entwicklungsländern und Industrieländern verteilen kann, wie sich diese Aufteilung durch den internationalen Technologietransfer verändert und was für die Beschäftigungssicherung in den Industrieländern folgt.

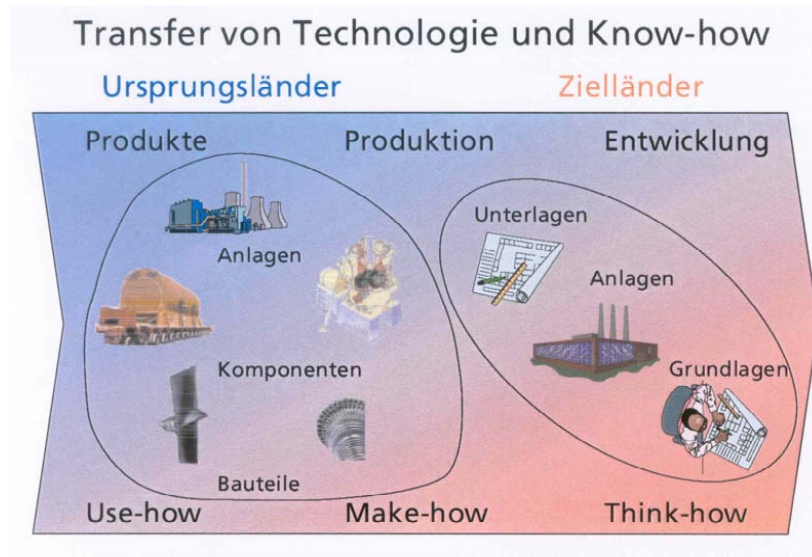


Abbildung 1: Der internationale Technologietransfer in produkt- und prozessorientierter Betrachtung: Wenn (produktorientiert) statt ganzer Anlagen nur noch Komponenten oder einzelne Bauteile exportiert werden, verlagern sich Wertschöpfung und Beschäftigung aus den Ursprungs- in die Zielländer. Gleiches gilt, wenn (prozessorientiert) statt der Produkte zunehmend Fertigungsunterlagen, Produktionsanlagen und Entwicklungsgrundlagen übertragen werden.

Hierzu wurde in Jülich ein neuartiger Untersuchungsansatz entwickelt. Er verknüpft technische und ökonomische Methoden mit länderspezifischen Analysen und erlaubt eine quantitative Analyse des Technologietransfers und seiner Rückwirkungen. Die interdisziplinäre Untersuchungsmethodik unterteilt die Technologien in ihre Haupt- und Unterkomponenten, für die dann Schritt für Schritt der Herstellungsprozess nachgezeichnet wird. Für die einzelnen Stufen des Produktionsprozesses wird analysiert, welche Materialien und Fertigungsverfahren verfügbar sein müssen. So wird detailliert ermittelt, zu welchen Anteilen die Produktion einer Kraftwerkskomponente in den Zielländern erfolgen kann oder durch Importe aus den Ursprungsländern gedeckt werden muss. Auf Basis dieser Produktionsanteile wird dann für Ursprungs- und Zielländer bestimmt, welche Wertschöpfung und Beschäftigung jeweils durch den Einsatz einer bestimmten Technologie im Zielland ausgelöst wird.

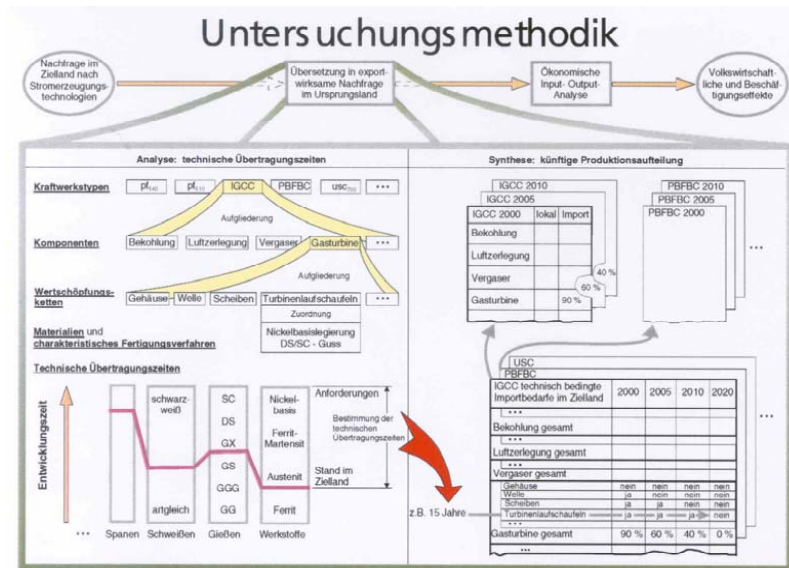


Abbildung 2: Eine etablierte Vorgehensweise zur Bestimmung von volkswirtschaftlichen- und Beschäftigungseffekten wird um einen wichtigen Schritt erweitert: Technologiespezifische Wertschöpfungsketten und länderspezifische Profile des technischen Entwicklungsstands sind die Grundbausteine einer interdisziplinären Methodik, die den Einfluss des internationalen Technologietransfers auf mögliche Produktionsverlagerungen und zukünftige Produktionsaufteilungen erfasst.

Produktionsanteile der Ziel- und Ursprungsländer

Untersucht wurden diese Effekte bei Einsatz von 18 unterschiedlichen Stromerzeugungstechnologien in China und Indien. Die Technologieauswahl deckt ein breites Spektrum der fossilen Energietechnik ab, von heute bereits vielfach eingesetzten Kraftwerkstypen bis hin zu solchen, die erst zukünftig eine wichtige Rolle spielen werden.

Der Kraftwerkstyp, der in den Kraftwerksmärkten Chinas und Indiens heutzutage mit Abstand die größte Bedeutung hat, ist das konventionelle, unterkritische Kohle-dampfkraftwerk. Diese Kraftwerke, das zeigen die Ergebnisse der Untersuchung, können fast vollständig in beiden betrachteten Ländern vor Ort produziert werden. Die einheimischen Industrien sind weitestgehend selbst in der Lage, die erforderlichen Dampferzeuger, Turbinen, Generatoren usw. herzustellen. Zulieferungen aus Industrieländern sind technisch kaum noch erforderlich. Ihr Anteil an der gesamten Investition für die Kraftwerksicherung liegt unter 20 %.

Bei einem anderen, in Deutschland viel diskutierten Kraftwerkskonzept, dem Gas- und Dampfturbinenkraftwerk (GuD), liegen die Verhältnisse etwas anders. Die wichtigste Komponente dieses Kraftwerkstyps enthält Bauteile, die extremen

Anforderungen standhalten müssen. So erfordert beispielsweise die Herstellung der Gasturbinenbeschaufelung den Einsatz höchster Werkstoffgüten und sehr komplexer Gussverfahren, die in China oder Indien noch nicht beherrscht werden. Für die Errichtung eines solchen Kraftwerks in China oder Indien sind daher Importe notwendig, deren Wert etwa ein Drittel der Investitionssumme ausmacht.

Auch Kohlevergasungskraftwerke, die ein fortschrittliches Verfahren der Kohleverstromung umsetzen, beinhalten Komponenten, die in China oder Indien noch nicht oder nur teilweise gefertigt werden können. Neben der bei diesem Kraftwerkstyp ebenfalls eingesetzten Gasturbine gilt dies vor allem für die Hauptkomponente, den Kohlevergasungsreaktor. Außer den Werkstoffanforderungen bedingen bei diesem die erforderliche Kenntnis chemischer Reaktionen unter hohen Drücken und die komplexe Integration der Vergasungsanlage in die Kraftwerksanlage eine hohe Importquote. An der Gesamtinvestition haben die Importe hier einen Anteil von über 40 %.

Trotz der Unterschiede zwischen den betrachteten Kraftwerkskonzepten zeigt sich an diesen Beispielen bereits deutlich, was die Untersuchung mit zahlreichen weiteren Details belegt: Selbst fortschrittlichste Kraftwerkstechnologien bestehen zu einem großen Anteil aus herkömmlichen Standardkomponenten, die schon heute in China oder Indien gefertigt werden können. Ausgeprägter technisch bedingter Importbedarf besteht immer nur für ausgewählte Komponenten und auch dort nicht für alle Stufen der Produktion.

Einfluss des Technologietransfers

Neben der heutigen Höhe der Produktionsanteile ist ihre zeitliche Entwicklung wichtig. Die Untersuchungsergebnisse zeigen ein generelles, mitunter starkes Absinken der Importnotwendigkeiten Chinas und Indiens über die nächsten zehn Jahre. Vor allem für die marktgängigen oder marktnahen Dampfkraftkonzepte ergibt sich eine praktisch vollständige Produktionsübernahme durch die beiden betrachteten Zielländer. Ausnahme ist hier der anhaltend hohe Importanteil bei der Leittechnik, der bei allen Konzepten in ähnlichem Ausmaß vorliegt.

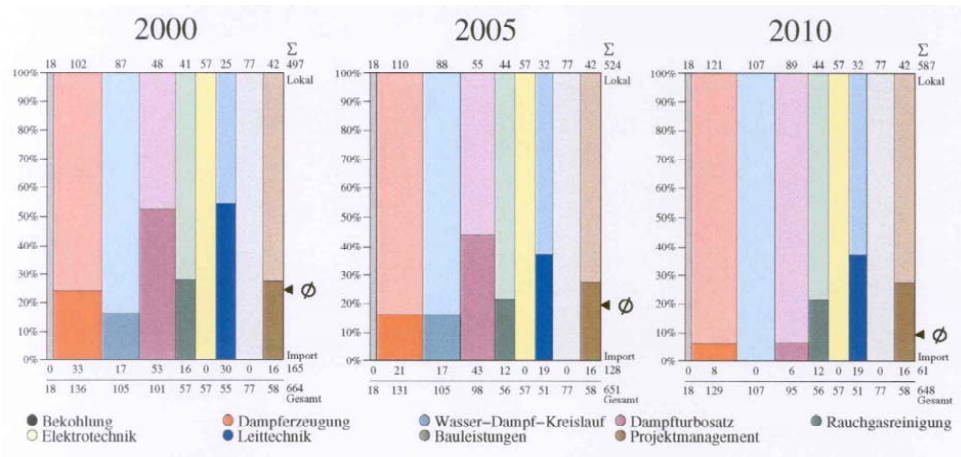


Abbildung 3: Die technisch bedingten Importe (intensiv gefärbte untere Säulenabschnitte) werden zurückgehen, im Beispiel hier für die Errichtung eines überkritischen Dampfkraftwerks in Indien. Der Rückgang verläuft für die unterschiedlichen Komponenten (Säulen) nicht gleichermaßen schnell und vollständig. Vor allem für die Hauptkomponenten (breite Säulen) sinkt der Importbedarf auf unter 10 %. Diese Produktionsverlagerung hat auch Einfluss auf die Höhe der Gesamtinvestition (Breite der Rechtecke), die sich leicht verringert. Alle Zahlenangaben sind spezifische Investitionen in US-\$₁₉₉₇/kW_{el}.

Für die Gas- und Dampfturbinenkraftwerke bleiben höhere Importanteile vor allem bei der Gasturbinenfertigung bestehen. Noch fortschrittlichere Konzepte weisen bleibend hohe Importnotwendigkeiten Chinas und Indiens hauptsächlich für jene Hauptkomponente auf, die mit Blick auf Funktion und Innovation bestimmend sind. Dies gilt beispielhaft für den Kohlevergasungsreaktor oder die Brennstoffzelle.

Im Gegensatz zur Analyse des Status quo zeigen sich in der zeitlichen Entwicklung deutliche Unterschiede zwischen den beiden betrachteten Ländern: China kann bei den konventionellen Dampfkraftwerken immer mehr Produktionsanteile an sich ziehen, da die Voraussetzungen für die Herstellung von Kesselrohren und Dampfturbinen eher vorliegen; Indien wird bei den Gasturbinen eher in der Lage sein, größere Produktionsanteile zu übernehmen, da in Teilbereichen bereits erste Produktionserfahrungen vorliegen.

Typische Größenordnungen für die erforderlichen Importanteile liegen bei marktnahen Kraftwerkskonzepten für das Jahr 2000 um 30 %, für 2005 unter einem Viertel und für 2010 bei etwa 10 %. Das Absinken dieser Werte beschreibt den Einfluss des internationalen Technologietransfers in der Kraftwerksindustrie. Wird er vernachlässigt, so überschätzt man die mittelfristigen Exporterwartungen um den Faktor zwei bis drei.

Umstrukturierung der notwendigen Importe

Die Untersuchungsmethodik beinhaltet neben der Bestimmung von Höhe und zeitlicher Entwicklung der Importanteile auch die Analyse, welche Produktionssektoren davon betroffen werden. Bei dieser Betrachtung zeigt sich, dass die verbleibenden Importnotwendigkeiten Chinas und Indiens weniger die beschäftigungsintensiven Produktionssektoren Metall- und Maschinenbau betreffen, die typisch für den klassischen Kraftwerksbau sind. Die in diesen Sektoren dominierenden spanenden und schweißtechnischen Fertigungsverfahren sind bis auf wenige Ausnahmen in China und Indien in einem hohen Maße verfügbar. Dies gilt vor allem in Kombination mit Standardwerkstoffen.

Weitaus geringere Verfügbarkeiten liegen hingegen bei anderen Verfahren vor, die durch hohe Kapitalintensität geprägt sind. Dazu zählt die Erzeugung von Stahl, vor allem in höheren Güten, und teilweise Schmiede- und Gussverfahren. Auch wissensintensive Bereiche weisen in China und Indien geringere Verfügbarkeiten auf.

Was dort für die Errichtung eines Kraftwerks weiterhin aus den Industrieländern importiert werden muss, stammt daher aus weniger beschäftigungsintensiven Sektoren: Eisen- und Stahlerzeugung (z. B. für hochwarmfeste Spezialstähle), Dienstleistungen (z. B. für Auslegungsberechnungen oder Projektentwicklung) und Informationstechnik.

Rückwirkungen auf die Beschäftigungen in den Ursprungsländern

Zum einen die niedrigen Produktionsanteile, die aus Sicht der Zielländer importiert werden müssen, und zum anderen die geringen Beschäftigungsintensitäten der Produktionssektoren, die in den Ursprungsländern hauptsächlich betroffen werden, führen in der Summe zu geringen Beschäftigungseffekten in den Ursprungsländern. Wird in China oder Indien ein Kraftwerk gebaut, so schafft oder sichert dies in den Industrieländern nur 10 - 20 % der Beschäftigung, die erforderlich wäre, um ein Kraftwerk komplett in Deutschland zu errichten. Dieses Verhältnis liegt bei modernen Kraftwerkstypen etwas höher, aber nur für sehr fortschrittliche Kraftwerkskonzepte ergeben sich deutlich höhere Werte. Für alle praxisrelevanten Fälle ist daher nachdrücklich zu unterscheiden, welches Investitionsvolumen z. B. ein deutscher Hersteller in China abwickelt, und welcher Teil davon tatsächlich in Deutschland produziert wird, da sich dementsprechend Rückwirkungen in unterschiedlichen Größenordnungen einstellen: Aus Kraftwerksprojekten im Gigawatt-Bereich resultieren Beschäftigungseffekte nicht in Höhe von Zehntausenden von Personen-jahren, sondern von Tausenden, und mittelfristig nur noch von Hunderten.

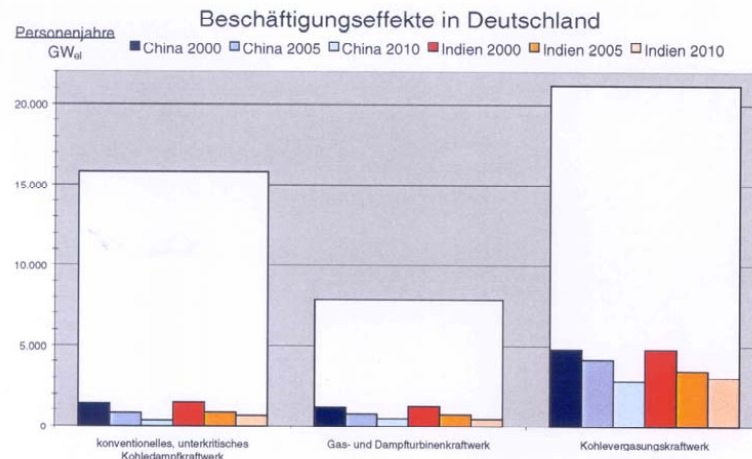


Abbildung 4: Die Beschäftigungseffekte hängen vom Kraftwerkstyp und vom Zielland ab. Für die wichtigsten Konzepte, wie beispielsweise das konventionelle unterkritische Dampfkraftwerk (links) gilt: Aus der Errichtung einer 1.000-MW-Anlage resultieren im Ursprungsland Deutschland rund 1.000 Personenjahre Beschäftigung, die sich in zwei Fünf-Jahres-Schritten jeweils halbieren. Dem stehen hypothetische 15.000 Personenjahre gegenüber, die sich für den Fall errechnen, wenn das Kraftwerk komplett in Deutschland produziert würde (weiße Säulen).

Während somit die Effekte einzelner Projekte deutlich zurückgehen, nimmt die Zahl der Projekte, genauer: die jährlich installierte Kraftwerksleistung, in China und Indien stark zu. In der Zusammenschau beider Entwicklungen zeigt sich, dass die rückläufigen Effekte der Einzelprojekte von der Marktausdehnung überkompensiert werden.

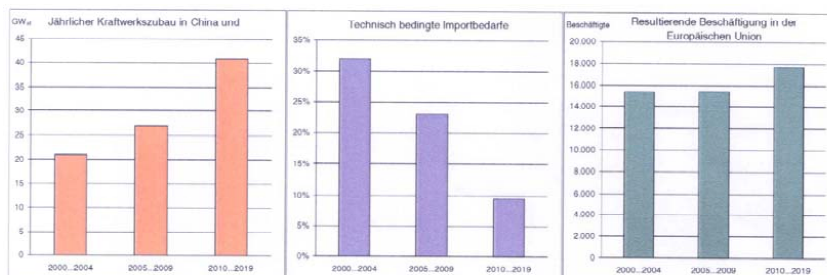


Abbildung 5: Trotz fortschreitenden Technologietransfers: Auch in den nächsten Jahren werden die Kraftwerksmärkte China und Indien in der gleichen Größenordnung wie heute zur Beschäftigung in Deutschland und Europa beitragen.

Fazit

Die Kraftwerksmärkte Chinas und Indiens werden also auch in Zukunft etwa im heutigen Umfang zur Schaffung und Sicherung von Beschäftigung in Deutschland und anderen Industrieländern beitragen können. Dies bedeutet aber keine Fortschreibung des heutigen Zustands. Es findet vielmehr eine Umschichtung von den Sektoren Metall- und Maschinenbau zur Stahlerzeugung einerseits und zu Dienstleistungen und Informationstechnik andererseits statt. Eine Auslastung der bestehenden Produktionskapazitäten hierzulande durch die wachsende Nachfrage in Übersee wird es daher ebenso wenig geben wie ein komplettes Wegbrechen des deutschen Kraftwerkbaus. Zu erwarten ist eine andauernde Beteiligung auch deutscher Unternehmen am Kraftwerksbau in China und Indien in der gleichen Größenordnung wie heute, allerdings mit deutlich veränderten Schwerpunkten.

2001

**Von Käfern,
Bioreaktoren und
antikem Gestein**

Von Käfern, Bioreaktoren und antikem Gestein

Vorbild: Kartoffelkäfers Riechorgan

Nach wie vor stellt der Kartoffelkäfer den wirtschaftlich bedeutendsten Schädling der Landwirtschaft dar. Wurde er noch vor 50 Jahren einfach per Hand von den Kartoffelpflanzen abgesammelt, entledigt man sich des Käfers heute durch Insektizide. Das zeitigt große Erfolge. Allerdings rückten in jüngster Zeit zunehmend Umweltverträglichkeitsprobleme in den Vordergrund. Denn: Der Kartoffelkäfer ist nicht ständig auf dem Feld präsent – Insektizide dagegen werden permanent ausgebracht. Deshalb wäre es von Vorteil, einen Kartoffelkäfer-Sensor zu besitzen, der anzeigt, wann Insektizide gesprüht werden müssen. Genau dieser Aufgabe stellte sich Peter Schroth in seiner Promotionsarbeit, die im Institut für Schichten und Grenzflächen entstand. Sobald Käfer auf Kartoffelpflanzen landen, beginnen sie, die Blätter anzuknabbern. Die verletzten Blätter setzen ein komplexes Gemisch aus verschiedenen Duftstoffen frei – ähnlich dem Geruch frisch geschnittenen Grases. Dieses Duftstoffgemisch ist es, das andere Käfer auf das Kartoffelfeld lockt. Sie können diesen Duft mit Hilfe ihres feinen Geruchsinnes selbst aus größter Entfernung wahrnehmen und finden so Futterstelle und für die Fortpflanzung unerlässliche Artgenossen. Die niedrigsten Konzentrationen, die sie dabei noch wahrnehmen können, liegen im Bereich von einigen ppt (parts per trillion = Teile pro Billion): die selbe Konzentration, die man erhält, wenn man ein einziges Zuckerkristall in einem Swimmingpool auflösen würde. Für den Bio-Sensor wird nun des Käfers "Riechorgan" genutzt. Denn alles, was er riecht, wird in den Fühlern in Nervenimpulse umgewandelt, die ins Gehirn geleitet werden, dort erkannt und verarbeitet werden, um dann eine bestimmte Reaktion auszulösen – nämlich: Nichts wie hin zum Kartoffelfeld! Die dabei auftretenden Nervenimpulse macht man sich beim Sensor zu nutze, denn diese lassen sich mit Hilfe eines Feldeffekttransistors (FET) messen. Zwischen Fühler und Transistor werden die elektrischen Signale durch eine Elektrolytlösung geleitet. Mittels dieser Vorrichtung lässt sich also der Nachweis geschädigter Kartoffelpflanzen führen: Durch den Käferfraß werden Duftstoffe frei, die vom Fühler des Käfers in elektrische Signale umgewandelt werden, welche vom FET gemessen, verstärkt und registriert werden. Und das Beste: Dieser Bio-Sensor könnte in Zukunft auch mit Zellen oder ganzen Nervenfasern statt des Käferfühlers verwendet werden. Die Zellen könnten dann Aufschluss über das Vorliegen giftiger Substanzen geben, und die Nervenfasern könnten so eventuell in der medizinischen Prothetik genutzt werden.

Innovative Technik für die Krebstherapie

Krebs ist in Deutschland nach den Herz-Kreislauf-Erkrankungen zweithäufigste Todesursache. Chemotherapie ist bei Krebs trotz der Nebenwirkungen die Standardtherapie: Der Patient erhält Substanzen, die für solche Zellen giftig sind, die sich schnell teilen. Das sind zuerst natürlich die Krebszellen, aber auch alle blutbildenden Zellen. Deshalb muss der Arzt direkt nach einer Hochdosis-Chemotherapie dem Patienten blutbildende Stammzellen injizieren, die dann ein neues blutbildendes System aufbauen können. Diese Zellen stammen entweder vom Patienten selbst – man hat sie ihm vor der Chemotherapie entnommen – oder von einem immunologisch verträglichen Fremdspender. Oft entnimmt man sie aber auch dem Nabelschnurblut Neugeborener, da dieses reich an blutbildenden Zellen und zudem leicht verfügbar ist. Allerdings müssen sie noch vermehrt werden, um nach der Transfusion in den Patienten den Wiederaufbau eines blutbildenden Systems anzustoßen. Die Kultivierung von menschlichen blutbildenden Zellen im klinischen Maßstab stellte bislang ein großes technisches Problem dar. Sebastian Schmidt nahm sich in seiner Dissertation dieses Problems an. Alle reifen Blutzellen des Menschen – rote und weiße Blutkörperchen – haben eine nur begrenzte Lebensdauer. Daher müssen jeden Tag in einem gesunden erwachsenen Menschen Milliarden Zellen ersetzt werden. Produziert werden diese aus den Stammzellen im Knochenmark. Dr. Schmidt hat im Institut für Biotechnologie zwei verschiedene Bio-Reaktoren zur Vermehrung von blutbildenden Zellen aus Nabelschnurblut entwickelt: einen Festbettreaktor und einen Suspensionsreaktor. Im Festbettreaktor liegen die Zellen in Kollagenprotein-Kügelchen eingenistet vor, gleichmäßig von immer frischer Nährlösung umströmt, die permanent mit Sauerstoff angereichert und durch eine Pumpe befördert wird. Dieser Reaktor baut recht gut die natürlichen Verhältnisse im Knochenmark nach: Das Festbett aus Kollagen entspricht dem Knochenmark, der Umlauf dem Blutkreislauf, die Pumpe dem Herzen und das Begasungssystem der Lunge. Auch die Ergebnisse waren mehr als zufriedenstellend: Nach zweiwöchiger Kultivierung von blutbildenden Zellen aus Nabelschnurblut konnten diese um den Faktor 100 vermehrt werden. Der zweite Reaktor-Typ ist ein Suspensionsreaktor, in dem die Zellen frei umher schwimmen. Durch einen speziell platzierten Filter gelang es, die Zellen beim Absaugen der Nährlösung schonend im Reaktor zu halten. Das Ergebnis: Nach zwei Wochen vermehrten sich die blutbildenden Zellen um das 70-fache. Trotz des leichten biologischen Nachteils gegenüber der Festbettvariante bietet der Suspensionsreaktor einen wesentlichen Vorteil gegenüber dem Festbettreaktor: Er ist im klinischen Laboralltag wesentlich leichter zu handhaben. Dr. Schmidt konnte abschließend sowohl im Tierversuch wie in einer ersten klinischen Studie nachweisen, dass sein Suspensionsreaktor zu klinisch verwertbaren Ergebnissen führt.

Geheimnisse antiker Steine gelüftet

Mit Hilfe der Kernspintomographie (NMR) ist Simone Baer-Lang im Rahmen ihrer Promotionsarbeit den Geheimnissen alter Steine auf die Spur gekommen.

Was versteht man unter NMR? Atomkerne verfügen über eine Eigendrehung, den sogenannten Spin, und damit über ein magnetisches Moment. Dieses ist in einer Substanz ohne äußere Einwirkung statisch verteilt, so dass sich letztendlich kein resultierendes magnetisches Gesamt-Moment ergibt. Durch Anlegen eines äußeren Magnetfeldes zum Beispiel an wasserstoffhaltiges Material werden die Protonen ausgerichtet. Nach Abschalten kehren die Protonen unter Aussendung elektromagnetischer Wellen in ihren ursprünglichen Zustand zurück. Diese ausgesandten Wellen werden aufgefangen und geben Auskunft über die Protonendichte und über die Umgebung der Protonen in der untersuchten Substanz.

Solche NMR-Messungen lassen sich auch mit speziell vorbereitetem, sogenanntem hyperpolarisiertem Xenon durchführen. Diese Methode, NMR mit hyperpolarisiertem Xenon, ist im Zentrallabor für Elektronik eingesetzt worden, um alte Gesteinsproben aus Griechenland zu untersuchen. So wurden Proben aus der Ostgalerie der mykenischen Akropolis von Tiryns (1300 a.D.) und solche aus dem Fort Palamidi in Nauplion (19. Jahrhundert) untersucht. Überraschenderweise konnte Simone Baer-Lang mit der Methode tatsächlich Signale auffangen, die Aufschluss über die Struktur, Zusammensetzung und die Porengröße innerhalb des Materials geben konnten. Doch diese Ergebnisse beflügeln die Phantasie natürlich sofort weiter: Eingesetzt werden könnte diese Methode in der Erdölindustrie, um anhand von Gesteinsproben bei Probebohrungen schon frühzeitig entscheiden zu können, ob weitere Bohrungen nach Öl hier sinnvoll sind oder nicht. Weiter könnten so komplette Gemälde oder Fresken aus alter Zeit archäologisch untersucht werden.

Neue Bioreaktoren für die Krebstherapie

Sebastian Schmidt

Einleitung

In Deutschland sterben jedes Jahr über 200 000 Menschen an einer Krebserkrankung. Das sind etwa 25 % aller Todesfälle, womit der Krebs nach den Kreislauferkrankungen die zweithäufigste Todesursache darstellt. Neue Therapieformen und gentechnische Verfahren eröffnen in jüngster Zeit große Chancen in der Krebstherapie. Die Vermehrung von blutbildenden Zellen außerhalb des menschlichen Körpers spielt hierbei eine Schlüsselrolle. Die Kultivierung dieser Zellen in einem klinischen Maßstab stellt dabei nicht nur eine biologisch-medizinische, sondern auch eine technische Herausforderung dar. Während die technische Entwicklung für die Kultivierung von Mikroorganismen und tierischen Zellen heute als nahezu ausgereift gelten kann, gilt dies nicht für die humane Zellkultur. Es existieren keine speziellen Bioreaktoren (Gefäße zur Zellkultivierung), die den hohen Anforderungen der blutbildenden Zellen gerecht werden. Im Rahmen einer ingenieurwissenschaftlichen Promotion sollten daher neue technische Lösungen gefunden werden.

Das blutbildende System

Alle reifen Blutzellen des Menschen, rote sowie weiße Blutkörperchen, haben eine sehr begrenzte Lebensdauer. Je nach Zelltyp liegt diese zwischen wenigen Stunden und etwa vier Monaten. Daher müssen jeden Tag in einem gesunden erwachsenen Menschen 400 Milliarden Zellen ersetzt werden. Diese Zellen werden im Knochenmark produziert. Hier entsteht aus wenigen sogenannten Stammzellen durch Vermehrung und Reifung ständig eine sehr große Zahl neuer reifer Zellen, die dann in das Blut übergehen. Zellen, die sich in der Reifung befinden, werden als Vorläuferzellen bezeichnet und wie die Stammzellen zu den blutbildenden Zellen gezählt (Abbildung 1).

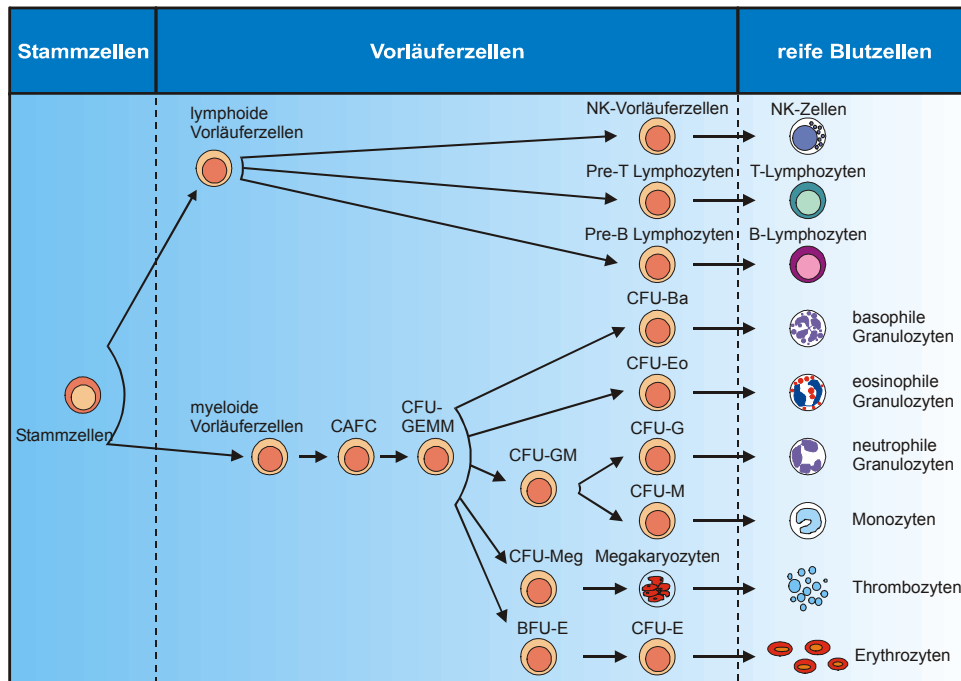


Abbildung 1: Das blutbildende System

Das System der Blutbildung ist extrem komplex und zum jetzigen Zeitpunkt erst teilweise verstanden. Bekannt ist, dass nur Stammzellen eine unbegrenzte Lebensdauer haben, alle anderen, auch die Vorläuferzellen, sind dagegen nicht dauerhaft lebensfähig.

Medizinischer Hintergrund

Die Chemotherapie ist ein Standardverfahren in der Krebstherapie. Dabei werden dem krebserkrankten Patienten Substanzen verabreicht, die für solche Zellen giftig sind, die sich schnell teilen. Zuerst sind das Krebszellen, aber eben auch blutbildende Zellen. Dadurch, dass das blutbildende System des Patienten nicht vollständig zerstört werden darf, ist die Höhe der verabreichten Dosis begrenzt. So geschieht es in vielen Fällen, dass auch Krebszellen die Therapie überleben und der Patient nach einer gewissen Zeit erneut erkrankt.

Bei der sogenannten Hochdosis-Chemotherapie gibt man dem Patienten bewusst eine Dosis, die so stark ist, dass sie auch das blutbildende System dauerhaft schädigt oder sogar zerstört. Die Chance, wirklich alle Krebszellen zu töten, erhöht sich damit deutlich. Direkt nach der Chemotherapie werden dem Patienten blutbildende Stammzellen zurückgegeben, die dann ein neues blutbildendes System aufbauen können. Die Zellen

können dabei entweder dem Patienten vor der Therapie selbst entnommen werden (eine sogenannte autologe Spende) oder von einem immunologisch verträglichen Fremdspender stammen (allogene Spende).

Die Kultivierung der Zellen außerhalb des Körpers in einem Bioreaktor kann aus verschiedenen Gründen sinnvoll sein (Abbildung 2). Ein Beispiel ist die Vermehrung von Zellen aus Nabelschnurblut. Das Blut in der Nabelschnur von Neugeborenen ist sehr reich an blutbildenden Zellen und leicht verfügbar, da die Nabelschnur nach der Geburt normalerweise verworfen wird. Darüber hinaus ist es immunologisch sehr gut verträglich, bei einer allogenen Spende kommt es so zu weniger der gefährlichen Abstoßungsreaktionen.

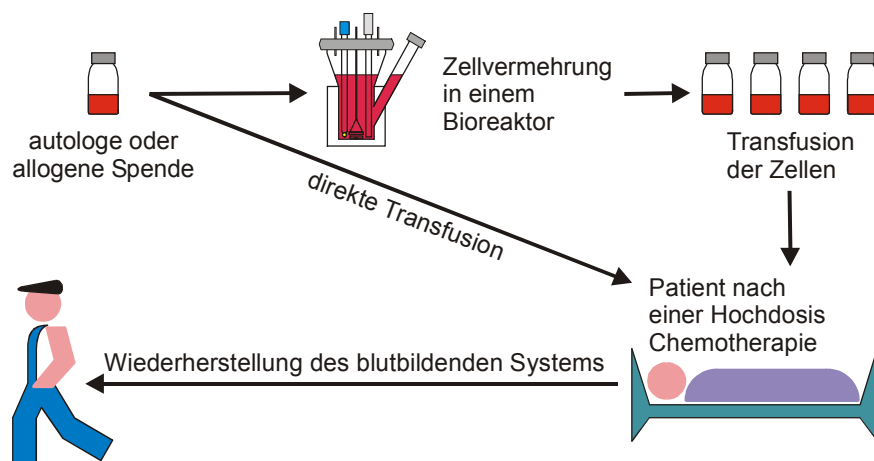


Abbildung 2: Das Prinzip der Zellrückgabe nach einer Hochdosis-Chemotherapie

Diese vorteilhaften Eigenschaften waren Anlass, große Nabelschnurblutbanken aufzubauen, so dass heute immer seltener öffentliche Aufrufe für das Auffinden eines passenden Spenders notwendig sind. Der große Nachteil des Nabelschnurblutes ist die geringe Menge einer Spende. Die Zellmenge aus einer Spende reicht nicht aus, um einen Erwachsenen zu therapieren und ein Mischen von mehreren Proben ist aus immunologischen Gründen ungünstig. An dieser Stelle könnte die Kultivierung und damit Vermehrung der Zellen in einem Bioreaktor die Möglichkeit bieten, genügend Zellen aus einer Spende zu generieren, so dass der Einsatz von Nabelschnurblut auch bei der Therapie von Erwachsenen möglich ist.

Neue Bioreaktoren

Am Institut für Biotechnologie 2 wurde im Rahmen einer Promotion ein System von neuartigen Bioreaktoren entwickelt. Es gibt prinzipiell zwei Möglichkeiten, blutbildende Zellen in einem Bioreaktor zu kultivieren, immobilisiert oder suspendiert. Bei der ersten Methode wachsen die Zellen fest auf einer Oberfläche, bei der zweiten schwimmen die Zellen frei im flüssigen Nährmedium. Welche Methode für blutbildende Zellen die geeignetste ist, ist noch ungeklärt. Die immobilisierte Kultur entspricht wesentlich besser den natürlichen Bedingungen im Knochenmark, die Suspensionskultur ist dagegen in der Praxis deutlich einfacher zu kontrollieren. Daher wurde für beide Kultivierungsarten jeweils ein neuer Bioreaktor entwickelt, ein Festbettreaktor für die immobilisierte Kultur und ein spezieller Suspensionsreaktor. Zusätzlich wurden zu jedem Reaktortyp auch passende Kleinstsysteme konstruiert, die vergleichende Laboruntersuchungen im Mikromaßstab ermöglichen.

Der Festbettreaktor

Im Festbettreaktor werden die Zellen auf etwa 0,5 Millimeter kleinen schwammartigen Kugeln aus Kollagen (ein Eiweiß) immobilisiert. Abbildung 3 zeigt einen solchen Kollagenträger ohne Zellen und einen voll bewachsenen. Die Zellen haben hier die Möglichkeit in einer dem Knochenmark ähnlichen dreidimensionalen Struktur zu wachsen.

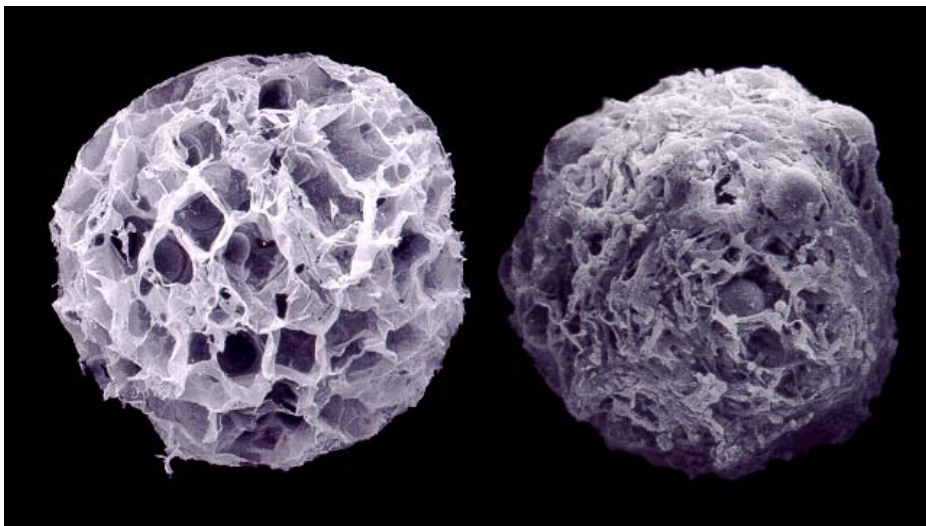


Abbildung 3: Kollagenträger für die Zellkultivierung (Durchmesser ca. 0,5 mm). Links ein leerer, rechts ein mit Zellen vollbewachsener Träger.

Zehn Milliliter dieser Träger liegen im Reaktor als Schüttung, einem sogenannten Festbett, in einer Glasröhre auf einem Haltesieb. Das Festbett wird kontinuierlich mit Nährmedium durchströmt, das durch einen Umlauf im Kreis gepumpt wird. In denselben Umlauf wird sehr langsam frisches Nährmedium und über ein Begasungssystem Sauerstoff zugeführt, über einen Ablauf wird verbrauchtes Nährmedium abgeführt. Dieser Aufbau mimikriert die natürlichen Verhältnisse im menschlichen Körper. Das Festbett entspricht dem Knochenmark, der Umlauf dem Blutkreislauf, die Umlaufpumpe dem Herz und das Begasungssystem der Lunge (Abbildung 4).

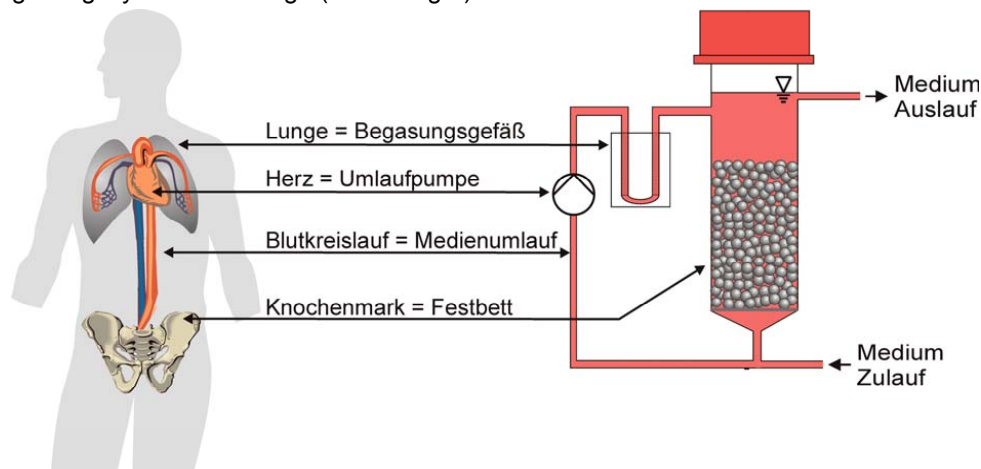


Abbildung 4: Das Prinzip des Festbettreaktors, als Simulation des menschlichen Körpers

Die Verwendung von Kollagenträgern hat dabei einen entscheidenden praktischen Vorteil gegenüber anderen Trägermaterialien, wie zum Beispiel Glas. Will man die Zellen einem Patienten injizieren, muss man sie vorher von den Trägern ablösen. Bei Trägern aus Kollagen lässt sich das besonders schonend mit dem Enzym Kollagenase erreichen, das das Kollagen auflöst, die Zellen aber nicht schädigt.

Durch die Möglichkeit in den Festbettreaktor ständig frisches Nährmedium zuzuführen kann eine Kultivierung der blutbildenden Zellen unter sehr konstanten Bedingungen durchgeführt werden. Dieses ist ein wesentlicher Vorteil gegenüber herkömmlichen Kulturtechniken, bei denen das Nährmedium nur in bestimmten Zeitintervallen erneuert wird. Die Zellen werden dadurch sehr plötzlich neuen Umgebungsbedingungen ausgesetzt, an die sie sich adaptieren müssen. Während dieser Zeit haben sie üblicherweise auch eine verringerte Wachstumsgeschwindigkeit.

Mit diesem Reaktor ist es gelungen, in einer zweiwöchigen Kultivierung blutbildende Zellen aus Nabelschnurblut um einen Faktor 100 zu vermehren. Dies würde ausreichen, um aus einer einzelnen Nabelschnurblutspende genügend Zellen für die Therapie eines Erwachsenen zu gewinnen. Für den praktischen Einsatz des Systems sind aber noch

weitere Untersuchungen nötig. Für einen klinischen Einsatz muss die Sicherheit dieser relativ aufwendigen Technik zunächst durch langwierige Tests nachgewiesen werden.

Der Suspensionsreaktor

Der zweite neuentwickelte Reaktortyp ist ein Suspensionsreaktor. Hier werden die Zellen in einem Glasbehälter direkt im Nährmedium schwimmend kultiviert. Das Medium wird durch einen Rührer ständig durchmischt. Ein solcher sogenannter Rührkessel ist für große Maßstäbe über einen Liter heutzutage eine Standardtechnik. Ziel der Neuentwicklung war die Minimierung des Volumens, um die geringen Zellmengen einer Nabelschnurblutprobe verwenden zu können. In Abbildung 5 ist der neue Suspensionsreaktor dargestellt.

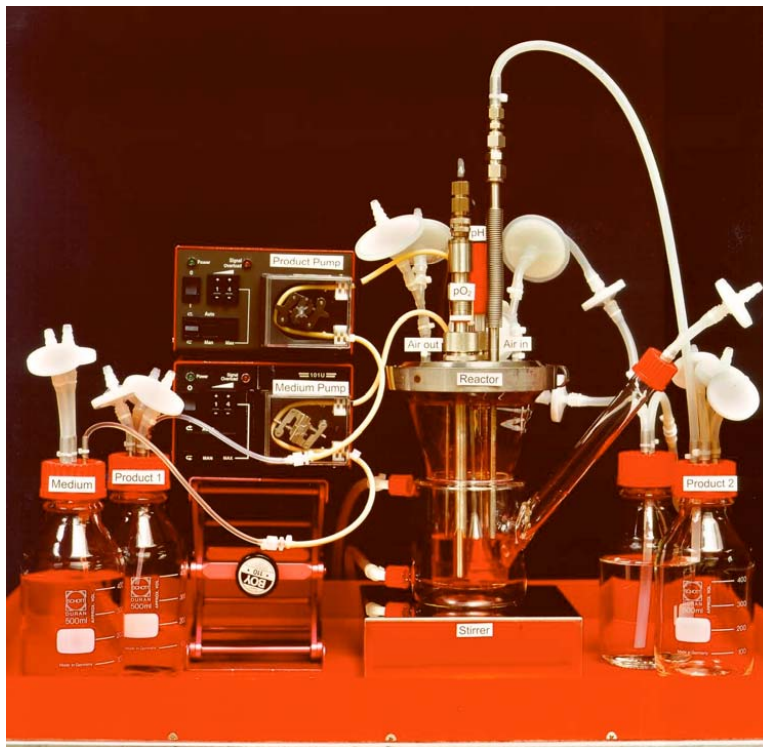


Abbildung 5: Fotografie des neuen Suspensionsreaktors

Der Reaktor ist seitlich mit einem großen Stutzen ausgestattet, um Proben entnehmen zu können. Darüber hinaus besitzt er Elektroden für die Messung des Sauerstoffgehalts und des pH-Wertes, sowie Zuläufe für die Sauerstoffversorgung. Neben dem Reaktor sieht man Flaschen aus denen frisches Nährmedium zugepumpt und in die verbrauchtes

abgepumpt werden kann. Dadurch kann man wie beim Festbettreaktor sehr stabile Kulturbedingungen einstellen.

Allerdings würden die Zellen in einem solchen Suspensionssystem zusammen mit dem verbrauchten Medium abgepumpt, da sie frei im Medium schwimmen und nicht an Trägern festgewachsen sind. Die Zellen müssen daher im Reaktor zurückgehalten werden. Im neuen Suspensionsreaktor geschieht das durch einen speziell platzierten Filter. Das Prinzip dieser Zellrückhaltung zeigt Abbildung 6.

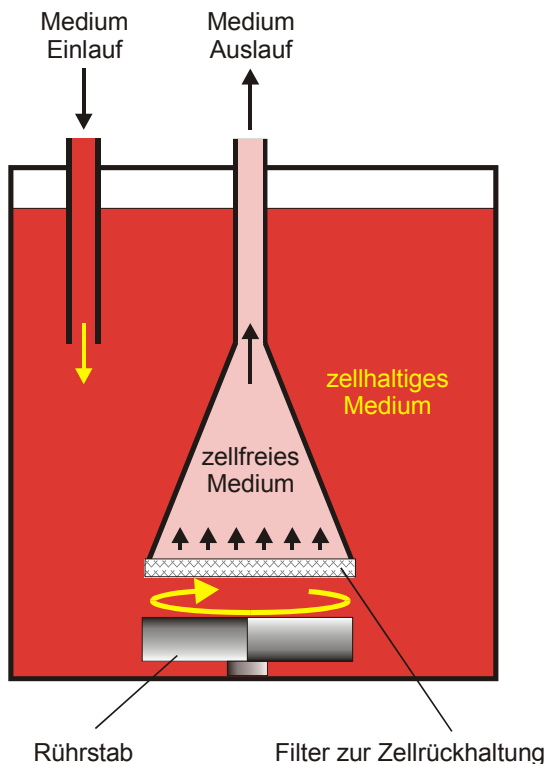


Abbildung 6: Das Prinzip der Zellrückhaltung im neuen Suspensionsreaktor

Der Filter ist in den Medienablauf integriert und liegt sehr weit unten im Reaktorraum. Erst hierdurch ist es möglich, den Reaktor mit sehr kleinen Volumina von nur 40 ml zu betreiben. Beim Einsatz von Filtern besteht allerdings die Gefahr, dass die Zellen den Filter verblocken. Um das zu verhindern, wurde ein spezieller magnetisch angetriebener Rührstab konstruiert. Dieser bewegt sich dicht vor der Filterfläche und sorgt durch eine erhöhte Strömung dafür, dass sich keine Zellen am Filter festsetzen können. Der Rührstab dient gleichzeitig dazu das Nährmedium im ganzen Reaktor sehr zellschonend zu durchmischen.

Auch mit dem Suspensionssystem konnten Zellen aus Nabelschnurblut erfolgreich vermehrt werden, allerdings innerhalb von zwei Wochen nur um einen Faktor 70. Dies verdeutlicht besonders den Vorteil, den das Festbett durch die Mimikrierung der natürlichen Bedingungen im Menschen hat.

Praktischer Einsatz des neuen Suspensionsreaktors

Trotz der leichten biologischen Nachteile bietet der Suspensionreaktor einen wesentlichen praktischen Vorteil gegenüber dem Festbettreaktor. Die prinzipielle Verfahrensweise des Reaktors entspricht der von etablierten Bioreaktoren mit großen Volumina. Dadurch ist ein klinischer Einsatz des Suspensionsreaktors wesentlich leichter durchzuführen. Im Rahmen der Promotion wurden zwei Anwendungen erfolgreich durchgeführt, in einem Tierversuch und in einer klinischen Studie bei Kinderkrebs.

Der Tierversuch ist heute immer noch die deutlich aussagekräftigste Methode um klinische Anwendungen zu testen. Die Einsatzfähigkeit des Suspensionsreaktors für die Zellvermehrung bei einer Hochdosis-Chemotherapie wurde daher in einem speziellen Experiment mit Mäusen überprüft. Die Mäuse wurden dazu so stark radioaktiv bestrahlt, dass ihr blutbildendes System einen zunächst irreparablen Schaden davontrug. Danach wurden den Tieren Nabelschnurblutzellen, die im Suspensionsreaktor vermehrt wurden, injiziert. Für diese Experimente werden spezielle Mäusestämme eingesetzt, um keine Verträglichkeitsprobleme der menschlichen Nabelschnurblutzellen zu bekommen. Sechs Wochen nach der Transplantation waren bei den Mäusen noch immer menschliche Zellen im Blut nachzuweisen, was die Ausbildung eines neuen funktionsfähigen blutbildenden Systems beweist. Keine Maus starb bei den Versuchen an den Folgen des durch Strahlung zerstörten blutbildenden Systems. Mit diesen Versuchen konnte die Eignung des Suspensionsreaktors für die sichere Vermehrung blutbildender Zellen gezeigt werden. In Zusammenarbeit mit dem Blutspendedienst Hessen und der Kinderkrebsklinik der Universität Frankfurt wurde der Suspensionsreaktor danach in einer klinischen Studie beim Menschen eingesetzt. Ziel dieser Studie ist es, krebserkrankten Kindern einen ganz speziellen Typ natürlicher Killerzellen (eine Blutzellart) in großen Mengen zu verabreichen. Von diesen Zellen weiß man aus Labor- und Tierexperimenten, dass sie sehr effektiv gegen bösartige Tumorzellen wirken und diese abtöten. Die Zellen wurden im Rahmen der Studie im Suspensionsreaktor vermehrt und einem Patienten mit einem bösartigen Hirntumor injiziert. Die klinische Studie befindet sich im Stadium der Verträglichkeitsprüfung. Bei dem behandelten Patienten waren keinerlei schädlichen Nebenwirkungen zu beobachten, weshalb der Versuch als erfolgreich gewertet werden kann, obwohl es auch keinen Heilerfolg gab.

Schlussfolgerung

Die neuen Bioreaktoren sind Systeme, die gezielt für die Vermehrung von Zellen des menschlichen blutbildenden Systems entwickelt wurden. Die Eignung für den Einsatz in der Krebstherapie konnte in Laborexperimenten für alle Reaktortypen gezeigt werden. Mit der Verwendung des Suspensionsreaktors im Tierversuch und in einer klinischen Studie beim Menschen ist darüber hinaus auch der Nachweis gelungen, dass die Laborergebnisse auf reale klinische Anwendungen übertragbar sind. Erst neue spezialisierte technische Lösungen werden den immer komplizierteren medizinischen Anforderungen gerecht und ermöglichen in vielen Fällen erst neue Therapieansätze.

Wie man das Riechvermögen des Kartoffelkäfers für Biosensoren nutzbar machen kann

Peter Schroth

Ein Sommertag im Nachkriegsdeutschland des Jahres 1947: In großen Gruppen ziehen Schulklassen über die Kartoffelfelder, um einer der größten Plagen Herr zu werden, mit denen man in dieser Zeit zu kämpfen hatte: Die Vernichtung ganzer Kartoffeläcker durch den Kartoffelkäfer. Vielen Menschen aus der Kriegsgeneration sind solche Szenen noch gut in Erinnerung. Heute, über 50 Jahre später, hat sich das Bild gewandelt: Zwar stellt der Kartoffelkäfer noch immer einen der wirtschaftlich bedeutendsten Schädlinge in der Landwirtschaft dar, doch die Bekämpfungsmethoden haben sich geändert. An die Stelle von Käfer suchenden Schulkindern sind die modernen Methoden der chemischen Schädlingsbekämpfung getreten. Mit großer Zuverlässigkeit können so die verschiedensten Schädlinge effektiv bekämpft werden. Doch trotz aller so erzielten Erfolge, rücken in jüngster Zeit zunehmend die damit verbundenen Umweltverträglichkeitsprobleme in den Blickpunkt. Während nämlich der Kartoffelkäfer keineswegs ständig auf einem Feld präsent ist, sondern vielmehr in Wellen auftritt, werden Insektizide permanent ausgebracht. Wenn man also zuverlässig feststellen könnte, ob und wie viele Käfer gerade an den kostbaren Pflanzen knabbern, könnte der Insektizidverbrauch und damit die Belastung für Umwelt und Trinkwasser deutlich gesenkt werden.

Genau dieses Problem war der Ausgangspunkt für meine Dissertation, die in Zusammenarbeit mit der Universität Gießen am Forschungszentrum Jülich entstand. In einem interdisziplinären Projekt wurde ein Biosensor entwickelt, der die Anwesenheit von Kartoffelkäfern auf einem Feld sehr empfindlich detektieren kann. Dabei wird die Stärke des Kartoffelkäfers, nämlich sein herausragendes Riechvermögen, quasi gegen ihn verwendet.

Wie funktioniert ein solcher Käfer-Biosensor? Wenn zunächst einige wenige Kartoffelkäfer zufällig auf ein Kartoffelfeld stoßen, beginnen sie, an den Blättern der Pflanzen zu fressen (Abbildung 1). Durch diese Verletzung wird ein komplexes Gemisch verschiedener Duftstoffe freigesetzt. Dieser sogenannte "Grünblattduft" ist dem beim Rasen mähen im Garten entstehenden Geruch sehr ähnlich. Der Kartoffelkäfer detektiert diesen Duft mit Hilfe seines feinen Geruchssinnes selbst aus größerer Entfernung, um seine Futterstelle und damit auch die für die Fortpflanzung unerlässlichen Artgenossen zu finden. Die niedrigsten Konzentrationen, die er dabei noch wahrnehmen kann, liegen im Bereich von einigen ppt (parts per trillion): dieselbe Konzentration würde man in etwa erhalten, wenn man ein einziges Zuckerkristall in einem ganzen Schwimmbecken auflösen würde. Damit

ist sein Geruchssinn eine Milliarde mal empfindlicher als der des Menschen. Solch niedrige Konzentrationen sind bei Verwendung chemischer Labormethoden nur mit erheblichem Aufwand nachzuweisen. Sensorische Meisterleistungen wie diese findet man in der Natur nicht selten. Im Laufe der Jahrtausende dauernden Evolution wurden im Tierreich viele erstaunliche Fähigkeiten entwickelt, die meist das Ziel haben, Feinde rechtzeitig zu entdecken, Futterquellen über große Entfernungen aufzufinden oder Artgenossen für die Fortpflanzung anzutreffen: So können etwa Klapperschlangen ihre Beute dank Infrarotsensoren auch im Dunkeln sehen, Fledermäuse verwenden dafür Ultraschall und Skorpione erfühlen feinste Vibrationen, die durch die Bewegung der Beutetiere ausgelöst werden.



Abbildung 1: Ein Kartoffelkäfer (*Leptinotarsa decemlineata* Say) bei einer seiner liebsten Beschäftigungen.

Beim Käfer-Biosensor nutzt man hingegen das feine Riechvermögen des Kartoffelkäfers, um die Konzentration der freigesetzten Duftstoffe in einem Kartoffelfeld auf einfache Weise zu messen und dadurch Rückschlüsse auf das Ausmaß der Schädigung ziehen zu können.

Doch wie lässt sich das technisch realisieren? Wie kann man einem Käfer die Information darüber entlocken, in welcher Intensität er gerade den Duft einer angefressenen Pflanze wahrnimmt?

Glücklicherweise werden bei fast allen Lebewesen Informationen in den Nerven in Form von elektrischen Spannungen weitergeleitet. Genauso wie beispielsweise beim Menschen Töne, Bilder oder auch Schmerzreize in ein elektrisches Signal umgewandelt und dann an das Gehirn weitergeleitet werden, wird auch beim Insektenfühler die Konzentration eines wahrgenommenen Duftstoffes als elektrisches Signal an das Käferhirn übermittelt. Genauere Untersuchungen am Fühler der Kartoffelkäfers haben gezeigt, dass sich eine elektrische Spannung längs des Fühlers ausbildet, wenn der Käfer einen Duftstoff wahrnimmt. Je größer das Signal des Fühlers, desto größer ist die Konzentration des wahrgenommenen Duftstoffes.

Zum Bau eines Sensors müsste man also diese über die Nerven übertragenen Informationen an einen elektrischen Schaltkreis und eine Elektronik weiterleiten und dort verarbeiten. Dieses Prinzip ist beispielsweise in der medizinischen Diagnostik allgemein bekannt: Beim Elektrokardiogramm, dem EKG, werden die elektrischen Signale des Herzens von einer Elektronik aufgenommen, um so die Herzfunktion untersuchen zu können.

Allerdings sind beim Insektenfühler die elektrischen Spannungen mit einigen Mikrovolt (Tausendstel Volt) sehr klein. Für die Konzeption und den Aufbau des Käfer-Biosensors sind also zwei Fragen zu klären: Welches elektronische Bauteil ist dafür geeignet, so kleine Spannungen zu messen und wie kann man die elektrischen Signale des Käferfühlers überhaupt auf dieses Bauteil übertragen? Man kann schließlich nicht einfach einen Draht an den Fühler des Käfers löten oder wie beim EKG eine Elektrode aufkleben!

Die Frage nach dem elektronischen Bauteil lässt sich recht schnell beantworten: Ein sogenannter Feldeffekttransistor oder FET ist für die Verstärkung kleiner Spannungen hervorragend geeignet. Man findet ihn als "Paradeponer" der Mikroelektronik zum Beispiel in Hifi-Verstärkern oder Handies, also überall, wo kleine Signale mit guter Qualität verstärkt werden müssen. Die Funktion eines Feldeffekttransistors lässt sich auf folgende Weise beschreiben: Das zu verstärkende Eingangssignal, also etwa ein Musiksignal, Sprache oder wie hier die Spannung eines Insektenfühlers, liegt am sogenannten Gate des Transistors an. Durch diese anliegende Spannung werden im Transistor Elektronen angezogen, die Träger des elektrischen Stroms sind. Je größer die anliegende Spannung, desto mehr Elektronen werden angezogen und desto größer ist der Stromfluss im Transistor. Bedingt durch die Eigenschaften der verwendeten Materialien kann so eine relativ kleine Spannung in einen relativ großen Strom umgewandelt werden.

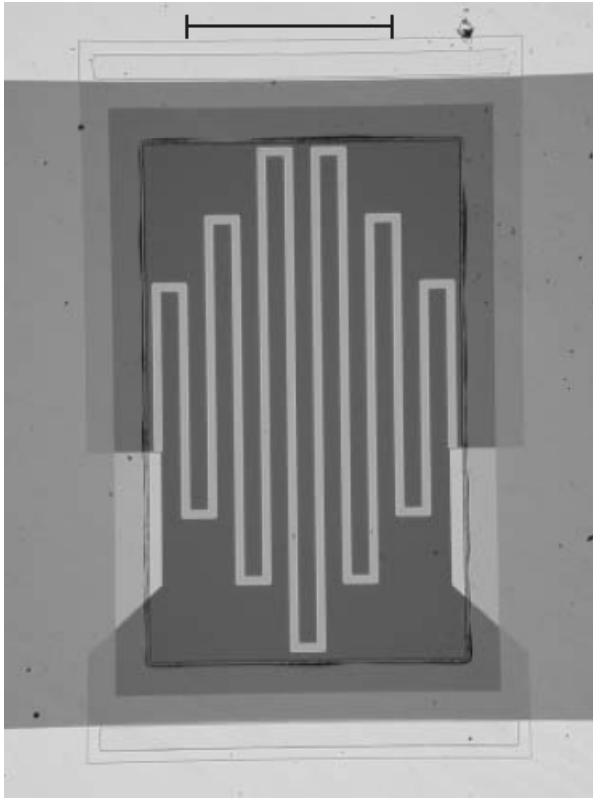


Abbildung 2: Ein Feldeffekttransistor unter dem Lichtmikroskop. Man erkennt deutlich das mäanderförmige Gate. Die Länge des Balkens entspricht in etwa dem Durchmesser eines menschlichen Haares.

Für den Käfer-Biosensor kann man aber nun leider keinen FET "von der Stange" verwenden, da der elektrische Kontakt zwischen Käferfühler und FET nicht einfach aus einem Draht bestehen kann. Als optimal für diesen Kontakt erwies sich eine elektrisch leitende Elektrolytlösung, hier im wesentlichen Wasser mit Kochsalz und etwas Zucker.

Da diese Lösung allerdings die Transistoroberfläche - ähnlich wie beim Rosten - korrodieren und so das elektrische Signal unbrauchbar machen würde, musste der für den Käfer-Biosensor entwickelte Feldeffekttransistor mit einer speziellen Schutzschicht aus Siliziumnitrid versehen werden. Außerdem wurde das sogenannte "Layout", also die Form des Transistors optimiert, da der Verstärkungsfaktor des FETs direkt von dieser Form abhängt. In Abbildung 2 ist eine lichtmikroskopische Aufnahme wiedergegeben, auf der man die Mäanderform des Transistorgates erkennt. Die Größe des Transistors entspricht in etwa dem Durchmesser eines menschlichen Haares. Für den Käfer-Biosensor wurden

Wie man das Riechvermögen des Kartoffelkäfers für Biosensoren nutzbar machen kann

solche Transistoren in einem Reinraum mit den Methoden der Siliziumplanartechnologie hergestellt. Dabei verwendet man dieselben Verfahren, wie sie auch zur Herstellung von Computerchips verwendet werden.

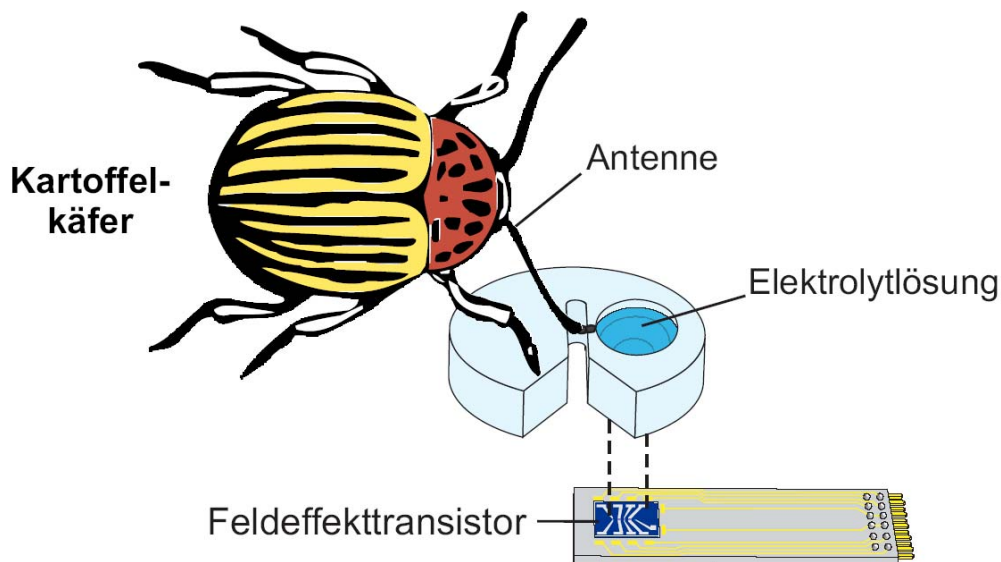


Abbildung 3: Prinzipieller Aufbau des Käfer-Biosensors

Der Aufbau des Käfer-Biosensors kann somit wie folgt beschrieben werden (Abbildung 3): Die Spitze des Fühlers wird in einen kleinen Napf mit Elektrolytlösung getaucht, der auf der anderen Seite den Kontakt mit dem Feldeffekttransistor herstellt. Die mit dem FET aufgenommenen und verstärkten Signale des Käferfühlers werden anschließend noch von einer Elektronik weiterverarbeitet und schließlich auf einem Computer dargestellt und gespeichert.

Damit ist der Tatbestand des Signaldiebstahls erfüllt! Mit dieser sogenannten "bioelektronischen Schnittstelle" ist nun der Nachweis geschädigter Kartoffelpflanzen möglich: Durch den Käferfraß werden Duftstoffe freigesetzt, diese werden vom Fühler des Käfersensors in ein elektrisches Signal umgewandelt, welches vom FET gemessen, verstärkt und schließlich auf einem Computer dargestellt wird. Ein Beispiel für eine solche Messung ist in Abbildung 4 dargestellt.

Der Vorteil des vorgestellten Sensors liegt in der relativ einfachen Methode im Vergleich zu den bisherigen aufwendigen Laborverfahren. Denkbar wäre zum Beispiel, dass der Bauer einen solchen Sensor auf seinem Traktor montiert und damit über das Feld fährt. Über eine intelligente Elektronik könnte so eine Warnung ausgegeben werden, falls das Ausmaß des Käferbefalls einen bestimmten Grenzwert überschreitet. Nur in diesem Fall müssten Insektizide ausgebracht werden.

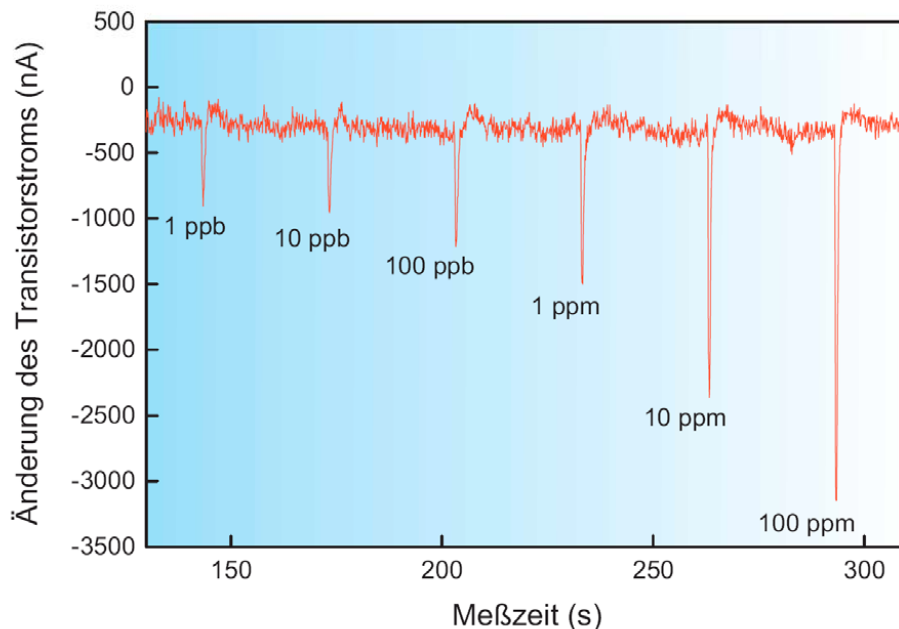


Abbildung 4: Antwort des Käfer-Biosensors auf unterschiedliche Konzentrationen von Grünblattduft (chemische Bezeichnung: cis-3-hexen-1-ol).

Was hier am Beispiel des Pflanzenschutzes dargestellt wurde, lässt sich im Prinzip auf viele Bereiche anwenden. Während der Kartoffelkäfer sehr empfindlich auf den Duft angefressener Kartoffelpflanzen reagiert, nimmt beispielsweise der Kiefernprachtkäfer den Duft von verbranntem Holz wahr, weil er seine Eier in verkohlten Baumstämmen ablegt. Erste Versuche haben gezeigt, dass mit diesem Insekt die Entwicklung eines Brandmeldesensors möglich wäre, der dank seiner Empfindlichkeit die Entdeckung von Bränden in einem sehr frühen Stadium erlaubt. Die Wissenschaftler hoffen, dass sich so Brandkatastrophen wie die am Düsseldorfer Flughafen durch eine rechtzeitige Erkennung auch kleiner Brandherde vermeiden ließen.

Blickt man noch weiter in die Zukunft, so ergeben sich viele weitere interessante Anwendungen der bioelektronischen Schnittstelle: Es muss ja nicht immer ein Insektenfühler sein, den man an den Transistor ankoppelt. Als biologisches System sind ebenso gut Zellen oder ganze Nervenfasern geeignet. Die in dieser Arbeit am Käfer-Biosensor gewonnenen Erkenntnisse könnten auch dabei helfen, einen Sensor zu bauen, bei dem einzelne oder mehrere Zellen an einen Transistor gekoppelt werden. Diese Zellen könnten man mit gentechnischen Methoden so modifizieren, dass sie für den Nachweis

Wie man das Riechvermögen des Kartoffelkäfers für Biosensoren nutzbar machen kann

bestimmter Substanzen optimiert sind. So könnte man etwa Schadstoffe, Umweltgifte oder medizinisch relevante Stoffe wie Botenstoffe aus dem Gehirn messen.

Noch visionärer ist die stabile Kopplung von ganzen Nervenfasern an einen Chip mit mehreren Transistoren. Gelingt dies jedoch, böten sich ganz neue Möglichkeiten im Hinblick auf die medizinische Prothetik. Beispielsweise könnte man durch Ankopplung eines elektronischen Chips an den Sehnerv bestimmte Sehstörungen beheben oder aufgrund von Nervenschäden gelähmte Extremitäten wieder nutzbar machen. Ob auf diese Weise Blinde wieder sehen oder Lahme wieder gehen könnten, ist allerdings schwer vorherzusagen. Doch andererseits hätten die Schulkinder nach dem Krieg wohl auch kaum geglaubt, dass man 50 Jahre später die Signale eines Insektenfühlers mit moderner Mikroelektronik würde entschlüsseln können.

NMR mit hyperpolarisiertem Xenon in hohen und niedrigen Magnetfeldern

Simone Baer-Lang

Was verbindet Michelangelos Sixtinische Kapelle, Da Vincis Mona Lisa oder das Orakel von Delphi mit Jülich? Die Antwort lautet: Kernspintomographie mit hyperpolarisiertem Xenon!

Mit Hilfe der Kernspintomographie (NMR) ist es möglich, die Struktur von Materialien oder Gewebe zu untersuchen. Mit dem hyperpolarisierten Xenon ist eine frühzeitige Erkennung z.B. alterungsbedingter Schäden oder Risse möglich.

Wie funktioniert die NMR ?

Viele Atomkerne wie z.B. der von Wasserstoff aber auch die Atomkerne von Fluor, Kohlenstoff oder Xenon besitzen einen Drehimpuls (Spin), durch den sie sich um ihre eigene Achse drehen – wie ein Kreisel. In einem starken Magnetfeld richtet sich diese Achse parallel oder antiparallel zum Feld aus. Betrachtet man nun viele Kerne auf einmal, ergibt sich in Abhängigkeit von der Stärke des Magnetfeldes ein minimaler Überschuss an Kernen, die sich mit ihrer Achse parallel zum Magnetfeld ausrichten. Bei Wasserstoff sind das drei von einer Million Kerne bei einem Magnetfeld von 1 T (Tesla); und es ist dieser kleine Überschuss von drei Kernen, der das eigentliche NMR-Signal erzeugt.

Durch Einstrahlung von Radiowellen verlieren die Kerne für einen Moment ihre Ausrichtung (Polarisation). Sobald die Radiowellen ausgeschaltet werden, kreiseln die Kerne in ihre ursprüngliche Lage zurück. Dabei senden sie selber ein Radiosignal aus, das NMR-Signal, das von einem Spektrometer empfangen wird.

Dieses gemessene Signal ist stark abhängig von der chemischen Umgebung der Kerne, also von den anderen Atomen, die den Kern umgeben. Diese anderen Atome können die Kreiselbewegung der Kerne entweder verlangsamen oder beschleunigen. Das heißt, das NMR-Signal setzt sich aus mehreren, einzelnen Signalen zusammen. Dabei spielt auch der Abstand der Atome zueinander eine Rolle.

Das gemessene Signal, die chemische Verschiebung, wird in ppm (parts per million) angegeben. Durch die unterschiedlichen Kernsignale sind Rückschlüsse auf die Struktur des untersuchten Materials möglich.

Warum hyperpolarisiertes Xenon? Und ... was ist das?

Xenon ist ein Edelgas. Damit besitzt es mehrere Vorteile: Es geht keine chemischen Reaktionen ein, es ist inert. Zudem ist Xenon sehr gut löslich in Flüssigkeiten und es ist lipophil. Aber der weitaus größte Vorteil von Xenon ist, dass es über 600 mal empfindlicher auf seine chemische Umgebung reagiert als Wasserstoff.

Wie bereits erwähnt, besitzen neben den Atomkernen von Wasserstoff z.B. auch die Kerne von Xenon einen Drehimpuls, die Kerne richten sich also in einem starken Magnetfeld aus. Der Nachteil von Xenon ist jetzt aber, dass der Überschuss der ausgerichteten Kerne, der das NMR-Signal erzeugt, lediglich ein Kern von einer Million Kerne beträgt. Doch dieser Nachteil kann mit Hilfe der Hyperpolarisation überwunden werden. Bei der Hyperpolarisation wird nämlich die Polarisation der Kernspins bzw. die Ausrichtung ihrer Achse positiv beeinflusst.

Dazu strahlt ein Laser auf eine Glaszelle, in der sich neben Xenon auch noch Rubidium befindet (Abbildung 1). Die Lichtteilchen (Photonen) des Lasers sind alle gleich. Sie besitzen die gleiche Energie, den gleichen Drehimpuls und die gleiche Richtung. Werden nun die Rubidium-Atome von den Photonen des Lasers getroffen, werden die Photonen von dem jeweils äußersten Elektron des Rubidium-Atoms "verschluckt". Dabei übertragen die Photonen ihren Drehimpuls auf die Elektronen, die Elektronen sind polarisiert. Dieser Vorgang, für den Alfred Kastler 1966 den Nobel-Preis erhielt, wird Optisches Pumpen genannt.

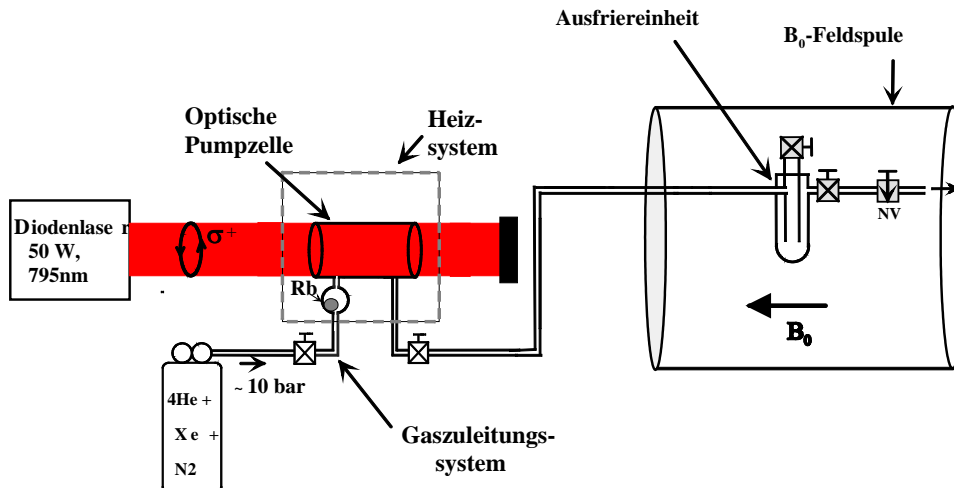


Abbildung 1: Schema der Hyperpolarisationsanlage. Der Laser strahlt durch die Optische Pumpzelle, in der sich neben Xenon auch Rubidium befindet. Nach dem Durchgang durch die Glaszelle wird er aus Sicherheitsgründen abgeblockt. Über ein Heizsystem wird die Temperatur in der Optischen Pumpzelle geregelt.

Nach dem Hyperpolarisationsvorgang kann das Xenon anschließend in der Ausfrier-Einheit bei $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ausgefroren werden (Xenon-Eis). Über das Nadelventil (NV) am Ende der Anlage wird der Gasfluss reguliert. Der gesamte Vorgang der Hyperpolarisation findet in einem Magnetfeld statt, in diesem Fall im Streufeld einer Zylinderspule.

In der Glaszelle stoßen nun die Xenon-Atome mit den polarisierten Rubidium-Atomen zusammen. Während des Kontakts geben die Rubidium-Atome die Polarisation ihrer Elektronen an die Kerne des Xenon-Atoms weiter. Dieser Vorgang wiederholt sich sehr oft: Das Xenon wird hyperpolarisiert.

Nach Beendigung dieses Vorgangs beträgt der Überschuss der Xenon-Atome, die parallel zum Magnetfeld ausgerichtet sind, nicht mehr ein Kern von einer Million Kerne sondern typischerweise 250.000 Kerne von einer Million Kerne. Diese Ausrichtung der Xenon-Kerne ist unabhängig von der Magnetfeldstärke. Dieser besondere – hyperpolarisierte – Zustand des Xenons kann für einige Zeit erhalten werden. Dazu wird das hyperpolarisierte Xenon in einem Behälter bei $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ eingefroren, es entsteht Xenon-Eis.

Das Geschehen in der Glaszelle (Abbildung 2) kann mit der folgenden Analogie verdeutlicht werden:

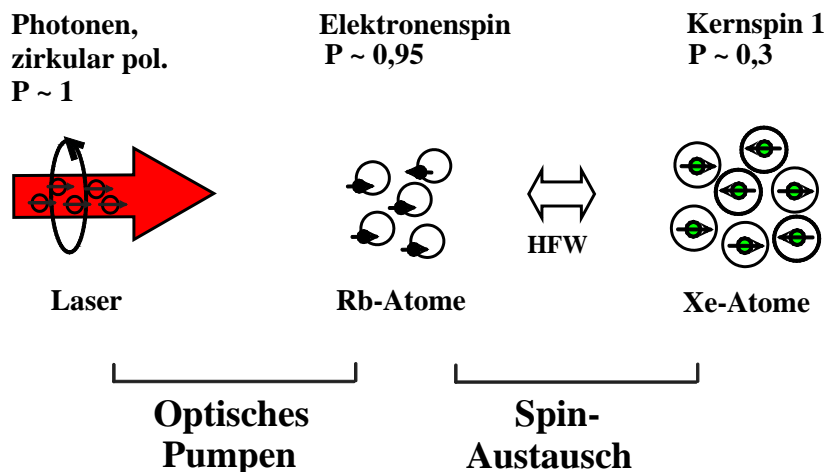


Abbildung 2: Schema des Polarisationstransfers von einem Laser über die Elektronen von Rubidium-Atomen auf die Kerne von Xenon-Atomen. Verluste wie z.B. Stöße mit anderen Atomen verhindern einen vollständigen Polarisationstransfer. Der Polarisationsgrad P beträgt für das Rubidium noch 95 % für die Xenon-Atome maximal noch 30 %.

Eine Schulklasse geht im Sportunterricht Schlittschuhlaufen. Der Lehrer möchte nun Ordnung in die Klasse bringen. Von außerhalb der Bande wirft er rotierende Medizinbälle aufs Eis. Diese sind so schwer, dass sie nur die Jungen fangen können. Sobald ein Junge einen der rotierenden Bälle fängt, beginnt er Pirouetten zu drehen, weil sich der

Drehimpuls des Medizinballs auf ihn übertragen hat. Gibt er jetzt einem Mädchen die Hand, so wird auch diese anfangen, Pirouetten zu drehen.

Im Fall der Hyperpolarisationsanlage stellt der Laser den Lehrer dar, seine Photonen entsprechen den rotierenden Medizinbällen, die Elektronen des Rubidiums sind die Jungen und die Xenon-Kerne die Mädchen, die den Drehimpuls übernehmen.

Wird jetzt dieses hyperpolarisierte Xenon auf Materialien oder Gewebe gebracht und mit einem NMR-Spektrometer oder - Tomographen untersucht, wird das Signal des hyperpolarisierten Xenons deutlich stärker sein als das Signal von Wasserstoff und zusätzlich viel empfindlicher auf seine chemische Umgebung reagieren.

Alle Wege führen nach Jülich

Im Forschungszentrum Jülich ist eine solche Xenon-Hyperpolarisationsanlage aufgebaut worden. Die Anwendungsmöglichkeiten von hyperpolarisiertem Xenon sind sehr vielfältig. Sie reichen von der Geophysik über die Grenzflächenphysik, physikalische Chemie, Neutronenphysik und Biotechnologie bis hin zur Medizin. Ein weiterer, möglicher Einsatzbereich von hyperpolarisiertem Xenon wäre die Erdölindustrie oder die Archäologie. In der Industrie wie in der Archäologie könnte das Xenon zur Charakterisierung von Gesteinsproben (z.B. Bohrkernen) eingesetzt werden.

Die Untersuchung von Gesteinsproben wird auf zwei unterschiedliche Arten durchgeführt. Im ersten Fall wird die Gesteinsprobe in ein Probenrohr gefüllt, das sich im Spektrometer befindet, und das gleichzeitig an die Hyperpolarisationsanlage angeschlossen ist. Ein ständiger Gasfluss in dem Probenrohr umspült die Gesteinsprobe mit frischem, hyperpolarisiertem Xenon während der Messungen. Das Xenon-Gas dringt selbst in kleinste Poren und Risse des Gesteins.

Die so gewonnenen Signale des Xenons geben Aufschluss über das Material, aus dem die Gesteinsprobe besteht. Die chemische Verschiebung des freien Xenon-Gases wird als Referenz auf 0 ppm festgesetzt. Dabei können diese Signale von Xenon in den Poren des Gesteins über 10 mal kleiner sein, als das Signal vom Xenon, das nicht in das Gestein eingedrungen ist. Abbildung 3 zeigt als Beispiel eine Vergrößerung des Gas-Signals einer Gesteinsprobe aus dem Fußboden der Akropolis von Tiryns. Mit einer chemischen Verschiebung von -9 ppm ist neben dem Gas-Signal ein sehr kleines, zweites Signal zu erkennen. Die negative Verschiebung deutet auf paramagnetische Zentren wie z.B. Aluminium, Nickel oder Eisen in dem Gestein hin.

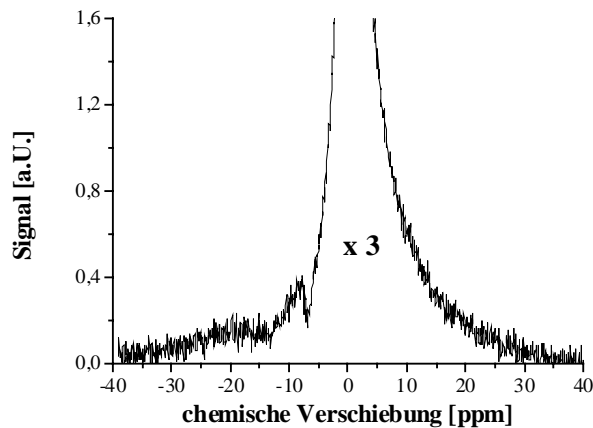


Abbildung 3: Bei dreifacher Vergrößerung des Gas-Signals ist links daneben bei einer Verschiebung von -9 ppm (parts per million) ein kleines Signal zu sehen. Durch die negative Verschiebung weist dieses Signal auf paramagnetische Zentren in der Gesteinsprobe hin.

Ein weiterer Parameter zur Charakterisierung der Gesteinsproben ist die Zerfallszeit, das ist die Zeit, innerhalb der das Xenon-Signal auf ein Drittel seines ursprünglichen Wertes abfällt.

In einem starken Magnetfeld ist das Signal selbst nach einer Stunde noch messbar – wenn sich nur hyperpolarisiertes Xenon in dem Kernspintomographen befindet.

Für die Messung der Zerfallszeit wird das Xenon auf die Gesteinsprobe "aufgefroren". Das heißt in der Hyperpolarisationsanlage herrscht ein ständiger Gasfluss und dort, wo sich die Gesteinsprobe befindet, ist der Probenbehälter (Ausfrier-Einheit) in flüssigen Stickstoff getaucht. Es entsteht Xenon-Eis. Nach 5 – 10 Minuten werden die Ventile am Probenbehälter geschlossen und der Probenbehälter für die Messung in das Spektrometer eingeführt. Dann wird der Auftauvorgang des Xenon-Eises gemessen.

Abbildung 4 zeigt den Auftauvorgang in einem Tongestein aus dem Fort Palamidi (Griechenland). Die Zerfallszeit beträgt ca. 35 Sekunden. In Gesteinen kann das Xenon-Signal aufgrund der paramagnetischen Zentren - selbst in einem starken Magnetfeld - innerhalb von wenigen Sekunden zerfallen.

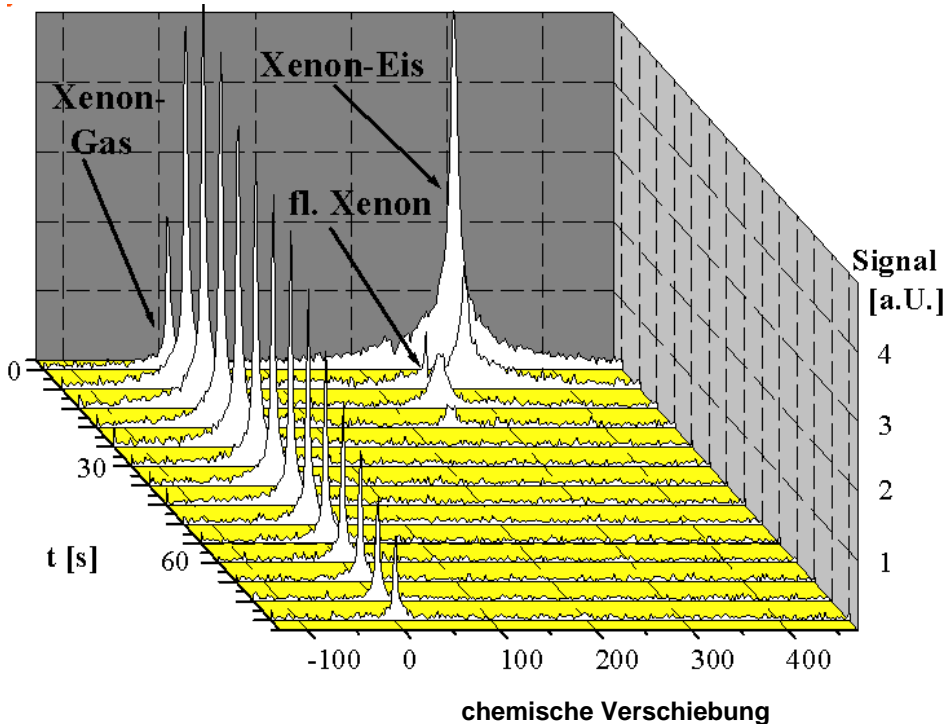


Abbildung 4: Zeitliche Entwicklung des Signals von hyperpolarisiertem Xenon-Eis auf einer Gesteinsprobe. Deutlich ist das schnelle Auftauen des Xenon-Eises zu erkennen. Das Gas-Signal ist als Referenz auf 0 ppm gesetzt worden. Innerhalb von wenigen Sekunden ist das Signal auf ein Drittel seines ursprünglichen Wertes abgefallen.

Neben diesem Parameter ist es auch die Breite und die Form der einzelnen Signale, die Aufschlüsse über die Struktur und die Porengröße innerhalb eines Materials liefert. Durch die Untersuchung von Gesteinsproben oder Bohrkerne könnte beispielsweise schon relativ früh bestimmt werden, ob sich das Weiterbohren nach Öl lohnt.

Die Kirche im Dorf lassen – oder das Fresko an der Wand

Was wäre, wenn jetzt nicht nur Gesteinsproben oder kleine Gewebeproben untersucht werden könnten sondern komplette Gemälde oder Fresken, vor Ort ohne umständliche Transporte? Also eine zerstörungsfreie Prüfung bzw. Untersuchung antiker Kunstgegenstände auf noch nicht sichtbare oder verborgene Schäden und Risse.

Weiterentwicklungen in den Hyperpolarisationsanlagen haben zu kompakteren und transportablen Hyperpolarisationsmodulen geführt. Eine Entwicklung der RWTH Aachen, die MOUSE (MOBILE Universal Surface Explorer), ermöglicht NMR-Untersuchungen von

Oberflächen und oberflächennahen Volumen mit einer Tiefe von einigen Millimetern ohne großen Aufwand.

Die MOUSE ist ein einfach zu transportierendes NMR-System. Durch ihre geringe Größe (etwa faustgroß) ist die MOUSE oder vielmehr der Probenkopf dieses Systems leicht positionierbar und kann auf jedes Objekt aufgebracht werden.

Das Zusammenspiel einer transportablen Xenon-Hyperpolarisationsanlage mit der MOUSE könnte gerade für die Früherkennung von Schäden in alten Gemälden oder Fresken von großer Bedeutung sein. Nicht nur ein Teil des Gewebes oder der Wand könnte untersucht werden - und dabei müsste immer ein Stück herausgetrennt werden – sondern das komplette Bild oder die gesamte Wand könnten an Ort und Stelle untersucht werden.

2002

**Langlebige Glühlampen,
das Spiel der Neutronen und
Vorbild Natur**

Langlebige Glühlampen, das Spiel der Neutronen und Vorbild Natur

Ein Licht geht auf

Das sprichwörtliche Licht dürfte Torsten Markus in seiner Promotionsarbeit aufgegangen sein. Seit ihrer Erfindung im 19. Jahrhundert ist der Glühlampe nur ein begrenztes Leben beschieden; selbst der Ersatz herkömmlicher Glühdrähte durch Gasgemische vermochte bislang nicht, Glühlampen zu "ewiger" Lebensdauer zu verhelfen. Die herkömmliche Lampe hat natürlich den einleuchtenden Nachteil, dass ihr Glühdraht nach einer Weile durchbrennt. Dieser Prozess ist auch durch Hinzufügen von Halogenverbindungen nur sehr eingeschränkt aufzuhalten. Diese können zwar am Glaskolben kondensiertes Wolfram vom Glühfaden wiedergewinnen, doch es bleibt dabei: Irgendwann brennt jeder Glühdraht durch. Einen entscheidenden Vorteil haben sogenannte Entladungslampen. Anstelle eines Glühdrahtes werden hier Gasatome durch Einkopplung elektrischer Energie über zwei Elektroden zum Leuchten angeregt. Dies erhöht die Lebensdauer dieser Lampe entscheidend: Während normale Glühlampen bereits nach etwa 1 000 Stunden den Geist aufgeben, schätzt man die Lebenserwartung einer Entladungslampe auf sage und schreibe 16 000 Stunden. Doch warum brennen selbst diese nicht ewig? Hauptgrund, so Markus in seinem Artikel, ist die Tatsache, dass das aus polykristallinem Aluminiumoxid bestehende Entladungsgefäß, in welchem mit der Gasentladung der eigentliche Lichterzeugungsprozess abläuft, mit der Zeit immer dünner wird. Das liegt daran, dass das Wandmaterial Aluminiumoxid von der heißeren zur kälteren Stelle der Gefäßwand wandert. Dies wiederholt sich so lange, bis die Wand schließlich so dünn ist, dass die Lampe versagt. Markus schlug daher vor, die Salzmischung innerhalb der Glühlampe durch einen Zusatz so zu verändern, dass sich Aluminiumoxid darin nicht mehr löst. Ebenfalls könnten durch Veränderung der Form des Lampenbrenners die Temperaturunterschiede an der Wandung reduziert werden, so dass der Transporteffekt des Aluminiumoxids deutlich verlangsamt würde. Dies, so Markus, wäre ein weiterer Meilenstein auf dem Weg zu einer effizienteren, langlebigeren und umweltschonenderen Lampe.

Die Spallationsneutronenquelle als Billardspiel

Kay Nünighoff setzte sich in seinem Artikel mit der Frage auseinander, inwieweit sich die Produktionsergebnisse von Spallationsneutronenquellen mit Hilfe mathematischer Simulationsprogramme vorhersagen lassen. Zur Veranschaulichung seiner Frage bediente sich Nünighoff einiger Beispiele aus dem Billardspiel, das vom Prinzip her gewisse Parallelen mit der Neutronengewinnung in Spallationsneutronenquellen aufweist.

Vereinfacht ausgedrückt werden Protonen, also positiv geladene Teilchen, in einem Beschleuniger auf hohe Geschwindigkeit gebracht und so auf ein Ziel aus Schwermetall - das sogenannte Target - geschossen. Durch das Auftreffen eines Protons auf einen Atomkern des Targets werden Protonen und Neutronen aus dem Kern herausgestoßen - ebenso wie beim Billardspiel die Beschleunigung der Spielkugel durch das Queue zum Aufeinandertreffen mit anderen Kugeln führt, die ihrerseits durch den Aufprall über den Tisch verteilt werden. So getroffene Kugeln können wiederum andere Kugeln treffen und in Bewegung setzen. In der Praxis einer Spallationsneutronenquelle wird dies als "intranukleare Kaskade" bezeichnet: Ein beschleunigtes Proton trifft auf einen Atomkern des Targets, stößt dabei Protonen und Neutronen aus diesem heraus, die wiederum auf andere Atomkerne treffen können und dabei eine erneute intranukleare Kaskade auslösen können. Nun ist die Frage, ob sich von vornherein mit Genauigkeit bestimmen lässt, wo ein beschleunigtes Proton auf das Target auftreffen wird und wie die dadurch erzeugte intranukleare Kaskade ablaufen wird. Diese Frage ist für die Zukunft der Spallationsneutronenquellen von zentraler Bedeutung, da die korrekte Beschreibung der Neutronenproduktion im Target zur Grundvoraussetzung für die weitere Optimierung derartiger Anlagen wird. Kay Nünighoff zeigte in seinem Artikel, dass Spallationsneutronenquellen mit Hilfe vorhandener Computersimulationsprogramme in der Tat berechnet werden können. Die hier durchgeführten Spielsimulation wiesen im Vergleich zu den tatsächlich im Experiment erreichten Ergebnissen eine Fehlerquote von weniger als zehn Prozent auf.

Die Natur stand Pate

Die Vergabe des Chemie-Nobelpreises 2001 dürfte Stephan Laue vom Institut für Biotechnologie 2 besonders interessiert haben: Die Nobelpreisträger hatten neue chemische Katalysatoren entwickelt, mit denen sie erstmals ein reines Produkt erhielten, welches bislang nur als Mischung erzeugt werden konnte. Mit nur einer kleinen Menge des neuen Reaktionsbeschleunigers können nun große Mengen reiner Produkte erzeugt werden, die zum Beispiel als Arznei-Wirkstoffe eingesetzt werden. Doch es gibt ein Problem: Die Katalysatoren sind sehr empfindlich und können nach ihrem Einsatz nicht ohne Aktivitätsverlust aus dem Produkt wiedergewonnen werden. Hier setzen die Forschungen von Stephan Laue an: Der Biotechnologe nahm die lebende Zelle genauer unter die Lupe, denn in ihr arbeiten biologische Reaktionsbeschleuniger - Enzyme - mit hoher Geschwindigkeit und ohne vorzeitige "Ermüdungserscheinungen". Doch was macht die Natur besser? Enzyme, so Laue, können wegen ihrer Größe die Wand biologischer Zellen nicht durchdringen - im Gegensatz zu den viel kleineren Produkten bzw. deren Ausgangsstoffen. Durch die Rückhaltung des Enzyms in der Zelle steht es für viele Produktionszyklen zur Verfügung und arbeitet somit effektiver. Dieses Prinzip setzten die Biotechnologen technisch beim Enzym-Membran-Reaktor um: Eine künstliche Membran hält die Enzyme im Reaktor zurück. Stephan Laue zeigte in seiner Promotionsarbeit, dass

sich mit dieser Technik die Effektivität auch von chemischen Katalysatoren erhöhen lässt. Allerdings ist dazu ein Trick nötig, denn die chemischen Katalysatoren sind kleiner als ihre biologischen Pendants und werden daher nicht von der künstlichen Membran im Reaktor zurückgehalten. Wird jedoch ein Polymer - eine Kette zusammenhängender Moleküle - an den Katalysator angehängt, gewinnt dieser genügend an Größe hinzu. Stephan Laue konnte nun im chemischen Membran-Reaktor die Ausnutzung eines polymergebundenen Katalysators um den Faktor 50 steigern - und damit die produktbezogenen Katalysatorkosten entsprechend senken.

Asymmetrische Transferhydrierung im chemischen Membranreaktor:

Von den Enzymen lernen heißt siegen lernen!

Stephan Laue

Ob die Mitglieder der Königlich-Schwedischen Akademie der Wissenschaften lieber Multivitaminsaft trinken oder reinen Orangensaft ist nicht bekannt. Das sie den Unterschied zwischen einer Säftmischung und einem "Rein-Saft" aber sehr wohl zu schätzen wissen, darauf könnte ihre Entscheidung für die Vergabe des diesjährigen Chemie-Nobelpreises hindeuten. Dieser wurde drei Wissenschaftlern verliehen, welche sich mit der Herstellung eines reinen Produktes beschäftigen, in denen der klassische Chemiker bis dato immer nur Mischungen erzeugte. Diese Mischungen bestehen aus jeweils zwei Molekülen, welche weitgehend identische chemische Eigenschaften haben, sich jedoch zueinander wie Bild und Spiegelbild verhalten. Moleküle, die in einem solchen Zusammenhang stehen, bezeichnet man als Enantiomeren-Paar bzw. Enantiomere.

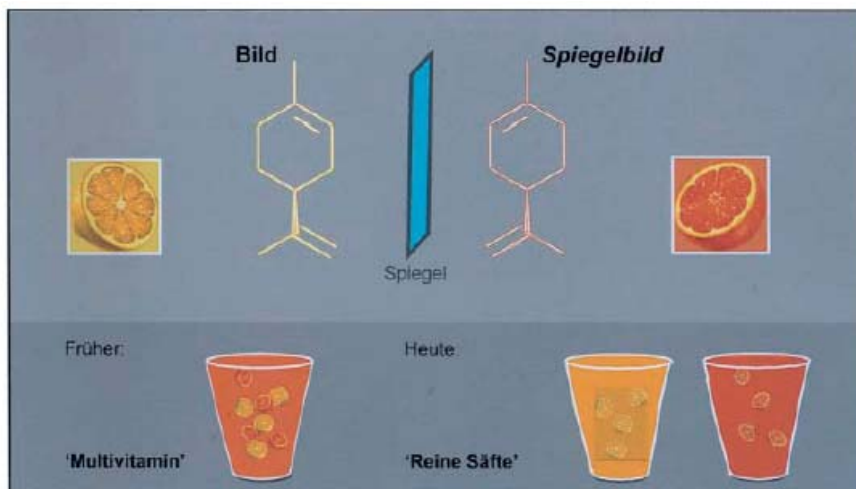


Abbildung 1: Die beiden Enantiomere des Aromastoffes "Limonen" schmecken verschieden

Zur Unterscheidung der beiden Moleküle eines solchen Paares hat man eine spezielle Nomenklatur entwickelt, welche sich an der uns geläufigen Unterscheidung unserer spiegelbildlichen Hände in eine "linke" und eine "rechte" Hand orientiert. Für den Chemiker kommt der Unterscheidung von Enantiomeren erhebliche Bedeutung zu, da unser Körper

ebenfalls genau zwischen den zwei enantiomeren Formen eines Moleküls unterscheiden kann. So schmeckt beispielsweise das eine Enantiomer des Aromastoffes Limonen nach Zitrone, das spiegelbildliche Enantiomer jedoch nach Orange (Abbildung 1).

Wie im Fall des Limonen-Moleküls können enantiomere Arzneimittel-Wirkstoffe ebenfalls unterschiedliche Wirkung auf den menschlichen Körper entfalten. Ein illustratives Beispiel stellt der Wirkstoff Propanolol dar. Hier wirkt das eine Enantiomer blutdrucksenkend, das spiegelbildliche Enantiomer dagegen empfangnisverhütend. Zurückführen lässt sich die unterschiedliche Wirkung von Enantiomeren darauf, dass in der Natur zumeist eine der beiden Formen dominiert. Entsprechend sind in allen Lebewesen viele Rezeptoren auf ein Enantiomer spezialisiert. Diese Spezialisierung entspricht der Bevorzugung eines rechtshändigen Bowling-Spielers gegenüber einer "Rechtshänder-Bowlingkugel", da die spiegelbildliche "Linkshänder-Bowling-Kugel" mit der rechten Hand nur schwer zu halten ist (Abbildung 2).



Abbildung 2: Der rechtshändige Bowling-Spieler bevorzugt "Rechtshänder-Kugeln"

Aus diesem Grund wird ein Rechts-Händer bevorzugt Rechtshänder-Bowlingkugeln beschleunigen – womit sich auf die Eigenschaft von speziellen chemischen Reaktionsbeschleunigern überleiten lässt.

Denn die diesjährigen Chemie-Nobelpreisträger haben Reaktionsbeschleuniger entwickelt, welche gleichsam unserem Rechtshändigen Bowling-Spieler eines von zwei spiegelbildlichen Enantiomeren (entsprechend der "Rechtshänder-Bowling-Kugeln") bevorzugen, bzw. mit Blick auf eine chemische Reaktion bevorzugt bilden. Aufgrund dieser Bevorzugung entsteht ein Enantiomer im Überschuss, sodass das Nobelpreis-Komitee – wäre das Produkt dieser Reaktion der Aromastoff Limonen – nicht ausschließlich mit Multivitaminsaft vorlieb nehmen müsste, sondern sich an reinem Orangen- und Zitronensaft erfreuen könnte.

Derartige Reaktionsbeschleuniger bezeichnet man als Katalysatoren und den Einsatz dieser speziellen Katalysatoren als asymmetrische oder enantioselektive Katalyse. Das besondere an diesen Katalysatoren ist nun, dass mit Hilfe eines einzigen Reaktionsbeschleunigers millionenfach das gewünschte Enantiomer produziert werden kann, genauso wie der einzelne Bowlingspieler in Abhängigkeit von seiner Lebens- / bzw. Spieldauer Millionen von "Rechtshänder-Bowling-Kugeln" auf die Bahn bringen wird. Auf diese Weise lassen sich durch den Einsatz einer kleinen Menge Katalysator große Mengen an enantiomerenreinen Produkten erzeugen.

Die Herstellung solcher Katalysatoren ist jedoch aufwendig und teuer, sodass der industrielle Einsatz für die Herstellung von Pharma- und Agro-Wirkstoffen bislang auf wenige Beispiele beschränkt ist. Der Hauptnachteil besteht darin, dass die Katalysatoren sehr empfindlich sind und nach der Produktion einer bestimmten Menge Enantiomer nicht ohne Aktivitätsverlust aus dem Produkt wieder gewonnen werden können. Aus diesem Grund werden verstärkt Anstrengungen unternommen, die Rezyklierbarkeit von chemischen Katalysatoren zu erhöhen.

Jedoch: Was der Mensch gerade erst lernt, dass kann die Natur schon lange. Denn in jeder lebenden Zelle leisten biologische Reaktionsbeschleuniger die Synthese von enantiomerenreinen Produkten mit hoher Geschwindigkeit und Präzision. Diese, für den Erhalt der lebenden Zelle unverzichtbaren, biologischen Katalysatoren bezeichnet man als Enzyme. Hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit sind diese Enzyme ihren chemischen Pendanten zumeist haushoch überlegen – man könnte sogar sagen: "sie bowlen in einer anderen Liga". Fairerweise muss man allerdings hinzufügen, dass die außergewöhnlich katalytische Leistungsfähigkeit der Enzyme ein Ergebnis einer Million Jahre dauernden Evolution ist, im Vergleich zu den wenigen Jahrzehnten der Entwicklung von chemischen Katalysatoren.

Die Funktionsweise einer Zelle beim Einsatz von Enzymen entspricht hierbei einem kleinen Bioreaktor. Das Beispiel der Joghurtherstellung durch Milchsäurebakterien verdeutlicht einen solchen Prozess, wobei der in Milch enthaltene Zucker zu Milchsäure umgesetzt wird (Abbildung 3, links). Der Milchzucker gelangt dabei durch die Zellmembran in die Zelle, wo er anschließend durch Enzyme zum rechtsdrehenden Enantiomer der Milchsäure umgewandelt wird.

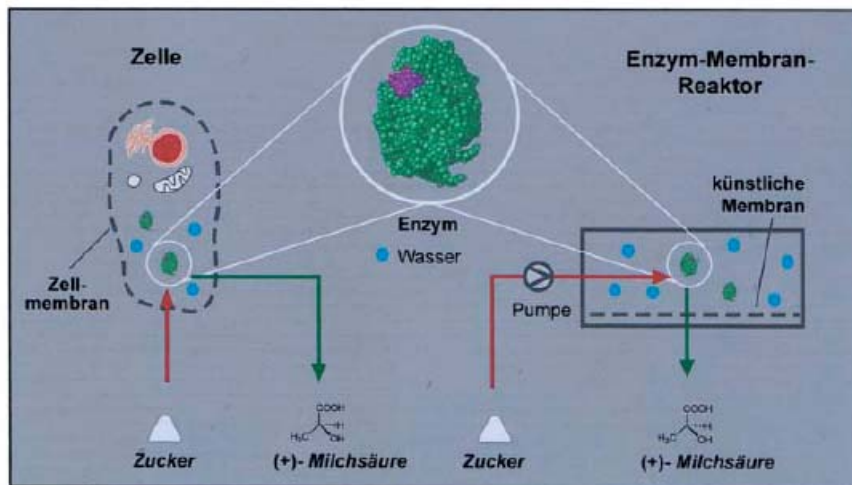


Abbildung 3: Rückhaltung von Enzymen durch eine Membran

Die Bezeichnung "rechtsdrehend" dient in diesem Zusammenhang zur Unterscheidung der Milchsäure-Enantiomere und geht auf eine charakteristische Wechselwirkung mit polarisiertem Licht zurück.

Bei diesen Umsetzungen macht sich die Zelle zu nutze, dass die Enzyme im Zellinneren gehalten werden, die übrigen Reaktionsteilnehmer die Zellmembrane jedoch frei passieren können. Die Ursache hierfür ist der erhebliche Größenunterschied vom Enzym und den Ausgangsstoffen (auch als Edukte bezeichnet) sowie den Produkten. Dieses Verhältnis entspricht etwa dem Verhältnis eines Jumbo-Jets zu einem Passagier. Vereinfacht dargestellt lässt sich die Zellwand als eine Art Sieb auffassen, deren Löcher ausreichend groß für die Edukte und Produkte sind, jedoch zu klein für die Enzyme. Aufgrund dieser selektiven Rückhaltung des Enzyms kann es für viele Produktionszyklen eingesetzt werden, da kontinuierlich neues Edukt (Zucker) in die Zelle und gebildetes Produkt (rechtsdrehende Milchsäure) aus der Zelle heraus geschleust wird. Im Bereich der Biotechnologie hat man dieses Prinzip aufgegriffen und in Form des Enzym-Membran-Reaktors verwirklicht (Abbildung 3, rechts). Dabei setzt man biotechnologisch gewonnene Enzyme unter Rückhaltung durch künstliche Membran für chemische Umsetzungen ein. Ein wesentlicher Vorteil des Enzym-Membran-Reaktors gegenüber der mikrobiellen Zelle besteht darin, dass mit Hilfe einer Pumpe größere Mengen von Edukten und Produkten durch den Reaktionsraum gepumpt werden können. Auf diese Weise lässt sich die Produktivität der Enzyme, im Vergleich zum Einsatz in der mikrobiellen Zelle, erheblich steigern.

Ein entscheidender Nachteil beim industriellen Einsatz von Enzymen besteht jedoch darin, dass Enzyme hauptsächlich in wässrigen Medien eingesetzt werden können. Hintergrund

hierfür ist, dass die Natur keine Veranlassung für eine Evolution im organischen Lösungsmittel hatte, da diese nur selten in der Natur vorkommen. Viele chemische Substanzen sind jedoch nicht in Wasser löslich – ein Phänomen, welches einem von der Herstellung einer Salatsauce in Form der Unmischbarkeit von Essig und Öl bekannt ist. Aus diesem Grund versucht man unter Verwendung verschiedener Tricks, Enzyme auch in organischen Medien einzusetzen. Hierbei treten jedoch große Schwierigkeiten hinsichtlich der Stabilität der Enzyme auf, sodass bis dato nur wenige Anwendungen realisiert werden konnten.

Alternativ zu diesem Ansatz kann man sich aber auch fragen, was wir von den Enzymen lernen können, um unsere chemischen Katalysatoren hinsichtlich ihrer Effektivität und Einsatzmöglichkeiten zu verbessern. Denn grundsätzlich haben chemische Katalysatoren gegenüber den biologischen Pendanten den Vorteil, dass sie in organischen Lösungsmitteln (z. B. Alkohole, Ether oder Benzin) sehr gut löslich sind. Es liegt daher nahe, das Prinzip der Katalysatorrückhaltung durch eine Membran – vergleichbar der biologischen Zelle – auf die wertvollen chemischen Katalysatoren zu übertragen. Auf diese Weise wird eine Rezyklierung des Katalysators erreicht sowie seine Ausnutzung deutlich erhöht. Als wesentliche Hürde stellt sich jedoch heraus, dass der Größenunterschied der chemischen Katalysatoren im Vergleich zu den Edukten und Produkten zu gering ist, als dass die künstliche Membran eine selektive Rückhaltung des Katalysators erlauben würde. Dieses Größenverhältnis entspricht etwa einem Klein-Wagen (Modell: Smart) zu seinem Fahrer (Abbildung 4).

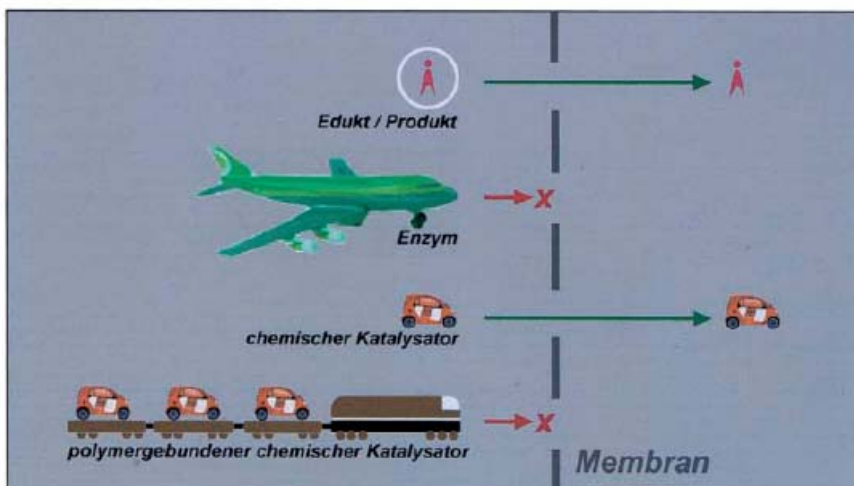


Abbildung 4: Größenverhältnisse der verschiedenen Katalysatoren

Für dieses Problem zeigt die Natur jedoch ebenfalls eine Lösung auf: Durch Anbindung des chemischen Katalysators an ein so genanntes Polymer, welches aus einer Kette

zusammenhängender Moleküle besteht, lässt sich die Größe der chemischen Katalysatoren erheblich erhöhen. Hintergrund ist, dass Enzyme ebenfalls aus langen Ketten von Aminosäuren aufgebaut sind und so ihre charakteristische Struktur bzw. Größe erlangen. Das Resultat dieser Anbindung des Katalysators entspricht einem, mit Kleinwagen beladenen, Güterzug in Abbildung 4.

Dieser polymergebundene Katalysator kann schließlich in organischen Lösungsmitteln in einem chemischen Membran-Reaktor eingesetzt werden (Abbildung 5).

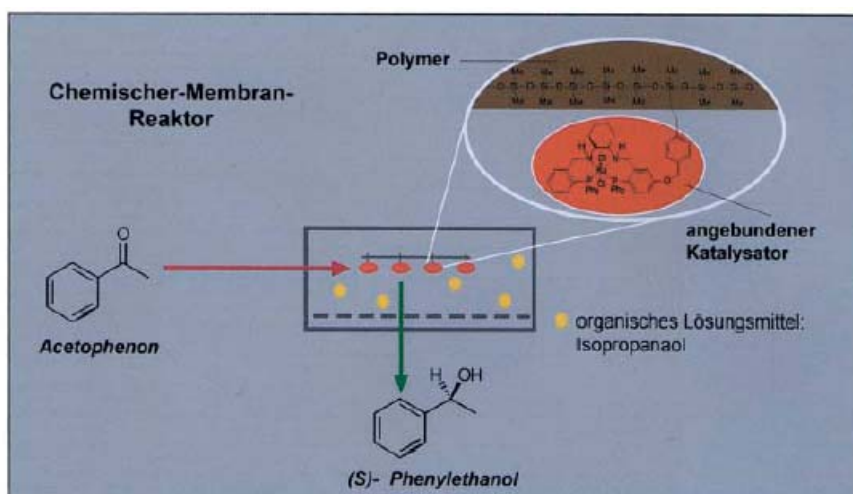


Abbildung 5: Asymmetrische Transferhydrierung im chemischen Membranreaktor

Durch die reaktionsbeschleunigende Wirkung wird hierbei das Edukt Acetophenon durch eine Übertragung von Wasserstoff zum Produkt Phenylethanol umgesetzt. Diese Umsetzung gilt als Modellreaktion für die Herstellung enantiomerenreiner Alkohole, welche als Ausgangsstoffe für Psychopharmaka (z. B. Prozac) oder Antibiotika (z. B. Levofloxacin) dienen.

Auf chemischem Wege wird die Übertragung von Wasserstoff klassisch in Form der *Hydrierung* unter Verwendung von gasförmigem Wasserstoff durchgeführt, welcher in Verbindung mit Sauerstoff hochexplosiv und aus dem Schulunterricht (Knallgasexplosion) bekannt ist. Im Gegensatz zu dieser Verfahrensweise wird in dem hier verwendeten Verfahren der *Transferhydrierung* jedoch Isopropanol als kostengünstige und ungefährliche Wasserstoffquelle verwendet. Ferner dient das Isopropanol aufgrund seiner guten Lösungseigenschaften als hervorragendes Lösungsmittel, sodass man in optimaler Weise die Funktion eines Reaktionspartners (Wasserstoffquelle) und des Lösungsmittels vereint.

Unter Verwendung des polymerangebundenen Katalysators im Lösungsmittel Isopropanol konnte im chemischen Membranreaktor eine Steigerung der Katalysatorausnutzung um den Faktor 50 im Vergleich zum ungebundenen Katalysator erreicht werden (Abbildung 6).

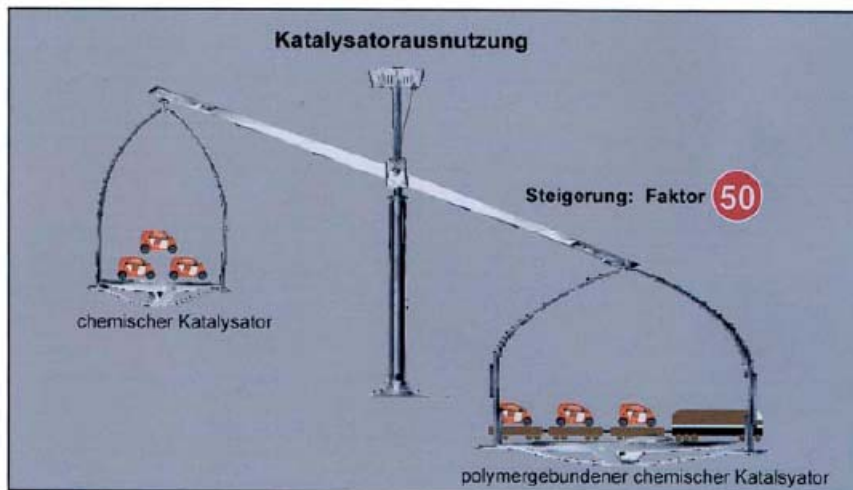


Abbildung 6: Steigerung der Katalysatorausnutzung durch Polymeranbindung

Als Konsequenz verringern sich die, auf das Produkt bezogenen, Katalysatorkosten ebenfalls um den Faktor 50. Das Verfahren ermöglicht somit, die neuen asymmetrischen Katalysatoren – von denen sich das Nobelpreis-Komitee "Moleküle und Materialien mit neuen Eigenschaften" erhofft – ökonomisch einzusetzen. Ein weiterer Schritt zur industriellen Anwendung dieser Katalysatoren ist daher vollzogen.

Die drahtlose Glühlampe - warum brennen moderne Leuchtmittel nicht ewig?

Torsten Markus

Ausgehend von der Patentierung der Glühlampe von J. W. Starr 1845 entwickelte Joseph Swan eine Glühlampe, deren Glühfaden aus einem kohlebeschichteten Papier bestand, das nur sehr kurzlebig war. Brauchbarer war dagegen schon die von Heinrich Goebel 1854 entwickelte Glühbirne, deren Glühfaden aus einer verkohlten Bambusfaser bestand und in einer luftleeren Glasglocke eingeschlossen war. Durch die Erfindung der Quecksilbervakuumpumpe 1865 beschäftigte sich J. Swan erneut mit der Konstruktion einer Glühlampe und stellte diese 1878 vor, deren Brenndauer war jedoch nur sehr kurz. Der eigentliche Durchbruch gelang erst 1879 Thomas Edison, dessen Vakuumlampe eine Brenndauer von 13,5 Stunden hatte. Edison verwendete einen Nähgarnfaden, der durch Erhitzen in Kohlenstoff umgewandelt wurde.

Bei der Glühlampe handelt es sich um eine Lichtquelle, deren Licht durch das Glühen eines Glühfadens in einem Vakuum (anfänglich Kohlefäden, dann Osmium, Tantal, Wolfram) durch elektrische Energie erzeugt wird. Das Vakuum in dem Glaskörper wird zur Verringerung des Verdampfens des Glühfadens, teilweise durch Edelgasfüllungen wie Argon oder Krypton ersetzt. Abbildung 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau der ersten seriell gefertigten Glühlampen. Dieser Aufbau hat sich bis heute nicht verändert. Sie besitzen aufgrund ihres kontinuierlichen Spektrums eine perfekte Farbwiedergabe.

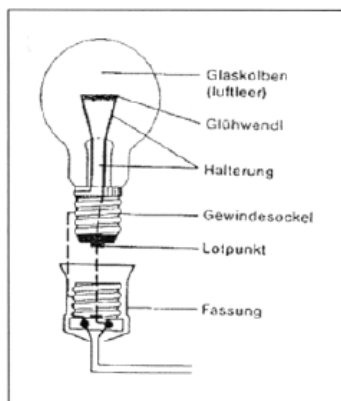


Abbildung 1: schematischer Aufbau einer Glühlampe

Der Hauptversagensgrund herkömmlicher Glühlampen, und das ist durch praktische Erfahrung jedem bekannt, ist das Durchbrennen des Wolframdrahtes. Während der Lebensdauer einer Glühbirne lässt sich eine immer weiter fortschreitende Schwärzung des Glaskolbens erkennen. Diese Schwärzung ist auf einen Transport des Wolframs, das von der Oberfläche des Glühfadens verdampft, zur Kolbenwand, an der es sich niederschlägt, zu erklären. Dieser Transport schreitet so lange fort, bis der Draht so dünn geworden ist, dass er reißt. Mit der Erfindung des Halogenkreisprozesses wurde eine wesentliche Verbesserung und eine Steigerung der Lebensdauer erreicht. Mit Hilfe von Halogenverbindungen, dies sind meistens Iod- oder Bromhaltige Verbindungen, die man der Gasfüllung des Kolbens zugibt, wird es möglich, den bei der konventionellen Glühlampe ablaufenden Transport des Wolframs auch von der Brennergefäßwand zur Glühwendel hin ablaufen zu lassen, so dass ein Kreisprozess entsteht.

Anschaulich hat man sich das folgendermaßen vorzustellen: Nachdem sich das von der Glühwendel verdampfte Wolfram auf der Kolbenwand niedergeschlagen hat, wird es von einem Halogenmolekül "eingefangen" und wieder zurück zur Glühwendel gebracht, wo es wieder "freigelassen" wird. Das Halogen kehrt quasi frei zur Kolbenwand zurück und holt das nächste Wolframteilchen ab. Dieser Prozess läuft so immer wieder ab. Durch diesen Mechanismus wird eine deutlich höhere Lebensdauer gegenüber den normalen Glühbirnen erreicht.

Während bei Glühbirnen eine Wendel durch elektrischen Strom direkt zum Glühen und damit zur Lichtemission gebracht wird, wird bei den sogenannten Entladungslampen die elektrische Energie üblicherweise über zwei Elektroden in ein Gas eingekoppelt, wodurch die Gasatome zum Leuchten angeregt werden. Entladungslampen stellen somit eine "drahtlose Glühbirne" dar. Durch Zusätze verschiedener Salze, wie beispielsweise das dem handelsüblichen Kochsalz verwandte Natriumiodid kann die Lampe so beeinflusst werden, dass sie ein Spektrum erhält, das dem des natürlichen Sonnenlichts sehr nahe kommt. Diese Lampen heißen aufgrund der ihnen eigenen Füllstoffe Metallhalogenid-Entladungslampen. Solche Lampen lassen sich überall dort einsetzen, wo es auf Lichterzeugung mit der Wiedergabe eines möglichst natürlichen Farbspektrums ankommt, wie beispielsweise bei Schaufensterbeleuchtungen, Bühnenbeleuchtungen oder Dia- und Filmprojektoren. Die Leuchtstärken dieser Lampen sind für den Heimbereich jedoch (noch) zu groß. Das Leuchtgas befindet sich in einem durchsichtigen, temperaturbeständigen Kolben. Dieser Kolben wurde bis vor kurzem typischerweise aus Quarzglas gefertigt. Die neueste Entwicklung auf diesem Gebiet sind jedoch Lampenbrenner aus der Keramik Aluminiumoxid, die man so fertigen kann, dass sie durchscheinend erscheint. Dieses Material ist sehr viel stabiler und kann höhere Temperaturen als Quarzglas aushalten. Eine höhere Lichtausbeute der Lampe ist die Folge. Abbildung 2 zeigt ein Foto einer solchen Metallhalogenid-Entladungslampe mit einem Lampenbrenner aus Keramik. Normale Glühlampen wandeln, wie Abbildung 3 zu entnehmen ist, etwa 80% ihrer Leistung in sichtbare Strahlung um. Bei Halogenlampen sind dies immerhin schon 10%.

Die drahtlose Glühlampe - warum brennen moderne Leuchtmittel nicht ewig?

Demgegenüber wandeln Hochdruckentladungslampen wie hier betrachtet etwa 24% ihrer elektrischen Leistung in sichtbare Strahlung um.

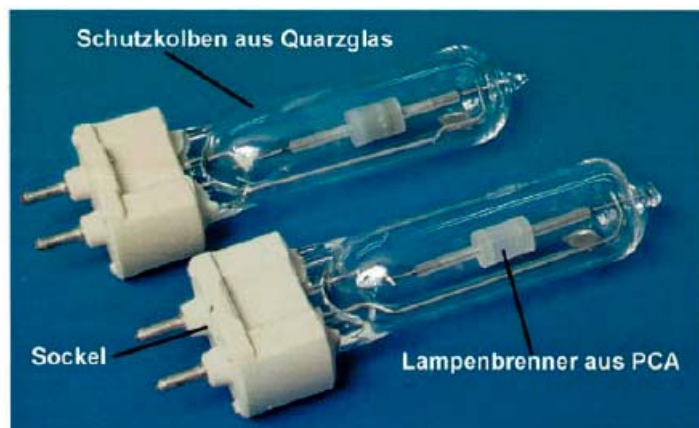


Abbildung 2: 35W PCA Lampe, unten: fabrikneue Lampe, oben: Lampe nach 9000 Betriebsstunden mit deutlichen Verschleißspuren am Brenner

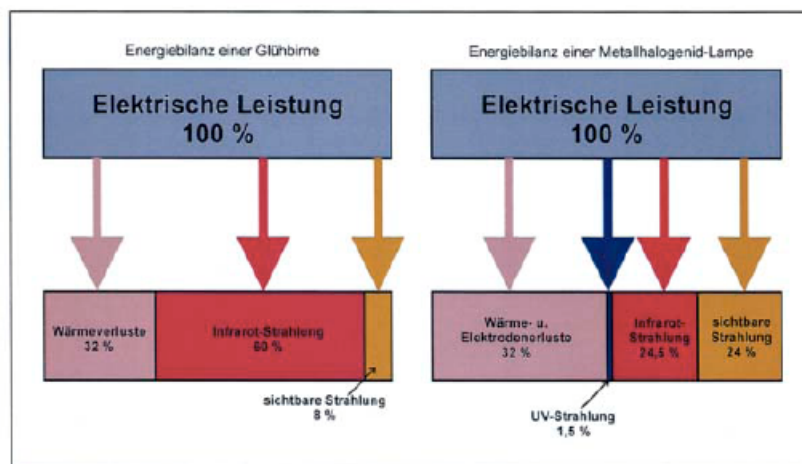


Abbildung 3: Energiebilanzen von Glühlampe und Metallhalogenid-Entladungslampe

Die Lebenserwartung einer konventionellen Glühlampe liegt bei etwa 1000 Stunden Brenndauer, bei Halogenlampen bei 2000 Stunden und bei Metallhalogenid-Entladungslampen wird sie mit 16000 Stunden angegeben. So könnte man diesen Lampentyp als "Hochenergie-Sparlampe" betiteln. Der schematische Aufbau eines solchen Lampenbrenners aus durchscheinender Keramik, sogenanntes "polykristallines Aluminiumoxid",

(Poly Crystalline Alumina, kurz PCA), ist in Abbildung 4 dargestellt. Zwischen den beiden Elektroden, die wie der Glühfaden einer Glühbirne aus Wolfram gefertigt sind, läuft eine Gasentladung ab, wie sie vom Grundprinzip her auch in den bekannten Leuchtstoffröhren abläuft; in unserem Fall ist die Temperatur jedoch deutlich höher. Um den angenehmen Lichtton der Lampe einzustellen, werden Salzmischungen zugefügt. Diese Salze bestehen aus Metallen wie Natrium und Halogenen wie Iod. Daher erhält dieser Lampentyp auch seinen Namen. Die Salze werden nun in der Lampe teilweise verdampft. Die Atome und Moleküle, aus denen sich der Dampf zusammensetzt, werden im Lichtbogen der Gasentladung zum Leuchten angeregt.

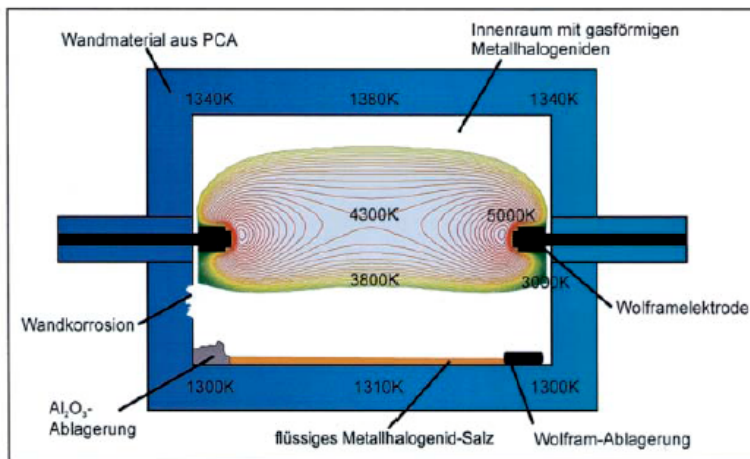


Abbildung 4: Schema eines 35W-Brenners einer Metallhalogenid-Entladungslampe

Da die Metallhalogenid-Entladungslampen keinen Glühfaden mehr besitzen, kann dieser auch nicht durchbrennen. Bleibt die Frage: warum brennen diese Lampen nicht ewig und versagen dennoch nach durchschnittlich 16000 Stunden?

Hierfür gibt es mehrere Gründe. Zum einen besitzen auch Metallhalogenid-Entladungslampen Elektroden, durch welche die Energie in das Leuchtgas eingekoppelt wird. Diese Elektroden bestehen ebenfalls aus Wolfram und sind sehr hohen Temperaturen ausgesetzt. Es kommt auch hier zur Wandschwärzung und zu einem Elektrodenabbrand. Aber auch in Metallhalogenid-Entladungslampen läuft der Halogen-Kreisprozess ab, der in der Lage ist, Wolfram wieder zurück zu der Elektrode zu bringen. Jedoch liegt der Hauptversagensgrund von Metallhalogenid-Entladungslampen nicht an einem Ausfall der Elektroden. Es ist vielmehr zu beobachten, dass mit zunehmender Betriebsdauer der innere Brenner, in dem die Gasentladung und damit der lichtzeugende Prozess abläuft immer dünner wird. Abbildung 5 zeigt eine stark vergrößerte

Die drahtlose Glühlampe - warum brennen moderne Leuchtmittel nicht ewig?

mikroskopische Aufnahme eines aufgeschnittenen Lampenbrenners mit dem Wandmaterial Aluminiumoxid. Als gestrichelte Linie ist die Kontur eines fabrikneuen Brenners dargestellt.

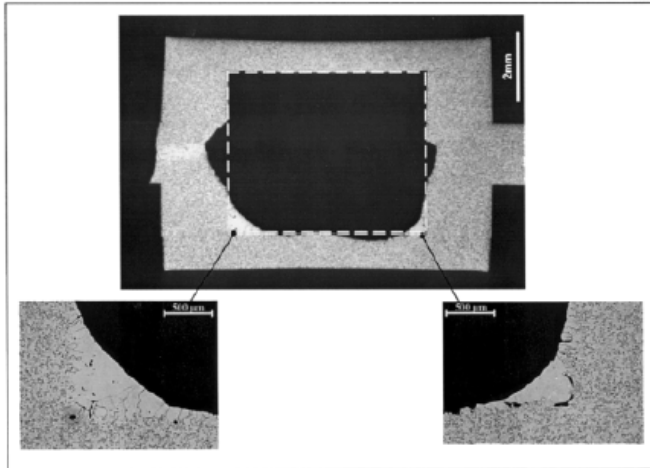


Abbildung 5: Querschnitt eines handelsüblichen 35W PCA-Lampenbrenners

Der Vergleich verdeutlicht die katastrophale Entwicklung. Der Brenner wird im unteren Teil immer dünner. Weiterhin kann man beobachten, dass sich die Lampe in der linken- und rechten unteren Ecke abgerundet hat, was die Detailvergrößerungen belegen. Dies ist damit zu erklären, dass sich der Teil des Wandmaterials, der in der Mitte des Brenners fehlt, in den Ecken wieder niederschlägt. Aber wie kommt es dahin? Man könnte nun vermuten, dies sei ein Verdampfungs- und Kondensationsvorgang, ähnlich wie er in der heimischen Küche abläuft, wenn man Wasser in einem Topf erhitzt bis es kocht und ihn dann vergisst. Kommt man nach einiger Zeit wieder, ist ein großer Teil des Wassers schon verdampft, während die Fliesen und die Schränke über dem Herd nass sind. Das Wasser ist also durch das Erhitzen verdampft und ist an einer kälteren Stelle wieder kondensiert. Diesen Effekt könnte man nun auf die Lampe übertragen. Jedoch wurden mit unseren massenspektroskopischen Verfahren Messungen durchgeführt, die beweisen, dass die Temperatur in der Lampe (welche an der heißesten Stelle ca. 1100°C) beträgt, nicht ausreicht, um das Wandmaterial dazu zu bewegen, in den dampfförmigen Zustand zu wechseln. Aber wie kommt das Material nun von A nach B? Dies geschieht unter Anwesenheit eines sogenannten Transportmittels. Anschaulich lässt sich dieses Phänomen mit der Überquerung eines Flusses erklären. Angenommen, es gebe keine Brücken und der Fluss ist voller Krokodile. So bedeuten Schiff und Flugzeug die einzigen Verbindungen. Man kann nur durch das Transportmittel Schiff oder das Transportmittel Flugzeug von einem Ufer zum anderen gelangen.

Das Wandmaterial Aluminiumoxid reagiert mit den Salzen und benutzt diese als Transportmittel, um von der heißeren Stelle der Gefäßwand zur kälteren transportiert zu werden. An der kälteren Stelle findet eine Rückreaktion statt. Das Aluminiumoxid schlägt sich an der Wand des Betriebs der Lampe so lange ab, bis die Wand schließlich an einer Stelle so dünn wird, dass die Lampe versagt. Der Prozess läuft auch nur in einer Richtung ab, so dass das Wandmaterial von der heißeren Stelle immer mehr abgetragen wird. In meiner Dissertation habe ich herausgefunden, dass ein großer Teil des Materialtransportes über die flüssige Phase der Salzschnmelze verläuft und nicht nur über die gasförmige Phase. Um in unserem Vergleich zu bleiben: Es benutzen deutlich mehr Leute das Schiff, um den Fluss zu überqueren als das Flugzeug. Abbildung 6 zeigt die Gegenüberstellung unserer Modellvorstellung zu den in der Lampe beobachteten Transportvorgängen.

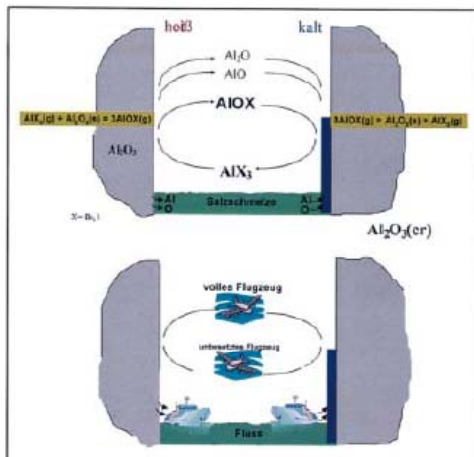


Abbildung 6: Modellvorstellung der Transportvorgänge in der Lampe und Veranschaulichung an einem alltäglichen Beispiel

Die Struktur der Salzschmelze in der Lampe erlaubt den Einbau von Aluminiumoxidmolekülen in das Netzwerk der Schmelze. Die Schmelze strebt eine Sättigung mit diesen Ionen an. Diese Sättigung ist bei der hohen Temperatur, bei der sich das Aluminiumoxid in der Salzschmelze löst, größer, als bei der geringen Temperatur, wie sie an der Stelle herrscht, an der das Aluminiumoxid aus der Schmelze wieder abgeschieden wird und sich an der Brennergefäßwand anlagert, wo es schließlich zu den in Abbildung 5 beobachteten Abrundungen an den Ecken des ursprünglich rechteckigen Querschnitts führt.

Untersuchungen und Modellrechnungen haben gezeigt, dass die Sättigung der Salzschmelze abhängig ist von deren Zusammensetzung. Es wurde festgestellt, dass die Löslichkeit einer Salzschmelze, bestehend aus Natriumiodid und Dysprosiumiodid, wie sie typischerweise in solchen Entladungslampen eingesetzt wird, eine maximale Löslichkeit

für Aluminium bei einem Verhältnis von etwa 4:1 von Natriumiodid zu Dysprosiumiodid aufweist. In der Arbeit wurden auch die am Gasphasentransport beteiligten gasförmigen Metallhalogenidverbindungen bestimmt und ihre thermochemischen Eigenschaften wie zum Beispiel Partialdrücke und Bildungsenthalpien ermittelt.

Bleibt nun die Frage, wie sich die beobachteten und beschriebenen Transporteffekte, die für den Lampenbetrieb unerwünscht sind, vermeiden lassen. Die Zusammensetzung der Salzschnmelze ist bestimmt durch lichttechnische Überlegungen. Daher lässt sich die Zusammensetzung nicht ohne weiteres verändern.

Ein möglicher Ansatzpunkt wäre, die Salzmischungen durch den Zusatz eines Additivs so zu beeinflussen, dass das Netzwerk der Schmelze dahingehend verändert wird, dass sich das Aluminiumoxid nicht mehr in ihr löst. Ein anderer Ansatzpunkt wäre der, die Form des Lampenbrenners zu verändern. Könnte man aus der verwendeten Keramik Aluminiumoxid einen ovalen (glühbirnenförmigen) Leuchtkörper bauen, so wären die Temperaturunterschiede entlang der Wandung geringer. Daher würden auch die Unterschiede in der Sättigung der Schmelze mit Aluminium geringer und somit würde der Transporteffekt zwar immer noch ablaufen, jedoch mit geringer Geschwindigkeit. Dies wäre ein weiterer Meilenstein auf dem Weg zu einer höchsteffizienten, extrem langlebigen und umweltschonenden Lampe.

Billardspiel und siedende Atome im Schwermetall

Kay Nünighoff

1 Materialien unter die Oberfläche geschaut

Damit Forscher Fragen zum atomaren bzw. molekularen Aufbau unterschiedlicher Materialien beantworten können, müssen sie in das Innere ihrer Proben hineinschauen. So wie sich ein Arzt mit Hilfe eines Röntgenbildes das Innere seiner Patienten ansehen kann, ermöglichen Neutronen den Wissenschaftlern Einblicke in das Innere ihrer Materialproben. *"Woher bekommen die Forscher die Neutronen, mit denen sie das Innere erkunden können?"*

Die zur Zeit verbreitetste Bezugsquelle für Neutronen sind Forschungsreaktoren. Jedoch sind diese speziell auf Neutronenproduktion optimierten Kernreaktoren mit all den Nachteilen und Risiken behaftet, wie sie auch bei Reaktoren zur Erzeugung von Kernenergie anzutreffen sind: z. B. das Auftreten einer unkontrollierten Kettenreaktion (Kritikalitätssicherheit), die Produktion langlebiger Spaltprodukte, oder das Proliferationsabkommen, welches den Einsatz hochangereicherter Urans zu einem politischen Balanceakt werden lässt. Ein völlig anderer Weg der Neutronenproduktion wird mit sogenannten Spallationsneutronenquellen beschriftet, zu denen auch die geplante Europäische Spallationsneutronenquelle ESS zählt. Diese Anlagen kommen ohne die typischen Probleme eines Kernreaktors aus und können die Leistungsgrenzen derzeitiger Kernreaktoren durchbrechen. Nebenbei bieten Spallationsquellen die Möglichkeit gepulste Neutronenstrahlen zu erzeugen, welche neuartige Untersuchungsmethoden erlauben.

"Wie entstehen in einer Spallationsquelle Neutronen?" Diese Frage und mit welcher Genauigkeit die Entstehung von Neutronen und deren Transport in Materie von Computern simuliert werden kann, soll im Folgenden beantwortet werden. Zunächst soll der physikalische Prozess der Spallation veranschaulicht werden.

2 Billardspiel mit Atomkernen

Herzstück einer Spallationsquelle ist das sogenannte Target (Ziel), welches aus einem Schwermetall, wie Blei, Wolfram oder Quecksilber, hergestellt ist. Schaut man mit einer riesigen Lupe in ein solches Target hinein, findet man viele kleine Kugelhaufen, die Atomkerne, welche aus Protonen und Neutronen zusammengesetzt sind. Würde man ein zylinderförmiges Target in der Mitte durchschneiden, sähe die Schnittfläche wie ein Billardtisch aus, auf dem viele gleichgroße Ansammlungen von Kugeln aufgebaut sind, wie in Abbildung 1 dargestellt.

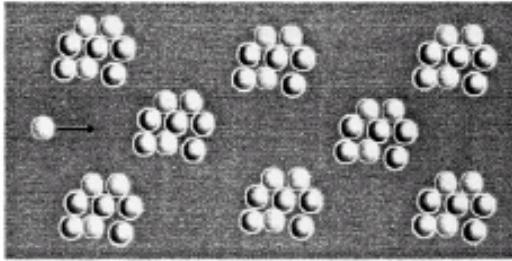


Abbildung 1: Die Schnittfläche durch ein zylinderförmiges Schwermetalltarget kann man sich als Billardtisch mit vielen Kugelansammlungen vorstellen. Von links wird eine blaue Kugel eingeschossen.

Jeder der schon mal Billard gespielt hat kann sich vorstellen, was passiert, wenn man die einzelne blaue Kugel mit viel Schwung, d.h. mit einer hohen kinetischen Energie in diese Anordnung stößt. Genau dieses wird im Prinzip bei einer Spallationsquelle gemacht. Allerdings heißt der Queue hier Beschleuniger und die Spielkugel ist ein Proton welches vom Beschleuniger auf kinetische Energien bis zu 2,5 GeV (GeV=Giga-Elektronen-Volt) – dies sind Geschwindigkeiten bis zu 1 Milliarde km/h, oder 92% der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und in das Target geschossen wird. Was passiert nun auf dem Billardtisch? Die Spielkugel wird eine Anordnung treffen und aufgrund ihres Impulses Kugeln aus dieser Anordnung stoßen. Die hinausgestoßenen Kugeln können wiederum benachbarte Kugelanordnungen treffen und erneut Kugeln herauslösen. Hätte der Erbauer des Billardtisches die Bande vergessen, würde ein Teil der Kugeln hinunterfallen – sie würden unser Target verlassen. Das Gleiche findet in einem Spallationstarget statt. Trifft ein schnelles geladenes Proton einen Atomkern des Schwermetalltargets, werden Protonen und Neutronen aus dem Kern gestoßen. Dieser Vorgang wird als Intra-Nukleare-Kaskade bezeichnet, da innerhalb eines einzigen Kernes zahlreiche Stöße stattfinden. Die den Kern verlassenden Protonen und Neutronen können wiederum Atomkerne treffen und dort erneut eine sogenannte Intra-Nukleare-Kaskade auslösen. Diesen Effekt bezeichnen die Physiker als Inter-Nukleare-Kaskade, da hier Stöße zwischen Atomkernen betrachtet werden. Manche der Neutronen fliegen ungehindert bis zur Oberfläche und verlassen das Target. Oder anders gesprochen: Sie fallen vom Spieltisch.

3 Es siedet im Atom

Nachdem ein Atomkern getroffen worden ist, wird dieser durch den hohen Impulsübertrag – oder einfach gesprochen: durch die Wucht des Aufpralls – auf Temperaturen bis zu 50 Milliarden°C erhitzt. *"Was passiert mit einem so heißen Kern?"* Die Antwort auf diese Frage lässt sich in der eigenen Küche finden. Stellt man einen Topf mit Wasser auf eine

Herdplatte, beginnt das Wasser irgendwann zu siedeten. Man sieht, wie Wassermoleküle, in Form von Wasserdampf, die Oberfläche verlassen. Durch das Verdampfen, versucht das Wasser im Topf seine Temperatur zu senken. Auch der heiße Atomkern beginnt zu "dampfen", indem er Teilchen aussendet, wie es in Abbildung 2 illustriert ist. Neben Neutronen, γ -Teilchen und Protonen, kann ein Atomkern auch schwere Teilchen, wie Deuteronen, Tritonen oder andere Isotope leichter Kerne abgeben. Der Kernphysiker spricht von der Verdampfungsphase (engl. Evaporation) des Kerns, der sich hierbei abkühlt.

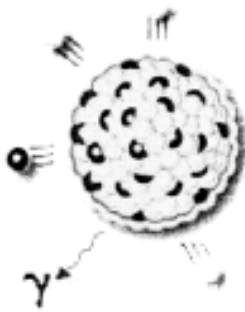


Abbildung 2: Ein "siedender" Atomkern "dampft" Teilchen ab (engl.: evaporation) um sich abzukühlen.

Eine Spallationsreaktion setzt sich somit aus zwei Phasen zusammen: der Intra-Nuklearen-Kaskade und der sich anschließenden Verdampfungsphase. Die meisten Teilchen werden während der Verdampfungsphase emittiert. Bleibt die Frage, wie viele Neutronen man mit einem einzigen eingeschlossenen Proton in einem solchen Schwermetalltarget erzeugen kann. Antworten hierauf können Computersimulationen und Experimente geben.

4. NESSI hilft Neutronen zählen

Klar, dass ein Seeungeheuer keine Neutronen zählen kann, aber dennoch hilft NESSI Neutronen zu zählen. NESSI steht für "**N**eutron **S**zintillator and **S**ilicon Detector" und ist ein Experiment zum Nachweis von Neutronen und geladenen Teilchen, welche bei einer Spallationsreaktion entstehen.

Zwei kugelförmige Detektoren umgeben wie Zwiebelschalen das Target. Der innere **B**erlin **S**ilicon **B**all (BSiB) dient dem Nachweis geladener Teilchen, wurde jedoch bei diesen Messungen nicht verwendet. Mit dem äußeren **B**erlin **N**eutron **B**all (BNB) wurden die Neutronen nachgewiesen. Abbildung 3 zeigt den Aufbau des NESSI-Experimentes am

Jülicher Teilchenbeschleuniger COSY (**CO**oler **SY**nchrotron). NESSI umgibt mit seiner äußeren Kugelschale des BNB-Detektors das Schwermetalltarget. Diese Kugelschale ist mit einer speziellen Flüssigkeit (Trimethylbenzol) gefüllt, welche Lichtblitze erzeugt, wenn Teilchen durch sie hindurch fliegen. Neutronen allerdings erzeugen keine Lichtblitze und lassen sich daher mit ihr nicht nachweisen. Erst durch einen Trick wird es möglich mit dem BNB Neutronen zu zählen: In der Flüssigkeit sind 0,5 Gew-% Gadoliniumsalz gelöst worden. Gadolinium ist ein Element, welches besonders gut langsame Neutronen einfangen kann. In einem ersten Schritt werden die schnellen Neutronen aus dem Target moderiert, d.h. abgebremst. Fängt ein Gadoliniumkern eines dieser langsamen Neutronen ein, werden sogenannte γ -Teilchen ausgesendet, welche in der Flüssigkeit Lichtblitze hervorrufen. Diese Lichtblitze werden von Messgeräten (Photomultiplier) erfasst und in elektrische Signale umgewandelt.

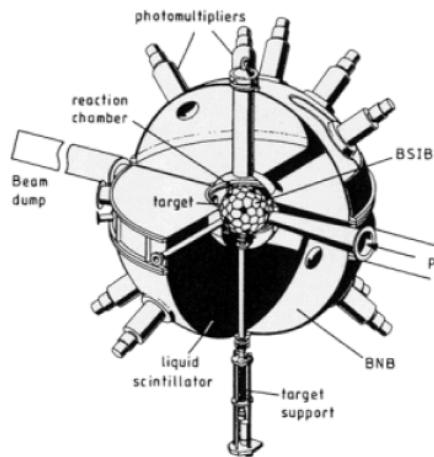


Abbildung 3: NESSI, ein Detektorsystem zum Nachweis von Neutronen und geladenen Teilchen aus Spallationsreaktoren

Auf diese Weise ist es möglich Neutronen, welche die Targetoberfläche verlassen, zu zählen. Untersucht wurden Targetlängen bis zu 35 cm und Durchmesser von 8, 12 und 15 cm bei unterschiedlichen Einschussenergien der Protonen von 0,4 GeV bis zu 2,5 GeV. Mit Hilfe der mit NESSI gewonnenen Daten lässt sich die Vorhersagekraft von Computermodellen zur nuklearen Auslegung von Spallationsneutronenquellen beurteilen.

5 Monte-Carlo Simulationen: Glücksspiele im Computer

Dringen Teilchen in Materie ein und soll deren Verhalten simuliert werden, so wird auf Monte-Carlo Simulationen zurückgegriffen. Der Name erinnert an das berühmte Spielkasino und weist auf die stochastischen Methoden in diesen Programmen hin. Jede einzelne Spallationsreaktion läuft, abhängig von ihren Anfangsbedingungen, unterschiedlich ab. Um realistische Aussagen treffen zu können, muss daher eine große Zahl von einzelnen Ereignissen betrachtet werden. Der unterschiedliche Ablauf einer simulierten Reaktion wird durch Zufallszahlen gesteuert, so dass in den Programmen einer Vielzahl von "Glücksspielen" über das Schicksal einzelner Teilchen entscheidet. Die hier vorliegenden Computersimulationen wurden mit dem HERMES (High Energy Radiation Monte Carlo Elaborate System) Programmsystem durchgeführt.

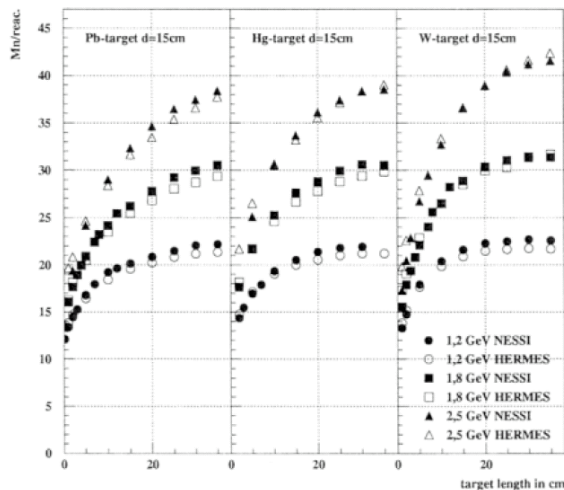


Abbildung 4: Mittlere Neutronenmultiplizität für verschiedene Targetlänge, Targetmaterialien und Protoneneinschussenergien

Mit NESSI wird die sogenannte Neutronenmultiplizität bestimmt. Hierunter versteht man die Anzahl der Neutronen, welche die Targetoberfläche pro Proton verlassen. In Abbildung 4 sind für verschiedene Targetmaterialien (Blei, Quecksilber und Wolfram) und Targetlängen die Mittelwerte der erzeugten Neutronen (mittlere Neutronenmultiplizität) pro Reaktion dargestellt. Eingezeichnet sind sowohl die Ergebnisse von NESSI (schwarze Symbole), als auch die zuvor im Computer simulierten Werte (weiße Symbole). Man erkennt deutlich, wie mit zunehmender Targetlänge die Neutronenproduktion ansteigt. Bei kleinen Einschussenergien (z. B. 1,2 GeV) und schweren Targetmaterialien (z. B. Wolfram mit einer Dichte von $19,3 \text{ g/cm}^3$) ist ab 20 cm Targetlänge kein weiterer Anstieg der Neutronenproduktion zu beobachten.

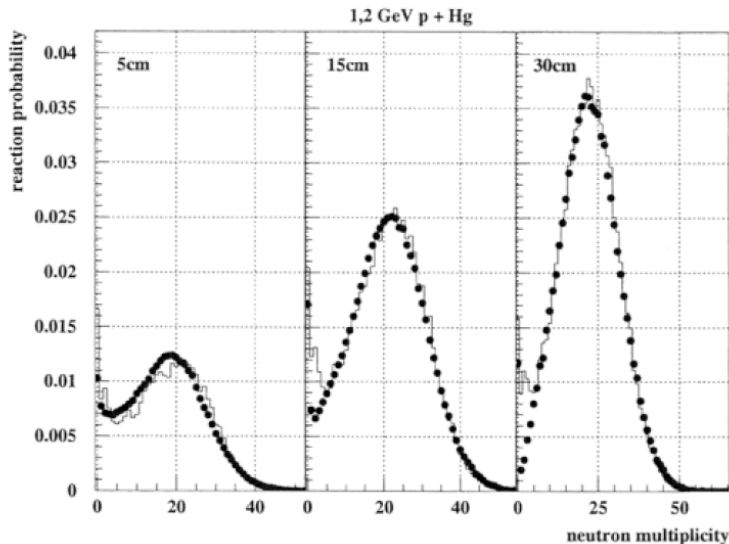


Abbildung 5: Mit NESSI gemessene Neutronenmultiplizitätsverteilungen (Punkte) für drei verschiedene Targetlängen eines Hg-Targets mit 15 cm Durchmesser. Die Linie gibt die mit Hilfe einer Computersimulation berechneten Werte an.

Um die Simulationen mit den Messungen vergleichen zu können, mussten in den Simulationen verschiedene Detektoreigenschaften berücksichtigt werden. Eine dieser Eigenschaften ist z. B. die Nachweiswahrscheinlichkeit. Sie gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Neutron vom Detektor erkannt wird. Je schneller ein Neutron ist, desto schwerer wird es für die Gadoliniumkerne sie einzufangen. D.h., die Nachweiswahrscheinlichkeit nimmt mit zunehmender Geschwindigkeit des Neutrons ab.

Aber NESSI kann deutlich mehr als nur die mittlere Neutronenmultiplizität messen!

NESSI ist als weltweit einziges Experiment in der Lage, für jedes einzelne Proton, welches das Target trifft, die freigesetzten Neutronen zu zählen. Trägt man für alle Protonen die jeweilige Neutronenmultiplizität in ein Diagramm ein, so erhält man eine Häufigkeitsverteilung, welche Neutronenmultiplizitätsverteilung genannt wird. Abbildung 5 zeigt, mit welchen Häufigkeiten NESSI bestimmte Neutronenmultiplizitäten gezählt hat. Zusätzlich sind in den Bildern die Vorhersagen aus Computersimulationen mit eingezeichnet. Dieses Bild zeigt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment, deren Abweichung kleiner als 5% ist. Im Gegensatz zu den mittleren Neutronenmultiplizitäten stellen die Neutronenmultiplizitätsverteilungen eine wesentlich härtere Anforderung an die Genauigkeit der Computerprogramme. Die Simulationen müssen nicht nur Mittelwerte korrekt wiedergeben, sondern auch seltene Ereignisse, wie z. B. extrem kleine oder große Neutronenmultiplizitäten, in der Häufigkeit ihres Auftretens richtig beschreiben.

6 Bedeutung für die Technik

Im Rahmen dieser Arbeit wurde durch experimentelle Untersuchungen nachgewiesen, dass mit dem HERMES Programmsystem Spallationsneutronenquellen berechnet werden können. Die Neutronenproduktion und der Neutronentransport in Materie kann in einem sehr großen Energiebereich –von $1/10$ e V bis zu mehreren Milliarden e V mit einem Fehler von weniger als 10% beschrieben werden. Die korrekte Beschreibung der Neutronenproduktion im Target ist zur Auslegung und Optimierung weiterer Komponenten einer Spallationsquelle eine Grundvoraussetzung. Ferner ist die Neutronenproduktion im Target Ausgangsgröße für Strahlenschutzrechnungen, wie z. B. zur Berechnung der Abschirmung der Anlage.

Die Spallationsneutronenquelle ESS könnte in Zukunft zu einer sicheren Bezugsquelle der Forscher für Neutronen werden, ohne die Nachteile eines Kernreaktors in Kauf nehmen zu müssen. Dabei bietet sie den Vorteil, dass sie keinen Kernbrennstoff enthält, und somit keine Auslegungsrechnungen zur Kritikalitätssicherheit erfordert. Transporte von abgebrannten Brennelementen und die entsprechende Endlagerung entfallen. Ein weiterer Vorteil ist, dass in einer Spallationsneutronenquelle keine Kettenreaktion stattfindet, so dass eine solche Anlage jederzeit sofort abgeschaltet werden kann. Eben wie ein Billardspieler, welcher mitten im Spiel aufhört und nach Hause geht.

2003

**Von Kommissar "Gen-Chip",
Benzin-Zusätzen im Boden und
"Baum-Greisen" auf der Spur des
Klimawandels**

Von Kommissar "Gen-Chip", Benzin-Zusätzen im Boden und "Baum-Greisen" auf der Spur des Klimawandels

Kommissar "Gen-Chip" jagt Störenfriede in Bakterien

Einem Täter in biotechnologischen Prozessen ist Tino Polen auf die Spur gekommen. In seiner Dissertation am Institut für Biotechnologie (IBT 1) nahm er die Gene der Bakterienzelle *Escherichia coli* (*E. coli*) unter die Lupe, das "Lieblings-Bakterium" der Biotechnologen. Gentechnisch veränderte *E. coli* sind beispielsweise in der Lage, große Mengen von Insulin für Diabetiker zu produzieren. Doch es gibt einen Täter, der die effiziente Produktion von Pharmaproteinen hemmt – er lauert in den eigenen Genen der Bakterienzellen. Während *E. coli* Traubenzucker "verspeist", um zu wachsen, wird gleichzeitig in seinem Stoffwechsel Essigsäure gebildet, die wiederum das Wachstum der Bakterien hemmt. Bestimmte Gene sorgen nämlich dafür, dass ein Teil des Zuckers in die unerwünschte Säure umgewandelt wird. Doch welche der 4000 verschiedenen Gene sind die "Störenfriede"? Tino Polen hat "Kommissar Gen-Chip" auf diesen Fall angesetzt. Gen-Chips sind kleine Glasplättchen, auf denen alle Gene einer Bakterienzelle angeordnet sind und somit alle auf einmal analysiert werden können. Anhand eines spezifischen Fluoreszenzmusters auf dem Gen-Chip konnte der Biotechnologe die Gene ermitteln, deren Genprodukte die unerwünschte Essigsäureproduktion auslösen. Tino Polen fand neun Gene, welche wenig aktiv waren, so dass die Essigsäure im Stoffwechsel zu langsam abgebaut wurde und sich anhäufte. Diese Gene müssen die Wissenschaftler nun beeinflussen, um den Säureabbau zu steigern. Die Gen-Chips führten Tino Polen auf eine weitere Spur: Er fand heraus, dass die so genannten Flagellen-Gene, die für die Steuerung und Fortbewegung der Bakterienzelle verantwortlich sind, durch Essigsäure in ihrer Aktivität gesteigert werden. *E. coli* kann so schneller vor der Säure fliehen. Wie ein U-Boot von einer Antriebsschraube wird das Bakterium bei seiner Flucht von den Flagellen – fadenförmigen Anhängen – angetrieben. Dieses Verhalten konnte Tino Polen tatsächlich beobachten, als er *E. coli* zum Schwimmen schickte. Auf Schwimmscheiben mit Essigsäure schwammen die Bakterien doppelt so schnell wie normal.

Neuer Benzin-Zusatzstoff: Teufel mit dem Belzebub ausgetrieben?

Den neuen Benzin-Zusatzstoff Methyl tert-butyl ether (MTBE) nahm Volker Linnemann in seiner Dissertation am Institut Agrosphäre (ICG IV) unter die Lupe. Der Chemiker und Agrarwissenschaftler verfolgte, wie sich das Antiklopfmittel in Grundwasser und Böden verhält. Das günstig herzustellende MTBE ersetzt die bleihaltigen Benzinzusätze. Es verhindert, dass das Kraftstoff-Luftgemisch im Motor

unkontrolliert und vorzeitig verbrennt und dadurch zum so genannten "Klopfen" führt. Das giftige Blei ist damit zwar aus dem Benzin verschwunden, doch der Ersatzstoff MTBE belastet die Umwelt stärker als erwartet: Seit einiger Zeit wird die Chemikalie – die im Verdacht steht, Krebs zu erregen – im Grund-, Regen- und Oberflächenwasser gefunden. Zudem wird der Verbrauch weiter ansteigen, denn ab 2005 soll auch der Benzolanteil im Treibstoff gesenkt und teilweise durch MTBE ersetzt werden. Bisher untersuchten Wissenschaftler fast ausschließlich, wie das Antiklopfmittel aus leckgeschlagenen Tanks oder Pipelines in das Grundwasser gelangt. Volker Linnemann beleuchtete das Problem jedoch andersherum: Gibt es einen umgekehrten Transport aus dem Grundwasser heraus in die Luft? Werden Menschen an der Oberfläche belastet und wie wird MTBE von Bodenbakterien abgebaut? An natürlichen Bodensäulen, die aus einer unbelasteten Ackerfläche ausgestochen wurden, konnte der Umweltforscher im Labor eine Leckage nachahmen. Er fand heraus, dass die flüchtige Chemikalie nur sehr unregelmäßig und in kleinen Mengen aus dem Boden ausgast und dies zudem von der Bodenstruktur abhängig ist. Dieses Ergebnis galt es nun in "freier Wildbahn" zu überprüfen. Mit einem gläsernen Windkanal konnte der Wissenschaftler eine Atmosphäre über einem Lysimeter nachstellen – einem Zylinder mit ausgestochenem Erdblock darin. Über einen künstlichen Grundwasserstrom unter dem "Miniacker" wurde MTBE eingeleitet. Mittels einer Standleitung zu einer Wetterstation konnte Volker Linnemann Windgeschwindigkeit, Temperatur und Regenmengen von einem 15 Kilometer entfernten Feld abfragen und im Windkanal "nachfahren". Auch der Freilandversuch zeigte, dass MTBE nicht ständig aus dem Boden transportiert wird und die gefundenen Mengen in der Luft nicht krebserregend sind. Mit seiner Nase kann der Mensch diese Konzentrationen jedoch bereits wahrnehmen, stellte Volker Linnemann fest. Das empfindlichste Mess- und Warngerät trägt somit jeder mit sich.

"Baum-Greise" erzählen vom Klima vor 1200 Jahren

"Sturm und Flut in halb Europa", "Pole verlieren ihre Eiskappen". Befindet sich der Mensch in der Phase eines nie da gewesenen, globalen Klimawandels oder bewegt sich die aktuelle Entwicklung noch im Rahmen natürlicher Klimaschwankungen? Mit diesen Fragen beschäftigte sich Kerstin Treydte vom Institut Sedimentäre Systeme (ICG V) während ihrer Dissertation. Auf der Suche nach Antworten halfen ihr "Baum-Greise" aus Nordpakistan – Wacholderbäume, die über die klimatische Vergangenheit des asiatischen Hochgebirges bis in das Jahr 828 n. Chr. zurück erzählen. Die Dendroklimatologin (dendros [griech.]: Baum) nutzte diese Klimaarchive, um etwas über die natürlichen Temperatur- und Niederschlagsschwankungen aus einer Zeit zu erfahren, als der Mensch noch keinen Einfluss auf das Klima hatte. Kerstin Treydte nahm die Jahrringe der alten Bäume unter die Lupe und untersucht Kohlenstoff- und Sauerstoffisotope in der Zellulose, der stabilsten Verbindung im Holz. Die Isotope – unterschiedlich schwere Varianten eines Elements – werden von der Pflanze in

verschiedenen Anteilen, abhängig von Temperatur und Feuchtigkeit aufgenommen. An ihrem Vorkommen kann die Umweltforscherin ablesen, wann in vergangenen Zeiten trockene und warme oder feuchte und kühle Witterung herrschte. Kerstin Treydte fand unter anderem heraus, dass das 19. Jahrhundert in Nordpakistan das kälteste in den letzten 1200 Jahren war. Danach stiegen die Temperaturen schnell an. Sie sind heute aber nicht höher als vor 1000 Jahren. Historische Aufzeichnungen zeigen, dass es in Europa ähnlich war. In einer ausgeprägten Warmphase um 1000 n. Chr. besiedelten die Wikinger Grönland – das "grüne Land". Im Süden Englands wurde Wein angebaut. Die "Baum-Greise" Pakistans erzählen jedoch mehr als nur eine Geschichte über das vergangene Klima in dieser Region. Der Großraum Hochasien spielt als Heizfläche im Sommer und Kältepol im Winter eine wichtige Rolle im globalen Klimasystem. Die "Erzählungen" der alten Wacholder-Bäume sind somit für die weltweite Klimaentwicklung von Bedeutung.

Mit Kommissar *Gen-Chip* den Tätern auf der Spur

Tino Polen

Kennen Sie die oft mühevollen Ermittlungsarbeit von Kriminalkommissaren oder Detektiven? Spuren am Tatort sichern und Proben analysieren, Zeugen befragen, Tatverdächtige vernehmen, Alibis überprüfen und Personen überwachen. Wer war zur fraglichen Zeit am Tatort? Wer ist der Täter? Häufig werden so in akribischer Kleinarbeit viele Indizien wie Puzzleteile aufwendig zu einem Gesamtbild zusammengefügt, um den oder die Täter zu ermitteln.

So ähnlich geht es auch Forschern, die die komplizierten dynamischen Prozesse in biologischen Systemen verstehen wollen. In einer lebenden Zelle passieren sehr viele Dinge gleichzeitig. So werden Signale mit der Umgebung ausgetauscht, Stoffe hin und her transportiert, aber auch ab- und aufgebaut und dabei in Zellbausteine und Energie umgewandelt. Um all diese komplexen biologischen Netzwerke zu entschlüsseln, untersucht die Systembiologie mit modernen Methoden das dynamische Verhalten und die Wechselwirkungen aller Zellelemente, ohne sich auf einzelne Reaktionen zu beschränken. Die Herausforderung ist, aus der Kenntnis aller molekularen Bestandteile eines biologischen Systems ein Verständnis des Ganzen zu entwickeln.

Die wichtigsten Elemente lebender Zellen sind die Träger zellulärer Funktionen - die Proteine. Inzwischen sind die Genome mit ihren Genen und damit die genetischen Baupläne einer Reihe von Organismen bekannt. Auch der Weg der Informationsübertragung vom Gen zum Protein ist bekannt. Wenn ein Gen in der Zelle aktiv ist, wird davon zunächst eine Kopie angefertigt, die sogenannte mRNA. Diese Kopie des Gens wird dann von den Proteinfabriken zur Herstellung des Proteins verwendet.

Der Weg dieser biologischen Informationsübertragung vom Gen zum Protein ist als allgemeines Prinzip in allen lebenden Zellen verwirklicht. Diese Erkenntnis ermöglicht die biotechnologische Produktion von Pharmaproteinen für verschiedenste Anwendungen. Darauf basierend kann z. B. das menschliche Gen für Insulin, das den Blutzuckerspiegel kontrolliert, mit Hilfe gentechnischer Methoden in eine Bakterienzelle wie *Escherichia coli* eingeschleust werden. Dieses gentechnisch veränderte Bakterium ist nun in der Lage, das humane Insulin für Diabetiker in großer Menge zu produzieren.

Aus süß wird sauer

Aus wirtschaftlicher und ökologischer Sicht sollten solche biotechnologischen Prozesse möglichst effizient sein, d.h. das Bakterium muss die angebotenen

Nährstoffe in hoher Ausbeute in die gewünschten Produkte umsetzen. Das ist aber gerade unter industriellen Produktionsbedingungen oft nicht der Fall. Obwohl Traubenzucker der Lieblingszucker von *E. coli* ist, wird dieser Nährstoff trotz ausreichender Sauerstoffversorgung bei einem Überangebot nicht optimal verwertet. In verschwenderischer Weise wird dann ein Teil des Zuckers in Essigsäure umgewandelt, die dann auch noch das Wachstum von *E. coli* hemmt. Diese unerwünschte Essigsäurebildung beruht letztendlich auf einem veränderten Stoffwechsel in dem Bakterium. Da die einzelnen Reaktionen im Stoffwechsel einer Zelle von Enzymen katalysiert werden, war nun die Frage, welche Enzyme an der unerwünschten Essigsäurebildung beteiligt sind, also gewissermaßen wer sind die Täter? Da *E. coli* mehr als 4000 verschiedene Gene und genausoviele Proteine bzw. Enzyme besitzt, gleicht das der Suche nach der Stecknadel im Heuhaufen. Wie kann man aus dieser Vielzahl von Proteinen die für die Essigsäurebildung verantwortlichen herausfinden? Für solche umfassenden Analysen benötigt man natürlich die richtigen Werkzeuge. Glücklicherweise gibt es dafür heute den Gen-Chip, gewissermaßen einen Kommissar im Dienste der Forscher.

Viel DNA auf wenig Chip

So wie Computer-Chips aus Trägerplättchen mit vielen winzigen Schaltkreisen bestehen, sind bei Gen-Chips alle Gene einer Bakterienzelle als einzelsträngige DNS-Fragmente regelmäßig auf kleinen Glasplättchen angeordnet. Ohne sich auf einzelne Gene beschränken zu müssen, können damit alle Genaktivitäten der Bakterienzelle analysiert werden.

Für diese Chip-Analysen werden die mRNS-Moleküle aus den Zellen von zwei zu vergleichenden Bakterienkulturen isoliert. Im Reagenzglas werden diese mRNS-Moleküle in einzelsträngige DNS-Fragmente umgeschrieben und dabei jeweils mit verschiedenen Fluoreszenzfarbstoffen markiert. Aufgrund der Eigenschaft von DNS Doppelstränge zu bilden, binden die markierten DNS-Fragmente auf dem Gen-Chip an der Stelle, wo das zugehörige Gen vorhanden ist. Danach können die auf dem Gen-Chip vorhandenen Fluoreszenzen mit Hilfe spezieller Lesegeräte quantitativ erfasst und für jedes Gen in einem Bild dargestellt werden. Durch die verschiedenen Fluoreszenzfarbstoffe entstehen dabei farbig leuchtende Muster, die für die jeweiligen Genaktivitäten im Genom des Bakteriums charakteristisch sind (Abbildung 1).

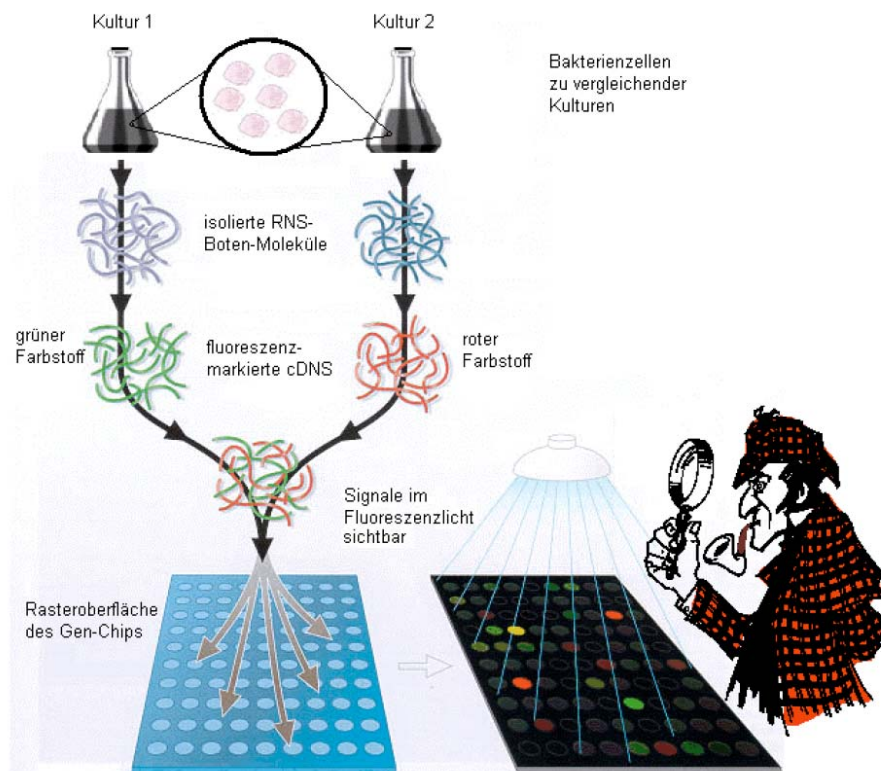


Abbildung 1. Prinzip der Analyse mit Gen-Chips. Der Gen-Chip erleichtert durch die gleichzeitige Analyse aller Gene einer Bakterienzelle die Detektivarbeit erheblich.

Das Fluoreszenzmuster des Gen-Chips zeigt, welche Gene in den beiden verglichenen Bakterienkulturen die gleichen Aktivitäten und welche unterschiedliche Aktivitäten haben. Diese Muster liefern dann die entscheidenden Hinweise, welche Enzyme an der Essigsäurebildung beteiligt sind. In der Arbeit wurde diese wichtige Analyse-Technik im FZ Jülich etabliert und zur Aufklärung der aeroben Essigsäurebildung von *E. coli* am Institut für Biotechnologie erstmalig angewendet.

Ein Engpass führt zur Ausscheidung von Essigsäure

Zur Aufklärung der Stoffwechselveränderungen, die zur Ausscheidung der Essigsäure führen, wurden mit den Gen-Chips die Aktivitäten aller Gene von *E. coli*-Zellen, die in Abhängigkeit von der angebotenen Zuckermenge keine Essigsäure

bzw. viel Essigsäure bilden, miteinander verglichen. Anhand des Fluoreszenzmusters auf dem Gen-Chip konnten dann die Gene ermittelt werden, deren Genprodukte an der unerwünschten Nebenproduktbildung beteiligt sind. Wie aus stoffwechselphysiologischen Untersuchungen bekannt ist, wird der Zucker in dem Bakterium *E. coli* über den Zentralstoffwechsel zu verschiedenen organischen Säuren abgebaut, die dann im Zitronensäure-Zyklus zur Energieerzeugung und zur Synthese von Zellbausteinen umgesetzt werden. Mit Hilfe der Gen-Chip-Analyse konnte nun nachgewiesen werden, dass in *E. coli* Zellen, die bei einer hohen Zuckerkonzentration im Nährmedium viel Essigsäure bilden, neun Gene für Enzyme des Zitronensäure-Zyklus nur noch eine geringe Aktivität haben. Dies hat zur Folge, dass der Zitronensäure-Zyklus nur noch mit geringer Aktivität die gebildete Essigsäure umsetzen kann. Zwangsläufig führt der so entstandene Engpass dann zur Anhäufung und Ausscheidung dieser organischen Säure, da der Zucker im Zentralstoffwechsel mit unvermindert hoher Aktivität abgebaut wird (Abbildung 2).

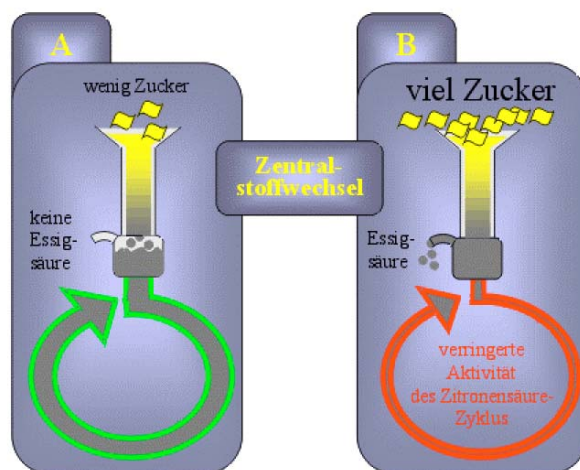


Abbildung 2. Geringe Mengen an Traubenzucker werden nicht verschwendet (A), ein Überangebot führt dagegen zu einer verringerten Aktivität des Zitronensäure-Zyklus und damit zur Ausscheidung von Essigsäure (B).

Die Ergebnisse der Gen-Chip-Analyse bilden nun die Grundlage für neue Ansätze zur Verringerung bzw. Vermeidung der Essigsäurebildung, um biotechnologische Prozesse zu verbessern.

Jetzt gibt's Saures

Da die gebildete Essigsäure das Wachstum von *E. coli* hemmt, war es wichtig zu erfahren, wie *E. coli* auf die Anwesenheit von Essigsäure reagiert. Dazu wurden mit den Gen-Chips die Aktivitäten aller Gene von *E. coli*-Zellen, die in Nährmedium ohne

Essigsäure bzw. in Nährmedium mit Essigsäure kultiviert wurden, miteinander verglichen. Das Ergebnis dieser Gen-Chip-Analyse war, dass Essigsäure zu einer erhöhten Aktivität von Genen führt, die für die Beweglichkeit und Chemotaxis verantwortlich sind - also der Steuerung und Fortbewegung der Bakterienzelle. Mit Hilfe von speziellen Sensorproteinen überwacht *E. coli* seine Umgebung. Wird eine Substanz wie Essigsäure wahrgenommen, so versucht die Bakterienzelle dem Einfluss dieser Säure zu entfliehen. Für die Fortbewegung benutzt *E. coli* einen komplex aufgebauten Apparat - die Flagelle (Abbildung 3).

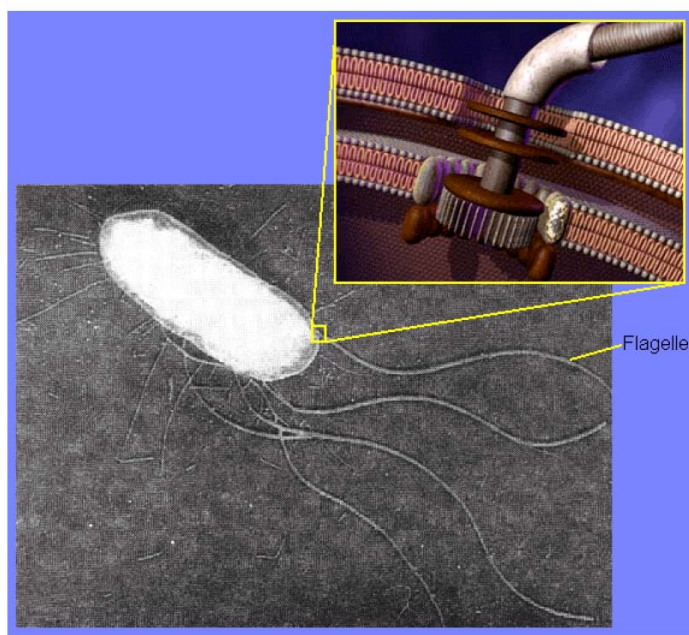


Abbildung 3. *E. coli*-Bakterium mit Flagellen. Beim Schwimmen erzeugen die durch einen Motor aus Proteinen (Computermodell) angetriebenen schnell rotierenden Flagellen die Schubkraft zum Schwimmen.

Bei der Flucht dienen die Flagellen als Antrieb, von denen eine *E. coli*-Zelle normalerweise etwa 8 Stück besitzt. So wie ein U-Boot von einer Antriebsschraube angetrieben wird, erzeugt die Drehbewegung der Flagelle eine Schubkraft. Diese rotieren etwa 100 Mal pro Sekunde. Die dabei erzeugte Schubkraft ist so gewaltig, dass die Zelle in einer Sekunde die zehnfache Strecke der eigenen Zellgröße zurück legen kann. Im Vergleich zu einem 100-m-Läufer entspräche dies etwa einer Bestleistung von nur 5 Sekunden anstatt der bisher üblichen 10 Sekunden.

Essigsäure macht *E. coli* schneller

Dass Essigsäure als Schreckstoff die Chemotaxis von Bakterienzellen beeinflusst ist schon lange bekannt. Die Gen-Chip-Analyse hat nun erstmalig gezeigt, dass *E. coli* auf die Anwesenheit von Essigsäure aber auch mit erhöhten Aktivitäten der Chemotaxis- und Flagellen-Gene reagiert, als ob durch zusätzliche Flagellen die Schwimmgeschwindigkeit bei der Flucht erhöht werden könnte, sozusagen durch mehr PS. Deshalb wurde mit einem Schwimmtest untersucht, ob *E. coli* in Gegenwart von Essigsäure tatsächlich schneller schwimmt. Für diesen Test wurden spezielle Schwimmplatten verwendet. Wenn in der Mitte der Schwimmplatten Bakterienzellen aufgetragen werden, breiten sie sich auf der Platte nach allen Richtungen aus. Im Vergleich zur Kontrolle ohne Essigsäure legten die Zellen in Gegenwart von Essigsäure etwa den doppelten Weg zurück (Abbildung 4).

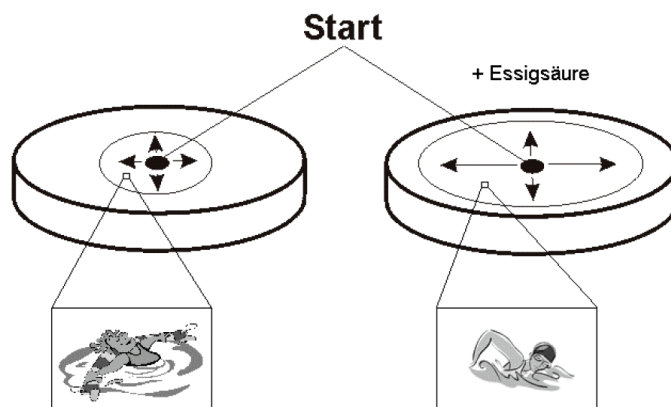


Abbildung 4. In Gegenwart von Essigsäure schwimmt *E. coli* schneller, wodurch die Ausbreitung auf den Schwimmplatten etwa doppelt so schnell erfolgt.

In dieser Arbeit konnten mit Hilfe von Gen-Chips die Stoffwechselveränderungen in dem Bakterium *E. coli* aufgeklärt werden, die zu der unerwünschten Nebenproduktbildung bei biotechnologischen Prozessen führen. Die Aufklärung globaler Regulationsnetzwerke der Stoffwechselwege ermöglicht die gezielte Stammverbesserung für biotechnologische Prozesse. Das Beispiel der Essigsäurebildung zeigt, dass die am Institut etablierte Gen-Chip-Technik als besonders geeignetes Werkzeug im Rahmen der Systembiologie zur Analyse von Prozessen belebter Materie eingesetzt werden kann. Die Gen-Chip-Analysen leisten somit als Teil des ganzheitlichen Forschungsansatzes der Systembiologie einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis lebender Systeme.

MTBE – Ein Kraftstoffzusatz auf dem Weg nach oben?

Transportuntersuchungen und Risikoabschätzungen von Benzinzusätzen nach einer Leckage in das Grundwasser

Volker Linnemann

Mit dem zunehmenden Wunsch der Menschen nach Mobilität und Unabhängigkeit steigt auch das Verkehrsaufkommen, insbesondere in den dicht besiedelten Städten stark an. Trotz moderner Technologien kann die Luftverschmutzung durch Autoabgase nicht ausreichend aufgehalten werden. Um das Bedürfnis der Bevölkerung nach einem hohen Lebens- und Gesundheitsstandard mit dem notwendigen Umwelt- und Klimaschutz in Einklang zu bringen, haben viele Staaten Grenzwerte für Treibhausgase (z. B. Kohlendioxid, Ozon) und Schadstoffe (Benzol, Dioxin, etc.) gesetzlich festgelegt. In Deutschland wird so bei Überschreitung des Ozongrenzwertes von $240 \mu\text{g} / \text{m}^3$ ("Ozongesetz") ein generelles Fahrverbot für Kraftfahrzeuge verhängt. In den USA hat die Regierung verschiedene Luftreinhalteprogramme umgesetzt, zum einen, um die Menge an krebserzeugenden Benzinbestandteilen, wie Benzol, zu verringern aber auch um die giftigen bleihaltigen Antiklopfmittel zu ersetzen. Antiklopfmittel verhindern eine unkontrollierte meist vorzeitige Verbrennung des Kraftstoff-Luft-Gemisches, welche alleine durch die Verdichtung im Zylinder ausgelöst wird (das sog. "Klopfen"). Als wichtigstes Antiklopfmittel wird heute der sauerstoffhaltige Ether MTBE (Methyl tert-butyl ether) eingesetzt. Für die vollständige Verbrennung von Benzin im Motor wird Sauerstoff benötigt. Dieser wird mechanisch während der Ansaugphase durch den Kolbenhub in den Ottomotor eingebracht und dort verdichtet. Da diese Sauerstoffmenge aber nicht für eine vollständige Verbrennung zu CO_2 ausreicht, wird durch Zusatzstoffe im Benzin (z.B. MTBE) zusätzlich Sauerstoff auf chemischen Wege in den Verbrennungsraum des Motors eingebracht.

Der enorme Bedarf an dem günstig herzustellenden MTBE führte dazu, dass diese Chemikalie zu den meist produzierten Massenchemikalien in den USA gehört. Insbesondere im hochoktanigen Super Plus Benzin (ROZ 98) werden bis zu 15 % MTBE zugesetzt. Doch die nachweisbare Verbesserung der Luftqualität durch die neuen "Oxyfuels" (= Benzine mit sauerstoffhaltigen Zusätzen) wurde auf Kosten der Grund- und Oberflächenwasserqualität erkaufte. Schon bald nach dem ersten Einsatz von MTBE wurde in den USA MTBE in teilweise gesundheitlich bedenklichen Mengen im Wasser gefunden. Offensichtlich war dieses aus leckgeschlagenen Tanks, Pipelines oder durch unsachgemäßes Säubern der Transportbehälter ins Wasser gelangt (Abbildung 1).

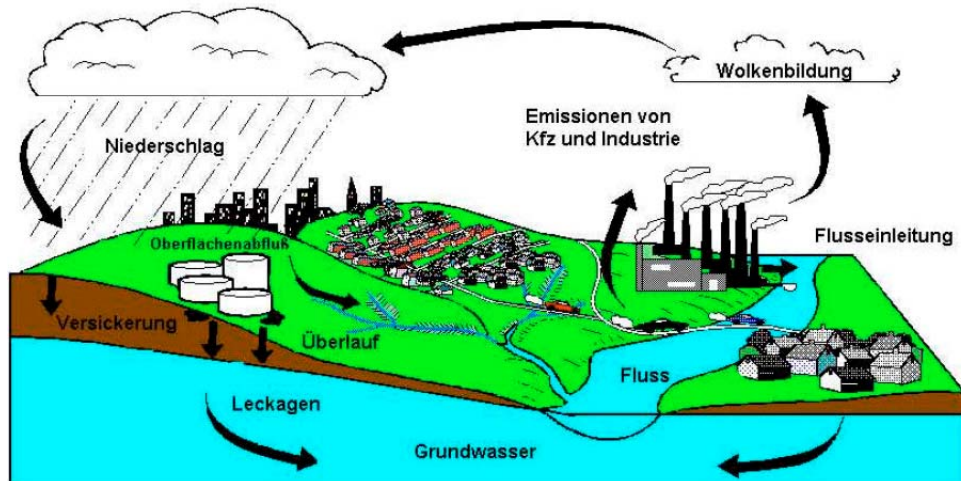


Abbildung 1: Mögliche Eintragsquellen von MTBE in die Umwelt nach punktförmiger (Leckagen, Überläufe, Versickerung) oder diffuser nicht lokalisierbarer (Emissionen, Flusseinleitung) Freisetzung in die Umwelt und Verteilung mit dem Wasserkreislauf der Erde.

Aufgrund seiner physikalischen und chemischen Eigenschaften ist MTBE in der Lage, nach einer Freisetzung in die Natur sich mit dem Wasserkreislauf der Erde überall zu verteilen. Mikrobiologen fanden zudem, dass die Wunderchemikalie im Grundwasser und den tieferen Bodenschichten von Mikroorganismen wie Bakterien und Pilzen fast gar nicht abgebaut wird. Nachdem Toxikologen auch noch ein erhöhtes Krebsrisiko bei Aufnahme von MTBE im Tierversuch feststellten, kam der Gedanke auf, man habe den "Teufel (Benzol, Blei) mit dem Belzebub (MTBE) ausgetrieben".

Die Diskussion um MTBE schien lange Zeit so sehr ein amerikanisches Thema zu bleiben, dass man in Deutschland bei Umweltschützern und Behörden einen weiten Bogen darum machte. Es gab keine Routineüberwachung von Wasser, Regen und Luft. Doch mittlerweile wird MTBE auch in Deutschland und anderen Staaten Europas im Wasser und Regen nachgewiesen (Tabelle 1).

Fluss	Ort	Datum	MTBE [ng L ⁻¹]
Rhein	Mainz	21.3.99	160
Rhein	Nierstein	21.3.99	136
Elbe	Dresden	28.3.99	123
Elbe	Hamburg	22.4.99	21
Elbe	Oberrathen	15.3.00	199
Elbe	Gauernitz	15.3.00	83
Saale	Bad Dürrenberg	21.3.00	24
Saale	Kröllwitz	21.3.00	18
Saale	Hektometer 121	21.3.00	57
Saale	Leuna/Waldbad	21.3.00	150
Main	Frankfurt a.M.	14.1.99	10
Main	Frankfurt a.M.	21.1.99	13
Oder	Frankfurt a.O.	10.3.99	7
Regen	Frankfurt a.M.	15.12.98	70
Regen	Frankfurt a.M.	22.3.99	n.d.
Regen	Frankfurt a.M.	20.4.99	9
See	Ammelshain	15.3.00	< 10
See	Cospuden	16.3.00	< 10
See	Goitsche	13.3.00	18
Grundwasser	Leuna		185 Mio

Tabelle 1: Gefundene Mengen an MTBE in deutschem Flusswasser, Regenwasser und Grundwasser in den Jahren 1998 –2000

Bisher lag der Fokus der Untersuchungen sowie der mathematischen Modelle zur Schadensabschätzung (Risk-Management) auf der Frage nach dem Weg des MTBE nach einer Leckage in das Grundwasser. Aufgrund der chemischen Eigenschaften der Substanz sowie das ubiquitäre Auffinden von MTBE nährten die Frage:

"Gibt es einen umgekehrten Transport aus dem Grundwasser wieder heraus in die Luft?"

Diese Fragestellung bildete den Grundstein für meine Dissertation. Weitere offene Fragen schlossen sich an:

- Was passiert wenn MTBE nach einer Leckage ins Grundwasser gelangt ist?
- Dampft MTBE, nach einem Grundwassertransport in ländliche unbelastete Regionen, aus dem Wasser durch den Boden in die Atmosphäre ab?
- Kommt es hierbei zu gesundheitlich bedenklichen Belastungen für den Menschen an der Oberfläche?
- Wie wird der Stoff auf einem möglichen Gastransport durch den Boden von den Bodenbakterien abgebaut?

Für die Lösungen der Fragen wurde ein dreistufiger Versuchsansatz gewählt.

Zunächst sollte in einem Laboransatz unter definierten Außenbedingungen die Größenordnung des MTBE Transports untersucht werden. Weiterhin sollte der verwendete Boden auf sein Selbstreinigungspotential für eine Belastung mit dem Benzin-Schadstoff untersucht werden. In der dritten Stufe wurde die Übertragbarkeit

der Ergebnisse in einem freilandähnlichen Windkanalversuch auf die reale Schadenssituation hin untersucht. Für die Laborversuche wurde ein Aufbau entwickelt und gefertigt, welcher in der Lage ist mit "echten" Bodenausschnitten Schadstofftransportuntersuchungen durchzuführen. Hierzu werden ungestörte Bodensäulen, in einem Edelstahlzylinder, aus einer unbelasteten Ackerfläche gestochen und an der Oberfläche mit einer künstlichen Atmosphäre (Glaskuppel über dem Boden) und an der Unterseite mit einem gasdichten Grundwasserbehälter zur Grundwassersimulation am Bodenkern versehen (Abbildung 2).

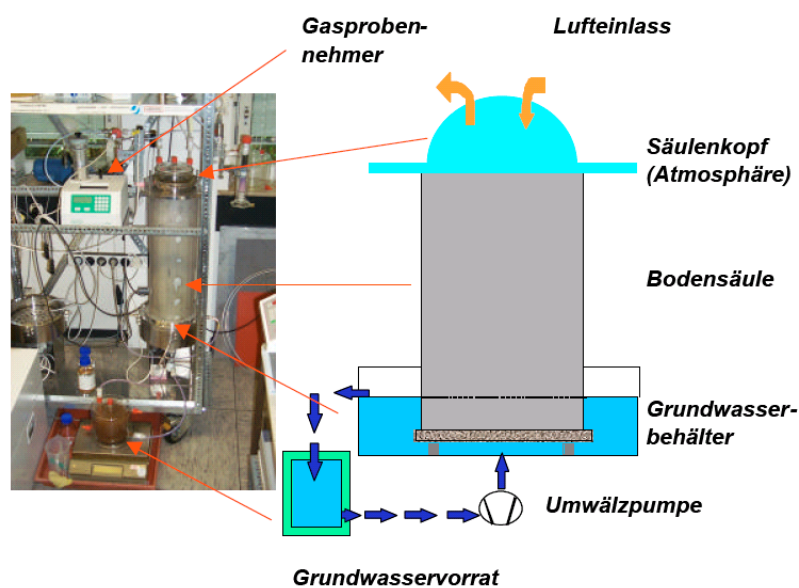


Abbildung 2: Die kleine künstliche Biosphäre für die Laboruntersuchungen des Schadstofftransports unter definierten Außenbedingungen, aufbauend auf einer ungestörten Bodensäule im Stahlmantel. Unter die Bodensäule ist ein zirkulierender Grundwasserleiter für die Schadstoffeinleitung angeschlossen. Den oberen Abschluss bildet eine Glaskuppel als künstliche Atmosphäre in welcher die ausgasenden Schadstoffe gesammelt und später analysiert werden können.

Der ganze Versuchsaufbau steht in einem großen klimatisierten Raum, um die Temperaturen im Versuch konstant zu halten. In das Grundwasser wird dann in den Experimenten MTBE langsam zudosiert, um eine Leckage nachzuahmen. Über die Versuchsdauer wird eine Konzentration im Wasser von ca. 200 mg/L konstant gehalten, welches real gefundenen Schadstoffmengen entspricht (Tabelle 1). Nach der Schadstoffeinleitung in das Grundwasser wird die Luft über der Bodensäule kontinuierlich über mehrere Tage abgesaugt und auf speziellen Sammelmaterien in Glasröhrchen (Aktivkohle-Adsorbentien) festgehalten (Abbildung 3).



Abbildung 3: In diesen gefüllten Glasröhrchen werden die gesuchten Moleküle gesammelt um sie anschließend auf ihre Zusammensetzung hin im Gaschromatographen zu analysieren.

Mit einer für das Institut neuartigen Technologie der Probenanalyse (Gaschromatographie mit massenselektiven Detektor) werden diese Röhrchen dann auf ihre Luftzusammensetzung hin untersucht. Die Glasröhrchen werden langsam auf ca. 300 °C erhitzt und dabei von Helium durchströmt, um alle organischen Schadstoffmoleküle wieder loszulösen und sie dann in einer Kältefalle des Analysengerätes festzuhalten. Hier können sie direkt aus der Kältefalle verdampft werden und in einer Trennsäule im Gaschromatographen voneinander getrennt werden. Ein Detektor am Ende dieses Trenngerätes ist in der Lage die Molekülmasse und meist auch die Struktur jeder unbekannten Verbindung, welche aus dem Gaschromatographen in den Detektor kommt, zu bestimmen. Doch leider gibt es nicht nur die gesuchten Schadstoffe (MTBE) in der Luft, welche aus der Bodensäule ausgasen, sondern auch verschiedene andere natürliche flüchtige organische Bestandteile im Boden, welche zum Beispiel aus Ernterückständen von Bakterien im Boden gebildet werden. Diese Störstoffe machen einen Nachweis von organischen Stoffen in natürlichen Systemen wie Boden, Wasser und Luft sehr schwierig (Matrixeffekt). Um diese Störungen zu eliminieren, wurde MTBE mit Radiokohlenstoff (^{14}C) sichtbar gemacht. Bei der Verwendung von sog. Radioisotopen macht man sich zu nutze, dass es verschiedene Atomsorten eines chemischen Elementes mit unterschiedlichen Massen gibt. Ein bekanntes Beispiel ist das Wasser aus normalem Wasserstoff (H) und das sog. schwere Wasser aus Deuterium (D), welches z.B. in Kernkraftwerken Einsatz findet. Dabei ist das Deuterium ein Isotop des Wasserstoffs und etwa doppelt

so schwer. Organische Moleküle mit einer Anreicherung an Radioisotopen kommen in der Natur nicht vor und können somit deutlich von den natürlichen organischen Moleküle unterschieden werden. Die radioaktiven Isotope in den Molekülen sind instabil, zerfallen mit der Zeit und geben dabei Energie in Form von radioaktiver Strahlung ab, welche dann messbar ist. Da sich die verschiedenen Isotope des Kohlenstoffs in der Umwelt nahezu gleich verhalten, können sie gegeneinander ausgetauscht werden. In weiteren Versuchen wurde das MTBE mit Radiokohlenstoff (^{14}C -MTBE) markiert und dann in das simulierte Grundwasser gegeben. Nach dem Versuch konnte so auch ^{14}C -MTBE im Boden, neben den organischen Humusstoffen, nachgewiesen werden.

Es stellte sich in den Bodensäulenversuchen heraus, dass der Transport des MTBE's aus dem Grundwasser durch den Boden in die Atmosphäre bei gleichen Außenbedingungen möglich ist, aber sehr unregelmäßig und nicht vorhersehbar ist. Die natürliche Heterogenität des Bodens beeinflusst hier sehr deutlich, z.B. durch die unterschiedliche Bodenstruktur (Bodendichte, Poren, Regenwurmgänge), das Ausgasen von flüchtigen Benzinbestandteilen aus dem Boden.

Die gefundenen Schadstoffmengen lagen alle im Bereich von einigen ppb (Parts per Billion). Diese entspricht der Menge eines Stücks Würfelzucker, aufgelöst in der Wassermenge von der Ladekapazität eines Supertankers. Um die Ergebnisse aus den Labor-Säulenversuchen auf die Freilandsituation zu übertragen, wurde ein großer Bodenblock ein sog. Lysimeter (1,5 Tonnen Gewicht, $\frac{1}{2} \text{ m}^2$ Oberfläche und 1,20m Bodentiefe) aus dem Feld ausgestochen und in das Forschungszentrum transportiert. In der Vergangenheit konnte in zahlreichen Versuchen gezeigt werden, dass ein relativ kleiner Erdblock (Lysimeter) repräsentativ für ein ganzes Feld von 10000 m^2 (1 Hektar) ist. Normalerweise werden Lysimeter für Versickerungsversuche von der Bodenoberfläche in das Grundwasser verwendet. Die Oberseite des Lysimeters kann nach der guten landwirtschaftlichen Praxis beackert und bepflanzt werden. Für meine Versuche habe ich dieses Konzept umgekehrt, also vom Grundwasser an die Oberfläche. Als künstliche Atmosphäre wird ein komplexer gläserner Windkanal, ein Eigenbau des Instituts verwendet, welcher aufgrund seiner Gebläse-Klimaeinheit jedes feldnahe Klima erzeugen kann (Abbildung 4).



Abbildung 4: Freilandwindkanal über einem natürlichen Bodenblock (Lysimeter) zur Emissionsmessung von organischen Schadstoffen aus dem Boden oder Pflanzenbestand. Durch eine Kopplung an eine externe Wetterstation kann jedes feldähnliche Klima simuliert werden.

Hierzu können die Windgeschwindigkeiten, die Lufttemperaturen, Luftfeuchten, Regenmengen von einer Wetterstation auf dem Feldstandort Merzenhausen (15 km Entfernung) per Telefon-Modemleitung auf einen Steuercomputer im Forschungszentrum übertragen werden und sofort im Windkanal nachgefahren werden. Auch im Windkanal und bei Lysimeterversuchen werden radioaktiv markierte Substanzen (u.a. mit Radiokohlenstoff) für die Experimente verwendet. Am Ausgang des Windkanals wird die ausströmende Luft zunächst vermischt und dann in einem

Probenahmeturm durch verschiedene Probensammler geleitet, in denen die flüchtigen Benzinzusatzstoffe und die Abbauprodukte (z.B. $^{14}\text{CO}_2$) aufgefangen werden. Für die Untersuchungen wurde unter dem Windkanal am Lysimeter ein künstlicher Grundwasserleiter konzipiert, in dem die Schadstoffeinleitung stattfindet. Während des Versuchs werden kontinuierlich alle notwendigen Klimadaten gespeichert. Nach dem Experiment werden aus dem Bodenblock Bohrkern-Proben entnommen, um die Verteilung der Schadstoffe im Boden zu bestimmen. Mit Hilfe der Radioaktivität lässt sich dann am Ende eine vollständige Bilanz über den Verbleib einer Umweltchemikalie in allen Kompartimenten (Luft, Pflanze, Boden, Wasser) aufstellen. MTBE verteilt sich im Boden mit dem Bodenwasser und war nach dem Versuch nur in den feuchten Bodenschichten nachweisbar. Auch im Großversuch wurde kein ständiger MTBE-Transport aus dem Boden nachgewiesen. Es traten immer wieder pulswise MTBE-Spuren in der Luftschicht über dem Windkanal auf. Somit konnten die Laborexperimente durch den Freilandwindkanal bestätigt werden. Es gibt also einen unregelmäßigen Antiklopfmittel-Transport durch den Bodenkern. Aber nach dem aktuellen Stand der Forschung ist das Antiklopfmittel MTBE in der gefundenen Größenordnung nicht krebserregend, insbesondere da es nur pulswise emittiert wird. Die in Deutschland, Schweden Finnland und den USA gesetzlich geregelten maximalen Arbeitsplatzkonzentrationen (MAK-Werte) von ca. 40 ppb werden um das tausendfache unterschritten. Lediglich die Geruchsschwelle von 3,4 – 1000 ppb, also die Konzentration, bei der man MTBE bereits mit der Nase riechen kann, bevor es zu gesundheitsbedenklichen Konzentrationen kommt, dürfte bei den festgestellten MTBE-Gehalten erreicht sein. Der menschliche Geruchssinn ist in diesem Fall empfindlicher als viele modernste Messgeräte und bietet einen guten Schutz und Warnmechanismus vor der Inhalation von giftigen Benzinbestandteilen. Um das Umweltverhalten von MTBE im Boden der verwendeten Bodensäulen und im Lysimeter besser abschätzen zu können, muss der mikrobielle Abbau des Benzinzusatzes in der ungesättigten Zone des Bodens zusätzlich untersucht werden. MTBE ist im Grundwasser unter Luftausschluss sehr beständig, aber in den mit Luft gefüllten Bodenporen findet sehr wohl ein Abbau statt. Für die Untersuchungen wird von dem gleichen Feld, an welchem auch die Bodensäulen gestochen wurden, Boden entnommen und im Labor auf sein Selbstreinigungspotential für MTBE untersucht. Hierzu wird der Boden in kleine Gefäße abgefüllt und mit einer speziellen CO_2 -Falle, zur Erfassung der Bio-Mineralisierung des MTBE's, verschlossen. Als Vergleichsboden wurde auch ein vorher mit Kraftstoffen belasteter Auelehm, vom ehemaligen Tankanlagen-Gelände des Forschungszentrums, mit untersucht. Nach etwa hundert Tagen wurde durch biologischen Abbau von MTBE im Ackerboden maximal eine Mineralisierung von 1,6 % der ausgebrachten MTBE-Menge festgestellt. Es konnte dabei keine Bodenfeuchtenabhängigkeit festgestellt werden. Der vorher über Jahre mit Benzin kontaminierte Auelehm konnte MTBE schneller abbauen als der natürliche Ackerboden. Die Abbaumengen lagen deutlich über den transportierten MTBE Mengen, so dass insbesondere dieses Verhalten in einer

mathematischen Beschreibung und Modellberechnung berücksichtigt werden muss und nicht vernachlässigbar ist.

Ein Ausblick für weitere Untersuchungen ist die Frage, ob Pflanzen, wie Bäume oder Kulturpflanzen, mit ihren teilweise tiefreichenden Wurzeln, den Transport von flüchtigen Benzinzusätzen aus dem Grundwasser durch eine Art Kaminwirkung schneller und in größerem Umfang fördern.

"Baum-Greise" erzählen vom Klima vor 1200 Jahren

Kerstin Treydte

In einem abgelegenen Tal im Karakorum (Nordpakistan), einem der höchsten und steilsten Gebirge der Welt, ist eine Gruppe Deutscher und Einheimischer mit Packeseln auf dem Weg zu ihrem Lagerplatz. Sie erleben in dieser Region auf engem Raum krasse naturräumliche Gegensätze: über trockenen und heißen Tälern erheben sich schroffe Hänge bis in kalte und feuchte Höhen von 8000 Metern. Während die Zelte in ca. 2600m Höhe auf vegetationslosem, staubigem Boden errichtet werden, brennt die Sonne vor dem Hintergrund der vergletscherten Gipfel von einem tiefblauen Himmel. Nach einer kurzen Pause mahnt die Leiterin der Gruppe, die Jülicher Wissenschaftlerin Kerstin Treydte, wieder zum Aufbruch. Gerätschaften werden gepackt, kurze Zeit später zieht ein Teil der Gruppe erneut los. Ein steiler, mühsamer Aufstieg beginnt, nach ca. 200 Höhenmetern verändert sich die Landschaft. Die Trockenheit nimmt ab, die spärliche Vegetation wird dichter und die ersten Wacholdersträucher tauchen auf.



Abbildung 1: Das Boibartal im Karakorumgebirge/Nordpakistan: ein klimatischer Extremraum mit mehr als 1000-jährigen, noch lebenden Wacholderbäumen; rechts: ein 1200-jähriger Wacholder in 3800m Höhe

Bald werden die Sträucher zu stämmigen, vier bis fünf Meter hohen Wacholderbäumen (*juniperus excelsa* und *turkestanica*), die eine offene Waldsteppe bilden. Dieser grüne Gürtel erstreckt sich bis in eine Höhe von 4000m, wo das Baumwachstum wegen der zunehmenden Kälte aufhört. In diesem klimatischen Extremraum, wo die Bäume in einem schmalen Bereich um das Überleben kämpfen, finden sich einige der zähesten und ältesten Individuen weltweit. Sie reagieren höchst sensibel auf geringste Klimaveränderungen. Die Wissenschaftlerin entnimmt ihrem Rucksack einen 40cm langen, hohlen Stahlbohrer mit einem Gewinde an der Spitze, den sie in den Stamm eines ausgewählten Baumes dreht. Etwas später zieht

sie einen bleistiftdicken Bohrkern heraus – ein Buch, in dem 1200 Jahre Klimageschichte geschrieben stehen.



Abbildung 2: Bohrkern-Entnahme aus einem lebenden Baum

Offene Fragen in der Klimaforschung

"Sturm und Flut in halb Europa", "Pole verlieren ihre Eiskappen" – die Wetterkapriolen der letzten Jahre nehmen mit solchen und ähnlichen Schlagzeilen in den Medien zum Teil breiten Raum ein. Die globale Erwärmung und ihre möglichen Folgen für die Menschheit werden mit Sorge beobachtet. Doch wie "extrem" ist die festzustellende Klimaveränderung wirklich? Von 1990 bis 2001 war auf der Nordhalbkugel der wärmste Zeitraum seit Beginn der instrumentellen Klimamessungen (um 1850). Das Jahr 1998 war das wärmste überhaupt, gefolgt vom Jahr 2001. Die Ursache liegt scheinbar auf der Hand: Vor Beginn der Industrialisierung im 19. Jahrhundert war der Mensch den natürlichen Klimaschwankungen ausgeliefert. Heute wirkt er seinerseits durch den Ausstoß von Kohlendioxid und anderen sogenannten "Treibhausgasen", z. B. bei der Verbrennung von Kohle, Erdöl und Erdgas, auf das Klimasystem ein. Es ist aber noch unklar, wie stark der anthropogene, also der menschliche Anteil an der beobachteten Erwärmung tatsächlich ist. Befinden wir uns heute schon in der Phase eines nie da gewesenen, globalen Klimawandels? Oder bewegt sich die aktuelle Entwicklung noch im Rahmen natürlicher Klimaschwankungen früherer Zeiten?

Die besten Klimaarchive

Um diese Fragen zu klären, braucht man genaues Wissen über die natürlichen Schwankungen des Klimas in Zeiten, in denen der Mensch nicht oder noch nicht so stark Einfluss auf seine natürliche Umgebung genommen hat. Dabei besteht das Problem, dass erst seit 200 Jahren Klimamessungen durchgeführt werden, und für Zeiträume, die weiter zurückliegen, keine direkten Klimadaten vorliegen. Informationen über die Witterungsbedingungen früherer Perioden können aber Ersatzdaten ("Proxidaten") aus natürlichen Archiven liefern, wie sie z. B. Einschlüsse im Eis der polaren Eiskappen, auf dem Meeresgrund oder in Seen sedimentierte

Schichten – oder Jahrringe von Bäumen darstellen. Sie sind die Klimaarchive, welche auf allen Kontinenten am weitesten verbreitet sind und die sicherste und höchste zeitliche Auflösung ermöglichen. Darüber hinaus lassen sich die aus der Analyse von Jahrringen gewonnenen Ergebnisse jahrgenau datieren. Klimainformationen, die im Holz der Bäume gespeichert sind, können über den Vergleich mit direkt gemessenen Klimawerten wie Temperatur oder Niederschlagsmengen genau erfasst werden. *Dendroklimatologen* (gebildet aus dem griechischen Wort für Baum *dendros*) können mit Hilfe von statistischen und mathematischen Modellen aus den geeichten Jahrringdaten das Klima für die Zeiträume rekonstruieren, aus denen keine Wetterdaten vorliegen.

Die Sprache der Bäume entschlüsseln und verstehen

Im Dendro-Labor des Forschungszentrums Jülich entschlüsselt die Dendroklimatologin die Sprache der pakistanischen Wacholderbäume. Sie geht bei ihrer Arbeit zunächst vor wie der Waldspaziergänger, der an abgesägten Baumstämmen die Jahrringe zählt, um das Baumalter zu erfahren und dabei "gute" und "schlechte" Jahre unterscheiden kann. Statt Lupe und Maßband nutzt sie jedoch ein Mikroskop mit bis zu 40-facher Vergrößerung, das mit einem computergestützten Messtisch verbunden ist. Damit kann sie in kurzer Zeit ganze Jahrringserien mit einer Genauigkeit von 1/100 mm erfassen und als Wachstumskurven darstellen (Abbildung3).



Abbildung 3: Computergestützter Messtisch mit Mikroskop zur Jahrringbreitenmessung (Forschungszentrum Jülich)

Neben den Jahrringbreiten der alten Bäume untersucht sie in aufwändigen Laborarbeiten Kohlenstoff und Sauerstoff-Isotope in der Zellulose der Jahrringe. Isotope sind Atome eines Elementes, die chemisch identisch sind, sich aber in ihrer Masse unterscheiden. So gibt es bei jedem chemischen Element schwere und leichte Isotope, beim Kohlenstoff z. B. die Isotope ^{13}C (schwer) und ^{12}C (leicht). Sie bleiben über lange erdgeschichtliche Zeiträume stabil und sind nicht zu verwechseln mit dem radioaktiven ^{14}C -Isotop, das zerfällt und für die vorliegende Arbeit keine Rolle spielt. Beim Sauerstoff werden die stabilen ^{18}O - (schwer) und ^{16}O -Isotope (leicht) untersucht. Aus technischen Gründen misst man jeweils das Verhältnis der schwereren zu den leichteren Isotopen einer Probe und nicht die absolute Anzahl. Zur Bestimmung der Isotopenverhältnisse werden die Jahrringe einzeln von den mitgebrachten Bohrkernen abgeschnitten, zerkleinert und chemisch behandelt, bis nur noch die Zellulose zurückbleibt (Abbildung 4).

Diese ist die stabilste chemische Verbindung im Holz und daher am besten zur Analyse vergangener Umweltbedingungen geeignet. Jede einzelne Zelluloseprobe wird in gasförmigen Zustand gebracht, in ein Massenspektrometer geleitet und dort das Verhältnis der schwereren zu den leichteren Isotopen ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ bzw. $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) bestimmt. Auch diese Daten der von Jahr zu Jahr variierenden Isotopenverhältnisse werden als Kurven dargestellt, wie weiter unten zu sehen ist. Doch welche Bedeutung haben die verschiedenen Isotope für die Klimaforschung?



Abbildung 4: Zellulose-Extraktion aus Jahrringen im Dendro-Labor Jülich (jedes Glas enthält das Holz eines einzelnen Rings)

Isotope in der Dendroklimatologie

Pflanzen streben danach, über die Spaltöffnungen an der Unterseite ihrer Blätter bzw. Nadeln möglichst viel lebensnotwendiges Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufzunehmen, aber dabei möglichst wenig zu "schwitzen", also Wasser über die Transpiration zu verlieren. Daher schließen sie bei trockenen und warmen Bedingungen die Tür nach außen bis auf einen kleinen Spalt, um nicht auszutrocknen. Bei feuchter und kühler Witterung ist die Tür weit offen und kann viel Kohlendioxid nach innen durchlassen. Im Blattinneren sitzt in den Chloroplasten ein Enzym mit dem Namen Rubisco. Seine Aufgabe ist es, den Kohlenstoff aus den angekommenen Kohlendioxid-Molekülen weiterzuverarbeiten. Es bevorzugt die Moleküle mit dem leichten ^{12}C -Isotop und vernachlässigt Moleküle mit dem schweren ^{13}C -Isotop. Auswählen kann das Enzym jedoch nur bei offener Tür, also wenn genug Kohlendioxid vorhanden ist. Wird die Tür bei Trockenheit und Wärme zugezogen, muss Rubisco nehmen, was es bekommt: es verarbeitet notgedrungen mehr der schweren ^{13}C -Isotope. Der Anteil der schweren und leichten Isotope in den einzelnen Jahrringen informiert also darüber, ob es warm bzw. trocken oder ob es kühl bzw. feucht gewesen ist.

Während die Kohlenstoff-Isotope über die Luft aufgenommen werden, gelangen die Sauerstoff-Isotope aus dem Niederschlagswasser (Regen oder Schnee) über die Wurzeln in den Jahrring. So können in manchen Regionen Rückschlüsse auf die Herkunft des Niederschlages (aus niedrigeren oder höheren geographischen Breiten) und auf die Temperaturbedingungen gezogen werden, unter denen er entstanden ist. In anderen Regionen bekommt man vermehrt Informationen über die Menge des gefallenen Regens bzw. Schnees.

Wasser und Wärme

Was erzählen nun die Jahrringbreiten und Isotope der Wacholderbäume im Karakorum über deren Lebensbedingungen? Zunächst ist interessant, wie die Bäume auf die anfangs geschilderten naturräumlichen Gegensätze reagieren. Dazu wurden für das 20. Jahrhundert (1900-1998) die Jahrringbreiten und Isotope von vier Standorten aus drei Tälern verglichen, die ca. 80 km weit voneinander entfernt liegen. Es handelt sich um zwei feucht-kühle Standorte in 3500 bzw. 3800 m (Nr. 1 u. 2), einen trocken/kühlen in 3900 m (Nr. 3) sowie einen trocken-warmen Standort in 2900 m Höhe (Nr. 4). Für die Jahrringbreiten wurden pro Standort die Proben von zwölf bis fünfzehn Bäumen entnommen, für die Untersuchung der Isotope fünf bis sieben. Aus den Einzeldaten der Bäume wurden Durchschnittswerte als Ausgangspunkt für Vergleiche ermittelt.

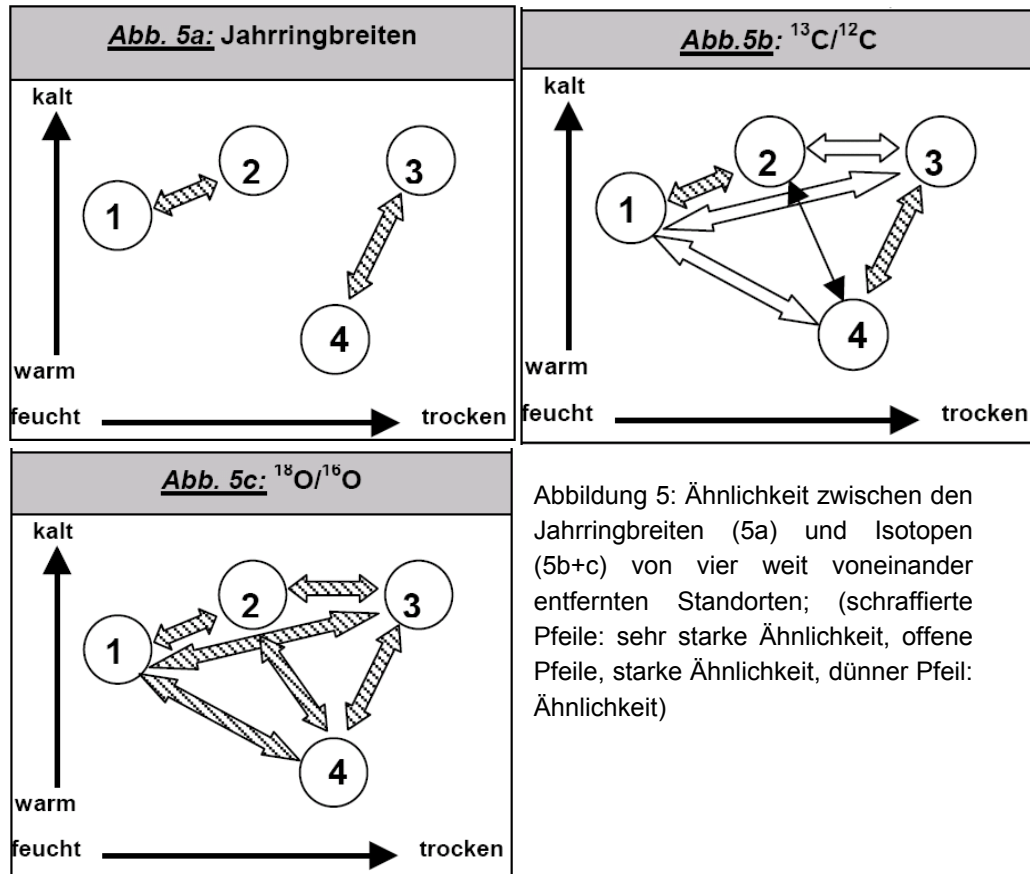


Abbildung 5 zeigt anhand der Pfeilstärken für jeden Parameter den Zusammenhang zwischen den Standorten. Die Jahrringbreiten (Abbildung 5a) sind nur zwischen den feuchteren bzw. trockeneren Standorten ähnlich. Die Kohlenstoff- Isotope (Abbildung 5b) verhalten sich an allen Standorten mehr oder weniger ähnlich, allerdings wieder mit stärksten Zusammenhängen zwischen den feuchteren bzw. den kühleren. Verblüffend ist das Bild für die Sauerstoff-Isotope (Abbildung 5c). Obwohl die naturräumlichen Bedingungen an den vier Standorten so unterschiedlich sind, verhalten sich die $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -Verhältnisse in den Jahrringen aller vier Standorte nahezu gleich. Das bedeutet, dass jeder der drei Jahrring-Parameter offensichtlich durch andere Einflüsse gesteuert wird. Je stärker die Zusammenhänge zwischen den Standorten sind, desto dominanter muss ein Einflussfaktor sein, auf den alle Bäume über weite Entfernungen gleichermaßen reagieren. Welches ist jedoch dieser entscheidende Einfluss?

Die direkt gemessenen Wetterdaten, die für das Karakorumgebirge zur Verfügung stehen, geben die Antwort. Die Ringbreiten werden an den feucht/kühlen Standorten durch die Temperaturen im Frühsommer, an den trockenen Standorten eher durch

den Niederschlag der gesamten Vegetationsperiode gesteuert. Die $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnisse in den Jahrringen aller Standorte reagieren hingegen einheitlich auf die Hochsommer-Temperaturen, wobei die Stärke der Reaktion abhängig von der Feuchtigkeit des Standortes ist. Die $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -Verhältnisse aller Standorte zeigen einen klaren Zusammenhang mit den Winterniederschlägen. Diese stehen den Bäumen zu Beginn der Vegetationsperiode, wenn die meisten Jahrringzellen gebildet werden, als lebensnotwendiges Schneeschmelzwasser zur Verfügung.

Es zeigt sich also, dass die Isotopenverhältnisse schon eines Standortes für den gesamten Hochgebirgsraum repräsentativ sein können. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, vergangene Temperatur- und Niederschlagsschwankungen zu rekonstruieren – und das sogar auf jahreszeitlicher Basis.

Die Klimageschichte

Die vorliegende Arbeit bietet das erste Mal in der dendroklimatologischen Forschung die Gelegenheit, zwei mehr als tausend Jahre lange C- und O-Isotopenkurven mit jahrgenauer Auflösung aus denselben Bäumen gegenüberzustellen. Abbildung 6 zeigt die Kurven, die aus den Messungen der ältesten Bäume entstanden sind. Mit ihnen beginnen die uralten Wacholder aus dem Karakorum, über die klimatische Vergangenheit des Hochgebirges bis in das Jahr 828 n. Chr. zurück zu erzählen. Man hat sich international darauf geeinigt, als Bezugspunkt für die Klimaforschung das Werte-Mittel der Jahre 1961-1990 angegeben, das in der Abbildung als zentrale horizontale Linie dargestellt ist. Im Karakorum sind die Bäume zwischen 900 und 1100 n. Chr. deutlich höheren Temperaturen ausgesetzt gewesen als heute. Dann folgte ein langer Zeitraum, in dem es nach und nach kühler wurde, unterbrochen durch einige wärmere Perioden wie um 1200 bis 1300 n. Chr. oder um 1450. Das 19. Jahrhundert war das kälteste in den letzten 1200 Jahren. Danach stiegen die Temperaturen schnell an, erreichen heute aber noch nicht wieder die Bedingungen, wie sie vor 1000 Jahren herrschten. Die Veränderungen der Winterniederschläge geschahen nicht so allmählich wie die der Temperaturen. Starke Veränderungen vollzogen sich eher innerhalb von Jahrzehnten. Allerdings waren während der Warmphase vor 1000 Jahren auch die Winter über einen längeren Zeitraum trockener als heute. In jüngster Zeit hingegen wird der Temperaturanstieg im Sommer von feuchteren Wintern begleitet. Die Temperaturentwicklung passt gut in das Bild, das man aus dem viel besser untersuchten Europa kennt. Hier berichten zahlreiche historische Aufzeichnungen, Gemälde aber auch die Daten aus der Erforschung verschiedener natürlicher Archive von einer ausgeprägten Warmphase um 1000 n. Chr., die auch als "Mittelalterliches Optimum" bezeichnet wird. Damals konnten z. B. die Wikinger für 200 Jahre Grönland (das "grüne Land") besiedeln, während im Süden Englands Wein angebaut wurde. Auch von einer lang andauernden Kälteperiode mit einem Maximum im 18./19. Jahrhundert, der "Kleinen Eiszeit", wird in verschiedenen Quellen berichtet. In den Alpen mussten zu dieser Zeit ganze Siedlungen aufgegeben werden, weil sie von vorrückenden Gletschern

bedroht wurden, die Themse war über längere Zeit zugefroren und in der Nord- und Ostsee trat verstärkt Packeis auf.

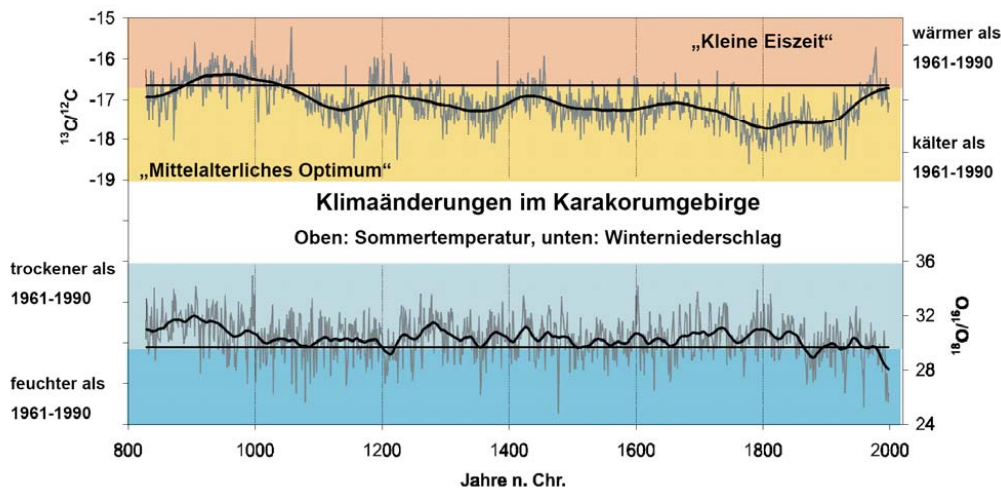


Abbildung 6: 1200 Jahre Klimageschichte aus Kohlenstoff- und Sauerstoff-Isotopen im Karakorum (Nordpakistan). Die an den Achsen stehenden Isotopenwerte sind als Abweichung (in Promille) von einem international festgelegten Standard angegeben. Die $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Werte liegen niedriger als der Standard und sind deshalb negativ.

Die langfristige Entwicklung von Niederschlägen ist weltweit weniger erforscht als die Veränderung der Temperaturen, was auch daran liegt, dass die Daten meist nur auf eine kleine Region bezogen werden können. Zugleich existieren nur wenige Rekonstruktionen, die über tausend Jahre zurückreichen. So ist es schwierig, die Entwicklung der Winterniederschläge im Karakorum in einen größeren Zusammenhang zu stellen.

Dennoch erzählen die "Baum-Greise" Nordpakistans mehr als nur die Geschichte des Klimas in der Region, in der sie wachsen. Der Großraum Hochasien stellt mit Karakorum, Himalaja und dem Zentralasiatischen Hochplateau als Heizfläche im Sommer und als Kältepol im Winter einen bedeutenden Motor für das globale Klimasystem dar. Die Kenntnis der lokalen Temperatur- und Niederschlagsveränderungen kann damit von entscheidender Bedeutung für das Verständnis weltweiter Entwicklungen sein.

2004

**Von starker Keramik,
wachsenden Rissen und
Ozon im Polarwirbel**

Von starker Keramik, wachsenden Rissen und Ozon im Polarwirbel

Fasern machen Keramiken (fast) "unkaputtbar"

Was hat die Nase des Spaceshuttles mit modernen Bremscheiben gemeinsam? Sie bestehen aus faserverstärkter technischer Keramik. Das Material hat eine hohe Lebensdauer, denn es ist besonders verschleißfest und hochtemperaturstabil. Ein neuartiges Herstellungsverfahren für solche Siliziumcarbid-Keramik hat Juliane Mentz in ihrer Doktorarbeit entwickelt. Das Material wird durch Kohlenstoff-Fasern verstärkt und ist besonders preisgünstig.

Keramiken sind hart, sehr stabil und chemisch beständig. Allerdings sind sie auch spröde: Sie zerbrechen bei hoher Beanspruchung spontan und mit scharfen Kanten. Bruchsfester wird das Material, wenn die Materialforscher Fasern einbauen. Tritt trotzdem ein Bruch auf, geschieht das dann allmählich – Wissenschaftler nennen dies "schadenstolerant". In der Raumfahrttechnik zum Beispiel werden beschichtete Fasern eingesetzt, die wie Gummibänder die dichte Keramik zusammenhalten, bevor sie selbst reißen – ein sehr teures Material.

Juliane Mentz vom Institut für Werkstoffe und Verfahren der Energietechnik ist einen anderen Weg gegangen. Die Idee: Ein Riss in einer porösen Keramik kann – im Gegensatz zur sehr dichten Keramik in der Raumfahrttechnik – immer nur von einer Pore zur nächsten laufen. Sehr hohe Materialverspannungen können dadurch abgefedert werden. Daher müssen die verstärkenden Fasern nicht mehr beschichtet werden. Das Material ist billiger herzustellen. Bei ihrem Verfahren, das die "innere Silizierung" nutzt, werden zunächst ein Kunststoffharz und Siliziumpartikel um die Fasern verteilt. Bei der Umwandlung dieser Ausgangsstoffe in die Keramik schrumpft zwar das Material, der gesamte Verbundkörper allerdings nur wenig. Die eingelagerten Fasern halten die Form. Dadurch entsteht insgesamt eine vergleichsweise hohe Porosität von über 30 Prozent. Durch die gleichmäßige Verteilung der einzelnen Ausgangsstoffe sind auch die Poren gleichmäßig verteilt. Und sie sind besonders klein. Dies ist sehr günstig für die mechanischen Eigenschaften des Materials. Biegeversuche bestätigen das. Ein weiterer Vorteil: Ein Keramikbauteil kann gleich zu Beginn in Form gebracht, aber auch zwischendurch noch leicht bearbeitet werden.

Auf Biegen und Brechen

Robert Spatschek ist es in seiner Doktorarbeit am Institut für Festkörperforschung gelungen, das "Phänomen Riss" in Formeln zu packen. Ihn interessierte: Wie breiten sich Risse aus? Warum sind Risse mal glatt, mal "gezackt" und warum verzweigen sie sich zu solch komplizierten Mustern wie bei zerbrochenem Glas?

Risse sind allgegenwärtig und entstehen in jeder Größe: Nanorisse lassen Werkstoffe altern, ein Rissnetz durchzieht zerbrochenes Glas, Erdbebenspalten trennen die Kontinente. Mitunter bilden sich sehr ästhetische Rissmuster: Ein Beispiel sind die sechseckigen Basaltsäulen von "Fingal's Cave" auf der schottischen Insel Staffa. Sie entstanden vor vielen Millionen Jahren beim Erstarren von Lava. Starke thermische Verspannungen ließen das Gestein aufbrechen. Während seiner Doktorarbeit entwickelte der Physiker Robert Spatschek eine Theorie, die davon ausgeht, dass Risse wachsen, weil Atome von der Spitze des Risses wegwandern. Was passiert dabei? Es gibt zwei Gegenspieler: die Energie der Oberfläche und die elastische Verformung. Die Oberflächenenergie glättet die winzige kugelförmige Risspitze. Die elastische Kraft raut allerdings die Oberfläche des Risses auf, da sie die Atome vorantreibt. Dieses Wechselspiel ist dafür verantwortlich, dass sich der Riss bewegt. Wie schnell kann er dabei werden? Nach bisherigem Verständnis sollten sich Risse so schnell wie der Schall ausbreiten. Tatsächlich sind sie nur etwa halb so schnell – auch dies bestätigt Spatscheks Theorie. Und wenn die Risse doch mal schneller werden, fangen sie an, sich mehr und mehr zu verzweigen. Der junge Wissenschaftler konnte sogar zeigen, nach welchen Gesetzen sich viele Risse verhalten. So wachsen große Risse auf Kosten von kleinen, um zum Beispiel bei einem Erdbeben Verspannungen im Boden abzubauen.

Auf frischer Tat ertappt – Wie sich Ozon in den Polarwirbel einmischt

Der atmosphärische Sonnenschutz – die Ozonschicht – hat Löcher. Daher fahnden Atmosphärenforscher weltweit nach den Ursachen. Sie wissen: Das Chlormonoxidradikal greift massiv in die Chemie der Stratosphäre ein. Doch ist an den Orten mit viel Chlormonoxid auch wenig Ozon? Wie bestimmen Transportprozesse zwischen den Luftmassen das Geschehen? Diesen Fragen ging Ulf Winkler in seiner Doktorarbeit nach.

Die Winter sind eiskalt im nordschwedischen Kiruna, jenseits des nördlichen Polarkreises. Trotzdem zieht es gerade in dieser Jahreszeit Atmosphärenforscher wie Ulf Winkler vom Institut für Chemie und Dynamik der Geosphäre dorthin. Der Grund ist das polare Ozonloch. Während der Polarnacht bildet sich nämlich über den Polen ein gigantisches rotierendes Tiefdruckgebiet, der "Polarwirbel". Die darin befindliche Luft bleibt über Monate in Dunkelheit und Kälte gefangen – Eiswolken entstehen. Dies sind ideale Voraussetzungen, um chlorhaltige Moleküle in hochreaktive Radikale zu verwandeln. Sobald im Frühjahr die Sonne zurückkehrt, greifen dann die gebildeten Radikale das Ozon an. Jülicher Forscher schicken regelmäßig per Forschungsballon ein Instrument in die Stratosphäre, um den Haupt-Ozonkiller Chloroxid zu beobachten. Ulf Winkler wertete einen Ballonflug aus, bei dem sich gerade der Rand des Polarwirbels über Kiruna befand. Die Ergebnisse erschienen auf den ersten Blick selbstverständlich: Wo viel Chloroxid ist, ist wenig Ozon, und umgekehrt. Bei näherer Betrachtung sind die Dinge jedoch komplexer.

Über auf- und abwärts schwingende Luftmassen dringt ozonreiche Luft in den Wirbel ein und verändert so die Chemie in seinem Innern. Das Verständnis solcher Einmisch-Vorgänge ist sehr wichtig, um das genaue Ausmaß des Ozonabbaus zu bestimmen. Seit zwei Jahren sind die Jülicher Forscher auch in der Lage, ihr Chloroxid-Instrument mittels eines Forschungsflugzeugs an jeden beliebigen Ort in der unteren Stratosphäre zu transportieren, um solche Transportprozesse zu identifizieren.

Fasern machen Keramiken (fast) "unkaputtbar"

Juliane Mentz

Keramiken kennt jeder aus dem täglichen Leben. Sie begegnen uns beispielsweise in der Küche (Geschirr) und im Bad (Waschbecken, Kacheln). Es gehören also sowohl das gute weiße Porzellan als auch dunkle Kacheln und Tonziegel zu der großen Gruppe der Keramiken. Keramiken werden auch im technischen Bereich eingesetzt. Das sind dann Materialien wie z. B. Aluminiumoxid (Al_2O_3) oder Siliziumcarbid (SiC), um das es hier gehen wird. Keramiken zeichnen sich allgemein durch eine hohe Stabilität und Festigkeit auch bei sehr hohen Temperaturen (bis deutlich über 1000°C hinaus) und ihre chemischen Beständigkeit (z.B. gegenüber Säuren) aus. Sie haben auch eine sehr hohe Härte (bis zu der von Diamant). Durch diese Eigenschaften können sie die vielfach eingesetzten Metalle (Stähle) an einigen Stellen gut ersetzen: So sind Gleit-, und Lagerelemente ohne Keramik heute kaum mehr denkbar. Und auch im Pumpen- und Armaturenbau werden sie zur Auskleidung von Rohren verwendet, um diese vor aggressiven Medien zu schützen.

Aber Keramiken haben auch Nachteile. Jeder hat schon einmal erfahren, dass Keramiken "spröde" brechen - hoffentlich erst auf einem Polterabend und nicht zu Hause durch die beste Vase. Wenn Keramik herunter fällt, ist sie kaputt. Ein Blechteller wäre nur verbeult. Dieses Verhalten der Keramiken ist für manchen technischen Einsatz katastrophal. So könnten Nasen von Spaceshuttles oder Keramik-Bremsscheiben nicht verwendet werden, wenn im Fall einer Überlastung ein katastrophaler Bruch die Folge wäre. Aufgrund der hohen Festigkeit der Keramiken entsteht ein Riss zwar erst bei hohen Kräften, die an der Keramik wirken (auch auf dem Polterabend geht nicht alles beim ersten Wurf kaputt), sobald aber doch ein Riss entstanden ist, ist er nicht mehr zu stoppen und das Bauteil versagt schlagartig. Genau dieses Verhalten nennt man spröde.

Es muss also erreicht werden, das spröde Versagen der Keramiken abzumildern. Dies ist möglich, indem Fasern in die Keramik eingelagert werden. Dünne Fasern können durch ihre Form sehr hohe Kräfte aufnehmen und die Keramik dadurch verstärken. Kommt es dann zu einer Überlastung des Materials, wird der Bruch abgemildert. Die Keramik bricht schon bei geringer Verformung und die Fasern müssen dann die gesamte Last tragen, bis auch sie versagen. Abbildung 1 zeigt, was passiert, wenn in der Keramik ein Riss entsteht. An der Risspitze (rechts im Bild) wird der Riss an einer Faser umgelenkt, d.h. er ändert seine Richtung. Davor ist in einem Bereich die Keramik gebrochen, die Fasern überbrücken aber weiterhin den Riss und sind noch intakt. Ist irgendwann auch die ertragbare Last der Fasern überschritten, so brechen sie. Im Idealfall versagt jede Faser an einer anderen Stelle und wird anschließend aus der Keramik herausgezogen ("Faser-Pullout"). Bei allen

diesen Vorgängen wird Energie verbraucht. Das mildert die Auswirkung des Risses ab und das Versagen eines Bauteils erfolgt allmählich, man sagt schadenstolerant.

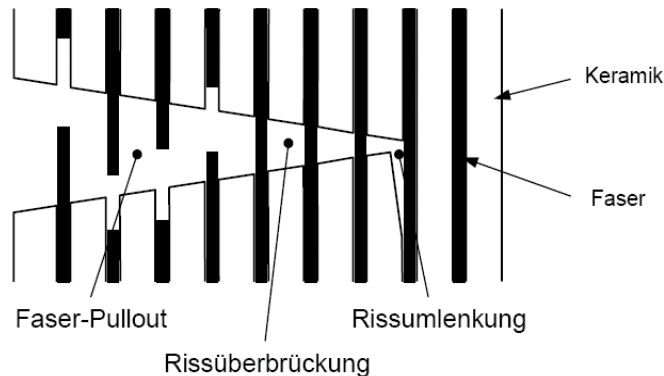


Abbildung 1: Aufgaben der Fasern bei einem auftretenden Riss in der Keramik.

Ein wichtiger Vertreter der faserverstärkten Keramiken ist kohlenstofffaserverstärktes Siliziumcarbid (abgekürzt mit C/SiC). Kohlenstoff (C) zeigt insbesondere in der Form von dünnen Fasern (Durchmesser 0,007 mm) eine hohe Festigkeit bis zu sehr hohen Temperaturen (über 2000°C) - solange kein Sauerstoff in der Nähe ist. Denn dann verbrennt der Kohlenstoff. Siliziumcarbid (SiC), das ja oben schon vorgestellt wurde, passt als umgebendes Material gut zu den Kohlenstofffasern. Es hat im Gegensatz zu Kohlenstoff eine recht gute Beständigkeit gegenüber Sauerstoff und auch gegenüber vielen anderen Stoffen.

Nun ist also klar, wie Keramiken dazu gebracht werden können, nicht mehr so schlagartig kaputt zu gehen. Sie müssen "nur" durch Fasern verstärkt werden. Das ist allerdings nicht so einfach, wie es sich anhört. Die Fasern müssen schon während der Herstellung in die Keramik eingearbeitet werden, gleichmäßig verteilt sein und sie dürfen natürlich auch nicht während der Herstellung des Bauteils zerstört werden (beispielsweise durch zu starken Druck). Dazu kommt, dass die Eigenschaften des endgültigen Materials auch wesentlich durch die Struktur der Keramik (z.B. dichtes oder poröses SiC) und auch durch die Stärke der Haftung zwischen Fasern und umgebender Keramik abhängen. Das heißt, ein C/SiC-Material ist nicht mit jedem anderen C/SiC-Material vergleichbar.

Wir hatten oben gesehen (Abbildung 1), dass ein Riss in der Keramik um die Fasern herumgelenkt wird und diese erst einmal intakt bleiben. Dazu darf die Keramik nicht zu fest mit den Fasern verbunden sein. Sonst würde der Riss sofort auch durch die Faser weiterlaufen und die Fasern könnten ihren Zweck nicht erfüllen. Wird also um die Fasern herum ein dichtes Material aufgebaut, so muss dessen Haftung zu den Fasern vergleichsweise gering sein. Dies wird erreicht, indem die einzelnen Kohlenstofffasern mit einer sehr dünnen Schicht umhüllt werden, die beispielsweise auch aus Kohlenstoff bestehen kann. Die Herstellung solcher Materialien mit

beschichteten Fasern ist sehr teuer. Sie zeigen aber sehr gute Eigenschaften und werden hauptsächlich im Raumfahrtbereich eingesetzt, z.B. als die oben erwähnten Nasen von Spaceshuttles. Für eine breite industrielle Einführung sind sie allerdings nicht erschwinglich - und die speziellen Eigenschaften teilweise auch gar nicht notwendig. Bei den Keramikbrems scheiben, die zur Zeit durch die Presse gehen, wird dagegen ein vergleichsweise preiswertes Herstellungsverfahren für C/SiC eingesetzt. Das resultierende Material zeigt ganz andere Eigenschaften, da es für diesen besonderen Einsatz entwickelt ist. Im Gegensatz zu den konventionellen Grauguss scheiben sind diese neuen Brems scheiben sehr teuer. Sie haben aber deutliche Vorteile im Bremsverhalten und in der Lebensdauer, was sie attraktiv macht.

Eine andere Möglichkeit, eine Rissumlenkung an den Fasern zu erreichen, besteht darin, ein Material mit hoher Porosität herzustellen. Die Fasern sind natürlich weiterhin dicht, aber die umgebende Keramik ist hochporös. Ein Riss in dieser porösen Keramik kann dann immer nur bis zur nächsten Pore laufen, danach muss an der Poren oberfläche ein neuer Anriss erfolgen. Das führt dazu, dass lokal auftretende, sehr hohe Spannungen abgebaut werden können und letztlich auch bei vergleichsweise hoher Haftung zwischen Fasern und umgebender Keramik eine Rissumlenkung und damit das gewünschte "schadenstolerante" Versagen stattfindet. Dieses Konzept mit einer hohen Porosität ist recht neu und wurde bisher für das kohlenstofffaserverstärkte Siliziumcarbid (C/SiC) noch nicht untersucht. Für ein solches C/SiC-Material wurde nun eine Prozessroute entwickelt (siehe Abbildung 2). Bei dem resultierenden Material muss dann natürlich gezeigt werden, dass das Konzept funktioniert.

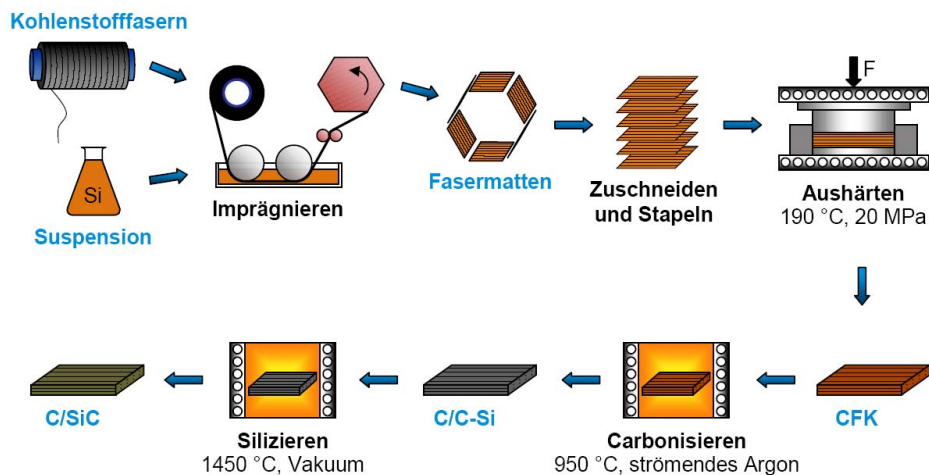


Abbildung 2: Herstellungsrouten "innere Silizierung" für kohlenstofffaserverstärktes Siliziumcarbid mit hoher Porosität.

Zur Herstellung von C/SiC-Bauteilen wird bei dieser Prozessroute zunächst eine Suspension hergestellt. Ein Kunststoff (Phenolharz) wird dafür in einem Alkohol (Isopropanol - nicht zum Trinken!) gelöst, und dann wird sehr feinkörniges Siliziumpulver gleichmäßig in dieser Lösung verteilt. Die Kohlenstofffasern werden mit dieser Suspension imprägniert. Dazu wird ein Faserstrang von einer Garnrolle abgewickelt und über Umlenkrollen durch ein Bad aus der Suspension gezogen. Ein Faserstrang besteht dabei aus 12.000 einzelnen Fasern und diese werden nun einzeln von der Suspension umgeben. Der imprägnierte Faserstrang wird zur Herstellung von plattenförmigen Körpern auf eine sechseckige Trommel aufgewickelt. Diese Trommel ist auf einer Gewindestange montiert, so dass sie sich in Richtung ihrer Längsachse weiterbewegt und der Faserstrang daher immer etwas versetzt, aber leicht überlappend zu liegen kommt. Wenn der Alkohol verdunstet und die imprägnierten Fasermatten auf der Trommel getrocknet sind, können sie auf die gewünschte Größe zugeschnitten werden. Diese Zuschnitte werden dann in einer Pressform gestapelt. Dabei können die Faserlagen in unterschiedlichen Richtungen übereinander gelegt werden, so dass die Fasern entweder alle in einer Richtung liegen oder - was für technische Anwendungen eher von Interesse ist - in mehreren Richtungen in der Ebene.

In einer Presse, durch die sowohl mit Temperatur als auch mit Druck auf die Pressform eingewirkt werden kann, wird das Harz (der Kunststoff) "ausgehärtet" (siehe Abbildung 2, oben rechts). Bei etwa 100°C schmilzt es zunächst auf, so dass es sich durch den aufgebrachten Druck gleichmäßig verteilen kann und die einzelnen Faserlagen gut miteinander verbunden werden. Bei höheren Temperaturen (bis 190°C) finden dann Reaktionen in dem Harz statt, die es zu einem nicht mehr schmelzenden Kunststoff "aushärten" lassen. Es liegt nun eine Verbundkörperplatte aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff vor (CFK, unten rechts). Das ist eine Platte, in der gleichmäßig verteilt die Fasern liegen, und das umgebende Material aus Kunststoff und fein verteiltem Silizium besteht. In den folgenden Temperaturbehandlungen wird dieses Material nach und nach in Siliziumcarbid umgewandelt. Dabei wird zunächst während einer Aufheizung auf 950°C in strömendem Argon (sogenannte "inerte" Bedingungen ohne Sauerstoff, damit der Kohlenstoff nicht verbrennt) das Harz in Kohlenstoff umgewandelt, man sagt "carbonisiert". Die Fasern sind nun von Kohlenstoff (C) und Silizium (Si) umgeben, die gleichmäßig und fein verteilt sind (siehe Abbildung 2: C/C-Si). Im letzten Temperaturbehandlungsschritt (1450°C, Vakuum) reagieren der Kohlenstoff und das Silizium zu Siliziumcarbid (SiC). Durch dieses "Silizieren" knapp oberhalb der Schmelztemperatur von Silizium entsteht das endgültige Material: C/SiC. Andere Geometrien als diese plattenförmigen Körper sind durch die Modifikation der Wickeltechnik ebenfalls denkbar.

Während der Umwandlung des die Fasern umgebenden Materials von einer Mischung aus Harz (Kunststoff) und Silizium zum endgültigen Siliziumcarbid schrumpft es in zwei Schritten. Zum einen bleibt bei der Umwandlung des Harzes in Kohlenstoff nur ein Volumen von etwa 50% des Ausgangsvolumens übrig. Zum

anderen steigt die Dichte des Materials bei der Reaktion zu Siliziumcarbid an, was wiederum zu einer deutlichen Reduktion des Volumens führt. Der gesamte Verbundkörper schrumpft aber nur wenig, da die eingelagerten Fasern sich nicht ändern und die Form des Körpers halten. Dadurch entsteht insgesamt eine vergleichsweise hohe Porosität von über 30 %. Durch die gleichmäßige Verteilung der einzelnen Bestandteile sind auch die Poren gleichmäßig verteilt. Sie sind außerdem sehr klein - sie haben einen Durchmesser von etwa $0,2 \mu\text{m}$, das sind $0,0002 \text{ mm}$. Diese Porengrößen können durch die Quecksilberporosimetrie bestimmt werden. Bei dieser Messmethode wird Quecksilber, das viele Materialien zunächst einmal schlecht benetzt, in die Proben gedrückt. Je höher der aufgebrachte Druck ist, desto kleiner ist der Durchmesser der Pore, in die das Quecksilber gerade gedrückt wird. Und je mehr Quecksilber bei diesem Druck in die Probe eindringt, desto mehr Poren von dieser Größe sind in dem Material enthalten. So kann festgestellt werden, wie groß der Anteil an Poren mit einer bestimmten Größe ist. In unserem Fall haben die Poren alle eine sehr gleichmäßige Größe. Das kann aus dem Diagramm in Abbildung 3 erkannt werden. Die Zahl in Prozent gibt den Volumenanteil des Werkstoffs an (y-Achse), der aus Poren besteht, die größer sind als ein bestimmter Radius (x-Achse). Bei einem Radius von etwa $0,1 \mu\text{m}$ steigt diese Kurve (von großen Radien kommend) sehr stark an. Das bedeutet, dass der größte Anteil an Poren in dieser Größe vorliegen.

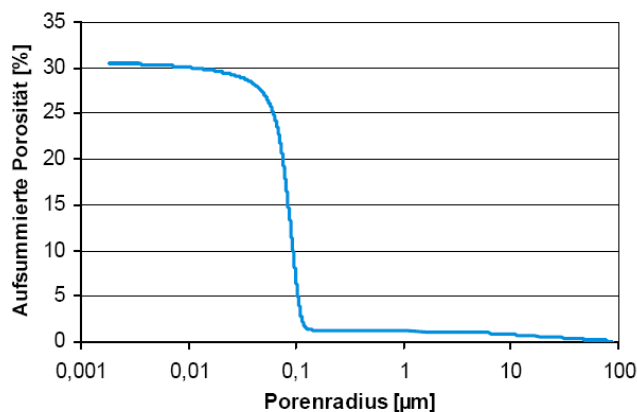


Abbildung 3: Verteilung der Porenradien des entwickelten C/SiC-Werkstoffs gemessen durch Quecksilberporosimetrie.

Diese gleichmäßige Verteilung der Poren und auch ihre geringe Größe sind günstig für die mechanischen Eigenschaften des Materials. Diese können mit Hilfe eines Biegeversuches überprüft werden. Dabei wird eine längliche Probe (etwa $3 \times 10 \times 100 \text{ mm}$) auf zwei sogenannte Auflager gelegt und von oben durch die Bewegung

des 3. Auflagers nach unten durchgebogen (siehe Abbildung 4). Die aufgebrachte Kraft und die Durchbiegung der Probe werden registriert. Die Durchbiegung wird kontinuierlich erhöht, bis die Probe bricht.

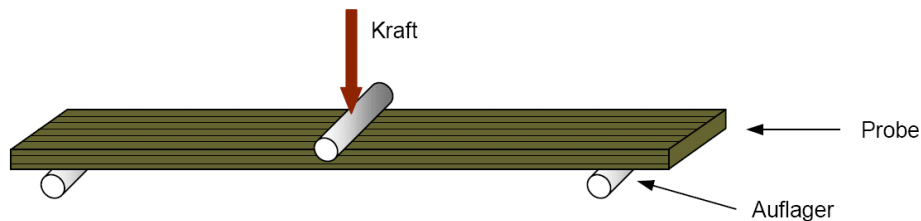


Abbildung 4: Versuchsaufbau Biegeversuch.

In Abbildung 5 ist gezeigt, wie sich das entwickelte C/SiC durchbiegt oder "dehnt" (x-Achse), und welche Kraft oder "Spannung" dazu nötig ist (y-Achse). Die Größen "Spannung" und "Dehnung" entsprechen dabei der aufgebrachten Kraft und der Durchbiegung der Probe, sind aber auf die Probengeometrie normiert. Nach dem Bruch (maximale Spannung) nimmt die Spannung bei weiterer Verformung (oder Dehnung) langsam und nicht schlagartig ab (siehe Abbildung 5). Das zeigt, dass das Versagen schadenstolerant verläuft. Das Ziel der Faserverstärkung konnte erreicht werden!

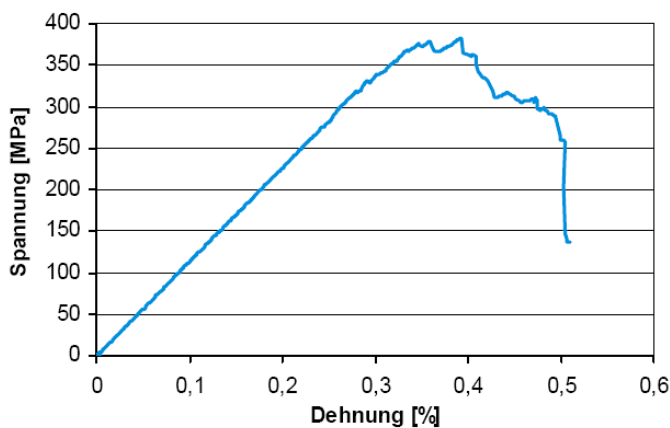


Abbildung 5: Spannungs-Dehnungs-Verlauf bei Belastung des entwickelten C/SiC-Materials im Biegeversuch.

Das Konzept, statt Faserbeschichtungen eine hohe Porosität einzustellen (was preiswerter ist), um ein schadenstolerantes Versagensverhalten zu erreichen, hat also funktioniert. Die Festigkeit des entwickelten Werkstoffs ist nicht ganz so hoch

wie bei den teuren Materialien mit Faserbeschichtungen, die im Bereich der Raumfahrt eingesetzt werden. Es ergeben sich aber neben dem Preis verschiedene Vorteile für einen industriellen Einsatz des Herstellungsverfahrens. So sind eben gerade keine Faserbeschichtungen notwendig, was auch ein komplizierter Schritt der Herstellung ist. Alle Bestandteile werden im ersten Schritt zugegeben und dann innerhalb des fertigen Bauteils umgewandelt, wobei sich die Form des Bauteils nicht mehr ändert. Daher wird dieses Herstellungsverfahren auch "innere Silizierung" genannt. Das Material kann also gleich zu Beginn während und nach der Aushärtung in die gewünschte Form des späteren Bauteils gebracht werden. In dem Zustand als faserverstärkter Kunststoff ist es noch leicht bearbeitbar. Außerdem ist es möglich, die Zusammensetzung des Materials schon am Anfang genau vorzugeben. Damit können die Eigenschaften des resultierenden C/SiC gezielt verändert werden. In anderen Verfahren werden in der Regel nach der ersten Bauteilformgebung von außen weitere Bestandteile in flüssigem Zustand zugegeben (in das Material infiltriert). Dafür darf die Wandstärke der Bauteile nicht zu groß werden und es müssen Porenkanäle bis ins Innere vorhanden sein; sonst dringt die Flüssigkeit nicht gleichmäßig ein. Darauf muss bei dem Verfahren der "inneren Silizierung" nicht geachtet werden.

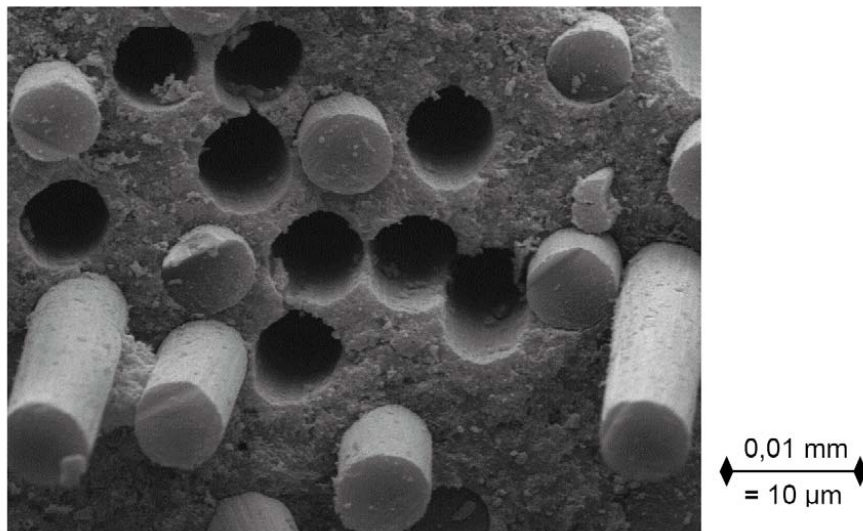


Abbildung 6: Bruchfläche des entwickelten C/SiC-Materials, aufgenommen im Elektronenmikroskop.

Abbildung 6 zeigt eindrucksvoll, dass die gewünschte Rissumlenkung in dem entwickelten C/SiC-Material mit hoher Porosität stattgefunden hat. Eine Bruchfläche wurde hier bei hoher Vergrößerung im Elektronenmikroskop fotografiert. Als glatte Fläche ist das keramische Material zu erkennen (die einzelnen Poren sind nicht

sichtbar), aus der die kreisrunden Kohlenstofffasern (der Durchmesser beträgt 0,007 mm) teilweise herausstehen. Teilweise sind auch Löcher in der Keramik stehen geblieben, aus denen andere Fasern herausgezogen wurden. Die in Abbildung 1 gezeigten Mechanismen haben also tatsächlich stattgefunden, und die Theorie konnte bestätigt werden.

Auf Biegen und Brechen

Robert Spatschek

Freiheit für die Gummibärchen!" fordert Thomas Gottschalk; jetzt hat er die Chance, seinen Worten Taten folgen zu lassen. Es ist Samstag Abend, die Live-Übertragung von "Wetten, dass..?" im vollsten Gange. Fünfhundert Tüten will er in drei Minuten aufreißen, so die Saalwette des Blondschopfs. Spannung liegt in der Luft. Wird er es schaffen? Top, die Wette gilt! Und da, oh weh, schon beim ersten Versuch zert er wie wild an der Tüte, doch die zeigt sich widerspenstig. Ohne die kleine Kerbe in der Verpackung hat er keine Chance — das erklärt die Risstheorie.

Risse sind allgegenwärtig: Kleinste Frakturen auf Nanometerskala lassen einen Werkstoff altern, Erdbebenspalten überziehen auf geologischen Dimensionen die Kontinente.

Risse zerstören nicht nur, sondern können auch wieder "ausheilen", wie die quietschende Kreide an der Tafel demonstriert: Das unangenehme Geräusch entsteht dadurch, dass die Kreide abwechselnd haftet und dann wieder gleitet. Beim Schreiben wandern Gleitzonen entlang der gesamten Kontaktfläche; so bewegt sich die Kreide wie eine Raupe über die Tafel (Abbildung 1). Nach neuesten Erkenntnissen verhalten sich diese Gleitzonen wie Risse, die sich an einem Ende ausbreiten und am anderen wieder verheilen. Reibung wird so zur Bewegung selbstheilender Risse!

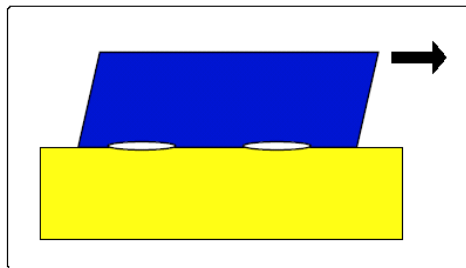
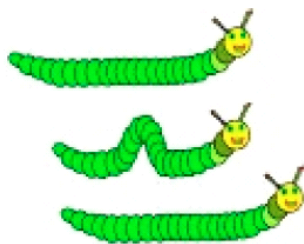


Abbildung 1: Reibung durch Risse: Beim Rutschen eines Körpers auf einer Unterlage bewegen sich "Gleitzonen" wie bei einer Raupe unter dem Körper durch. Diese verzerren ihn wie Risse, die sich in eine Richtung ausbreiten und am anderen Ende "verheilen". An allen anderen Stellen haftet der Körper fest am Grund.

Nicht zuletzt können Risse auch durch ihre Ästhetik beeindrucken: Felix Mendelssohn-Bartholdy war von *Fingal's Cave* auf der schottischen Insel Staffa trotz Seekrankheit so bewegt, dass sie ihn zur Hebriden-Ouvertüre inspirierte: eine regelmäßige Formation meist sechseckiger Basaltsäulen, die während der Erstarrung

der Lava entstanden ist: starke thermische Verspannungen ließen das Gestein aufbrechen. Ein Zufall? Wohl kaum, denn ganz ähnliche Erscheinungen finden sich überall: *Giant's Causeway*, Irland, *Devil's Postpile*, Kalifornien, *Devil's Tower*, Wyoming, ... Und in einer Schale trocknender Stärke-Wasser-Mischung wird im kleinen Maßstab die Geo- zur Küchenphysik (Abbildung 2).



Abbildung 2: Basaltsäulen im *Giant's Causeway* in Irland (links). Der Durchmesser der Säulen, die durch Rissbildung während der Erstarrung entstanden sind, liegt im Meterbereich. Dieselbe Erscheinung findet man in einer austrocknenden Wasser-Stärke-Mischung, hier mit Säulendurchmessern von einigen Millimetern (rechts).

Obwohl Risse ein alltägliches Phänomen darstellen, gelten sie auch heute noch als im wesentlichen unverstanden. Wie kommt es zu so erstaunlichen Anordnungen von Rissen, wenn elastische Verspannungen vorliegen? Wie lässt sich das komplizierte Wechselspiel zahlreicher Risse in selbst einfachsten Szenarien verstehen? Sogar einzelne Risse stellen nach wie vor ein Mysterium dar: Welche Form nehmen sie an? Wann sind sie gerade, wann "gezackt"? Wie schnell können sie sich ausbreiten?

Stress verursacht Pickel — ein Tempolimit für Risse?

Um erklären zu können, wie Risse sich ausbreiten, ist es erforderlich, alle Prozesse, die sich an der Risspitze abspielen, detailliert zu verstehen. Das macht das Unterfangen fast unmöglich, denn in dieser winzigen Zone spielen zahlreiche mikro- und makroskopische Vorgänge eine Rolle: Die elastischen Spannungen werden hier vielfach so groß, dass sich das Material in diesem Bereich plastisch, also dauerhaft verformt. Verunreinigungen und Defekte können in mancher Substanz den Riss zu Umwegen zwingen und ihn dadurch "zackig" werden lassen. In anderen Werkstoffen dagegen läuft er schnurgerade: Zerbricht man einen Silizium-Wafer, so breitet sich der Riss unter Aufbrechen atomarer Bindungen wie ein Reißverschluss immer entlang der Kristallrichtungen aus und denkt nicht im Traum daran, vom rechten Weg

abzukommen. Und nicht zuletzt erhitzt sich das Material um die Spitze so stark, dass es zu schmelzen anfangen kann!

Obwohl es so scheint, als wären es in jedem Einzelfall ganz spezifische Materialeigenschaften, die über die Vorgänge beim Bruch entscheiden, stellt man überraschenderweise doch immer wieder Gemeinsamkeiten fest: Theoretisch würde man in spröden Materialien erwarten, dass sich Risse mit der Schallgeschwindigkeit des festen Stoffes ausbreiten können. Typischerweise also mit mehreren tausend Metern pro Sekunde, und das alles schön geradlinig. Aber die Natur will es anders: Ihre Risse bleiben fast immer langsamer und erreichen nur etwa die Hälfte dieser Grenzgeschwindigkeit. Und wenn sie doch mal schneller werden, ist es vorbei mit der langweiligen Geradlinigkeit: Dann fangen sie nämlich an, sich aufzuspalten; zunächst gibt es nur ein paar kleine Seitenarme, doch je schneller der Riss wird, desto mehr werden es, und desto verzweigter werden sie.

Gerade weil diese Eigentümlichkeiten so universell auftreten, stellt sich die Frage, ob es nicht ganz grundsätzliche gemeinsame Mechanismen für Risse in unterschiedlichen Materialien gibt. Es scheint, als wären viele mikroskopische Details gar nicht so entscheidend für die Rissausbreitung. Ist es eventuell möglich, sie rein makroskopisch zu erklären?

Verblüffenderweise liefert eine neue Theorie, die durch Vereinigung mit einem zunächst gänzlich verschiedenen Effekt entsteht, womöglich die Antwort auf die Frage.

An Oberflächen kann elastische Spannung (engl: *stress*) zu merkwürdigen Erscheinungen führen: Für einen Körper unter Stress ist es viel günstiger, wenn seine Oberfläche rauh wird. Aber nicht, weil sie wie ein Blatt Papier zerknüllt oder wie die Gummibärchentüte aufgerissen wird, sondern weil sich ein Teil des Materials von der Oberfläche ablöst, auf dieser entlangewandert (diffundiert) und sich an anderer Stelle wieder niederschlägt: Stress verursacht Pickel. Nicht zu rauh, wohlgemerkt, denn auf der anderen Seite gibt es eine Oberflächenenergie, die zu glätten versucht – wie den Wasserfilm eines randvollen Glases. Im übrigen ist diese elastische Rauigkeit auch der Grund, warum in der Halbleitertechnik oft nicht ohne weiteres eine Materialschicht auf einer anderen aufgebracht werden kann; die elastischen Verspannungen mögen keine glatten Oberflächen, und darum bilden sich lieber kleine Inselchen (Abbildung 3). Und obwohl fast alle Objekte in unserem Umfeld auf genau diese Weise verspannt sind, bemerken wir normalerweise keine Oberflächenverwerfungen, weil solche Prozesse in der Regel sehr langsam ablaufen; nur in ausgetüftelten Experimenten kann man sie einfach beobachten. Doch dies ist nur die halbe Wahrheit: Wenn diese "Stress-Instabilität" erstmal in Gang gekommen ist, wird sie richtig schnell: dann fressen sich in Sekundenbruchteilen tiefe Kerben in das Material, die zu einem Zusammenbruch der physikalischen Beschreibung führen. Die entstehenden Furchen wachsen sehr bald mit unbeschränkter Geschwindigkeit und werden messerscharf – so etwas bezeichnet man als Singularität. Es war ein lange bestehendes Rätsel, was der Grund für diesen Kollaps ist und was ihn in die Schranken weisen könnte.

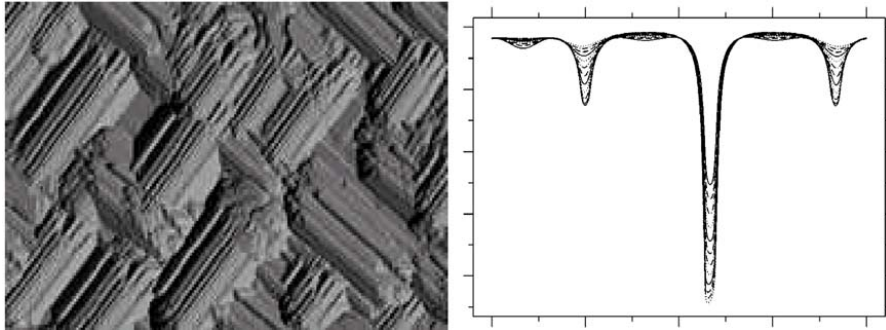


Abbildung 3: Unter Verspannung wird eine zunächst glatte Oberfläche instabil, wie hier bei der Deposition von CoSi_2 auf $\text{Si}(001)$ (links). Im Querschnittsbild der Computersimulation (rechts) gibt es zunächst eine schwache wellenförmige Störung der Oberfläche, dann wachsen tiefe Furchen in das Material hinein, weil Diffusion entlang der Oberfläche stattfindet. In einer konventionellen Beschreibung werden die Furchen nach endlicher Zeit unendlich spitz und schnell — das kann nicht sein!

Doch halt, sieht eine solche Furche nicht fast aus wie ein Riss? In der Tat, die Verspannungen, die sich hier einstellen, sind dieselben wie beim Bruchprozess! Und damit lässt sich auch erklären, warum es die "Singularität" geben muss: Im Rahmen der bisherigen konventionellen Beschreibung gibt es keinen Mechanismus, der Größe und Geschwindigkeit der Spitze kontrolliert, weil die elastischen Verspannungen im gleichen Maße beschleunigen wie die Oberflächenenergie bremst. Damit ist eine gleichförmige Ausbreitung mit wohldefinierter Geschwindigkeit aber unmöglich. Den Schlüssel zur Lösung des Problems liefert die Trägheit des Materials, die die Schallgeschwindigkeit ins Spiel bringt.

Wie kann aber die sonst schneckenlahme Oberflächendiffusion auf einmal doch so effizient sein, dass sie Furchenbildung und Rissausbreitung fast mit Schallgeschwindigkeit erlaubt (Abbildung 4)? Wie ein eifriger Maulwurf gräbt sich der Riss seinen Weg in den Körper. Er muss aber die "Erde" nicht ganz aus seinem Tunnel schaufeln, sondern nur hinter sich werfen. Daher kann es richtig schnell zugehen: In einem Riss muss der "Abraum" nur ein paar atomare Längen weit entsorgt werden. Die neue Theorie liefert darüberhinaus aber noch mehr: Sie erklärt nämlich auch, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit immer deutlich unterhalb der Schallgeschwindigkeit bleibt. Und bei genügend hoher Zugspannung kann sich die Risspitze sogar aufspalten! Denn dieselbe Instabilität, die die Oberfläche wellig macht, kann auch die Spitze zerteilen. Diese Theorie erklärt erstmals in geschlossener Form die grundsätzlichen Aspekte der Rissbildung. Umso erstaunlicher ist es, dass sie aus nur so wenigen Zutaten besteht. Und erweiterbar ist sie natürlich auch, um beispielsweise die "Körnigkeit" oder andere materialspezifische Eigenschaften mit zu berücksichtigen.

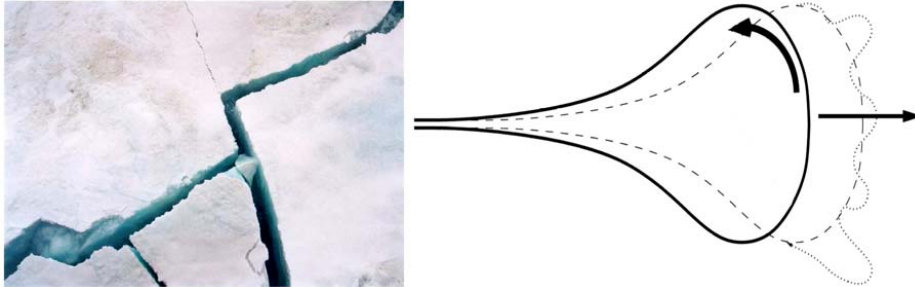


Abbildung 4: Risse sind nur selten gerade, sondern oft gezackt und können sich verzweigen. Eine neue Theorie beschreibt schnelle Rissausbreitung durch Oberflächendiffusion: ein Riss "gräbt" sich seinen Weg in das Material hinein, bleibt dabei deutlich langsamer als der Schall und kann sich sogar aufspalten — und das alles in einer rein makroskopischen Beschreibung!

Von Sprudelflaschen und Erdbeben: Die Großen fressen die Kleinen

So verwickelt das Verhalten eines einzelnen Risses schon sein kann, um so komplizierter wird es, wenn viele Brüche im Spiel sind. Dennoch kann man auch hier durch Analogien zu anderen physikalischen Prozessen viel verstehen, wenn nur einseitige Zugspannungen auftreten (Abbildung 5):

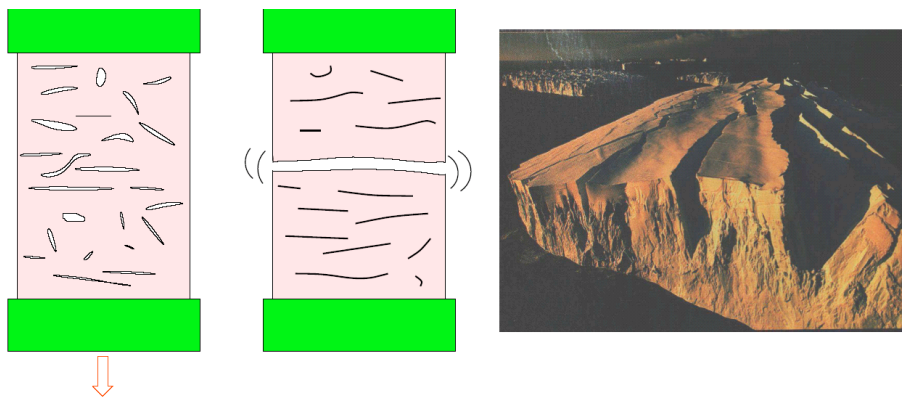


Abbildung 5: Wenn viele Risse zusammenkommen, beeinflussen sie sich gegenseitig. Bei einseitiger Verspannung überleben nur die größten Risse; dann wird das Material kaum noch gedehnt, sondern nur noch gebogen. Eine neue Theorie beschreibt in Analogie zum Gefrieren von Wasser das Wachstum der vielen Risse, das letztlich zum vollständigen Aufbrechen führt (links). So etwas beobachtet man zum Beispiel in der Antarktis (rechts).

So ist die Sprudelflasche aus dem Eisfach ein alter Hut: man braucht sie nur leicht anzuschlagen, und schon gefriert das Wasser. Klar, schließlich ist es kälter als null Grad. Durch den Impuls bilden sich kleine Eiskristalle, die sehr schnell wachsen und schließlich die ganze Flasche ausfüllen. Meist gibt es dabei mehr als nur einen Eiskristall, und während des Einfrierens fangen diese "Keime" irgendwann an, sich zu beeinflussen: dann wachsen die größeren schneller als die kleinen, die sich sogar wieder auflösen können. Ein solches Phänomen, bei dem die Großen die Kleinen fressen, wird Vergrößerung genannt und durch eine sehr allgemeingültige Theorie beschrieben, die genauso für übersättigte Lösungen wie für Metallschmelzen, ja vielleicht sogar für die Sternentwicklung funktioniert.

Ob sie auch für Risse anwendbar ist? Gibt es eine Analogie zwischen ganz vielen Rissen und den Eiskriställchen, wie etwa bei einem Beben, bei dem die Erdkruste nicht nur an einer Stelle aufbricht und sich die Risse auch gegenseitig beeinflussen?

Wenn man an einem Körper zieht, so will er eigentlich entzwei brechen, um seine Spannung abzubauen. Die Zugspannung übernimmt hier dieselbe Rolle wie die Unterkühlung der Sprudelflasche. Gerade in geologischen Formationen können dann zunächst kleine Risse an verschiedenen Stellen entstehen, die sehr rasch wachsen, die Verspannung abbauen und miteinander konkurrieren. Es bilden sich zieharmonikaähnliche Strukturen aus, in denen das Material zwischen den Rissen nicht mehr gedehnt, sondern nur noch gebogen wird – was viel einfacher ist. Da ist es kaum verwunderlich, dass auch hier die großen Risse auf Kosten der kleinen wachsen, die sogar wieder ganz verschwinden können. Nur geht das alles viel schneller als beim Sprudel: Risse beeinflussen einander gegenseitig viel stärker, und darum liefert die neuentwickelte Theorie hier andere Wachstumsgesetze.

Scherben bringen Glück!

Risse sind überall. Ob Rissbildung durch Oberflächendiffusion, mit Brüchen, die sich pfeilschnell und verzweigt durch ein Material ausbreiten können, oder Musterbildung und Materialversagen durch Risse: Überall bieten sich Anknüpfungspunkte an andere Wissenschaftszweige. Das Verständnis der Rissbildung ist ein aufregendes Forschungsgebiet. Eben ein echter Reißer.

Auf frischer Tat ertappt

Wie funktioniert die Einmischung in den Polarwirbel

Ulf Winkler

Am 11. Februar 1997 stieg in Kiruna, Nordschweden, ein Forschungsballon bis in eine Höhe von 24 km auf. Daran befestigt unter anderem ein Instrument des Forschungszentrums Jülich zur Messung von ClO (Chlormonoxid). Weitere Geräte bestimmten den Gehalt an Ozon und diversen anderen Spurengasen. 6 Jahre später, 2003, liegt nun eine Auswertung vor, welche eine ganze Doktorarbeit füllt. Was war an der Messung vom 11. Februar 1997 so besonders? Einiges. Zufällig befand sich am 11. Februar 1997 der Rand des Polarwirbels über Kiruna. Was dieser Wirbel ist und warum sein Rand hochinteressant ist, dazu komme ich weiter unten. Anhand der Vielfalt an Messwerten, welche der Ballonaufstieg lieferte, konnte ein Mechanismus identifiziert werden, welcher Mischprozesse über den Rand ermöglicht. Dieser Mechanismus steht im Zusammenhang mit Wellen-Bewegungen der Luftmassen, welche ausgerechnet am 11. Februar 1997 im untersuchten Bereich angeregt wurden. An diesem Tag gelang somit ein nicht geplanter Volltreffer. Starttermin und -ort standen lange vorher fest.

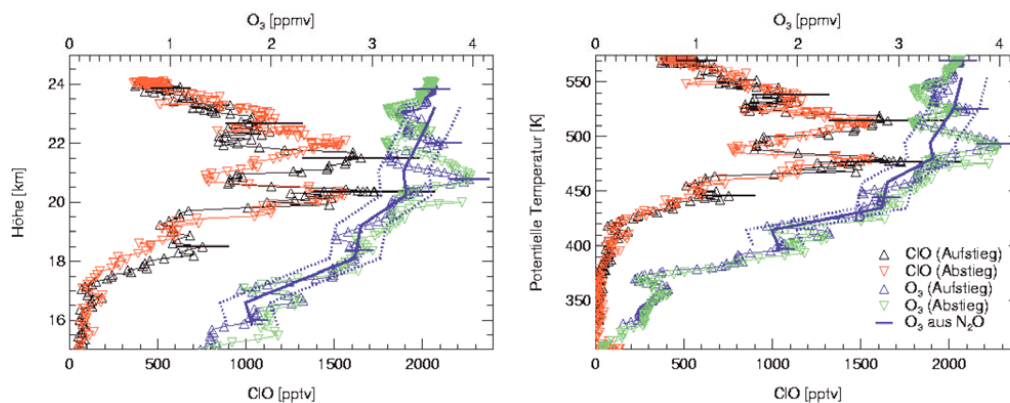


Abbildung 1 a und b: Profile von ClO und O₃, gemessen am 11. Februar 1997 und getrennt nach Auf- und Abstieg. Die Auftragung erfolgte (a) als Funktion der Höhe und (b) als Funktion der Potentiellen Temperatur. Zusätzlich dargestellt (blaue Linie und gestrichelte Fehlergrenzen) sind die Ozon-Erwartungswerte, berechnet aus N₂O.

Schauen wir uns die Messung selbst an (Abbildung 1). Das ClO-Profil hat die Form eines Doppelpeaks. Ozon verhält sich spiegelbildlich dazu. Dort, wo ClO einen Peak aufweist, erreicht Ozon gerade ein Minimum und umgekehrt. Und noch etwas fällt auf: Aufgetragen als Funktion der Höhe (Abbildung 1a), sind die Strukturen, gemessen während des Aufstiegs und des Abstiegs, vertikal zum Teil gegeneinander verschoben. Als Funktion der Potentiellen Temperatur hingegen liegen sie exakt übereinander (Abbildung 1b). Die Potentielle Temperatur wird in der Atmosphärenphysik gern als Höhenkoordinate verwendet. Im Gegensatz zur tatsächlichen Höhe bleibt sie bei adiabatischen Zustandsänderungen (bei welchen die Bewegungen der Luftpakete umkehrbar sind) erhalten. Abbildung 1 verrät uns somit, dass die untersuchten Luftmassen adiabatische Vertikalbewegungen ausführten. Hier noch die exakte Definition der Potentiellen Temperatur: Es handelt sich um die Temperatur, welche ein Luftpaket annehmen würde, wenn man dessen Druck adiabatisch vom aktuellen Wert auf den Standarddruck von 1013 hPa verändert.

Zum weiteren Verständnis ist ein kurzer Exkurs zum Thema Ozon und Polarwirbel notwendig. Ozon (O_3) kommt vor allem in der sogenannten Stratosphäre, zwischen 10 und 50 km Höhe, vor. Es schützt die Erde vor ultravioletter Sonnenstrahlung im Bereich zwischen 200 und 320 nm. Gerade hier, bei 265 nm, befindet sich das Absorptionsmaximum des DNS Moleküls, des Trägermoleküls der Erbanlagen. Aus diesem Grunde ist man besorgt über eine drastische Verminderung der Ozonkonzentration, welche seit den 70er Jahren in jedem Frühjahr über dem Pol der jeweiligen Erdhalbkugel auftritt, das berühmte Ozonloch.

Was verursacht dieses Loch, und warum ist es ein polares Phänomen (und zwingt damit die Stratosphärenforscher, sich im Winter und Frühjahr in unwirtliche Gegenden wie Nordschweden zu begeben)? Ausgangspunkt sind vom Menschen in die Atmosphäre eingebrachte "harmlose" Chlorverbindungen wie FCKW. Unter UV-Einstrahlung entstehen daraus zunächst HCl und $ClONO_2$. Ozon zerstören können aber nur hochreaktive Chlorverbindungen, kurz als Cl_x bezeichnet. Die Umwandlung von HCl und $ClONO_2$ in Cl_x geschieht praktisch ausschließlich an den Oberflächen der Teilchen von Stratosphären-Wolken. Diese wiederum können nur unterhalb der Schwelltemperatur von 195 K oder $-78^\circ C$ existieren. Während der Polarnacht werden diese Bedingungen erreicht. Über dem Pol bildet sich ein gigantisches rotierendes Tiefdruckgebiet aus, der Polarwirbel. Aufgrund des Drehimpulserhalts bleibt die Luft im Wirbel gefangen und ist somit für längere Zeit Dunkelheit und Kälte ausgesetzt. Der Wirbel über der Antarktis ist im Allgemeinen kälter und stabiler als der arktische Wirbel. Das Ozonloch trat deshalb zuerst über der Antarktis auf, und hier erfolgt stets ein stärkerer Ozonabbau als über der Arktis.

Warum ist das Ozonloch nun aber ein Frühjahrs-Phänomen? Solange es noch dunkel ist, schadet auch Cl_x dem Ozon nicht. Die Situation ändert sich aber dramatisch nach Rückkehr des Sonnenlichts. Nun liegt Cl_x überwiegend in Form von ClO vor. ClO ist nun wahrhaftig ein Ozonkiller. Seine Konzentration ist zwar etwa 1000mal geringer als die von Ozon (Abbildung 1). Aber ClO wirkt katalytisch, d.h. es

bleibt während dieses Prozesses erhalten. Ozon (O_3) hingegen reagiert unwiederbringlich zu Sauerstoff (O_2).

Zurück zum 11. Februar 1997. An jenem Tag schien die Sonne über Nordschweden. Wie Abbildung 1 zeigt, entstand entsprechend viel ClO. Und die beiden ClO-Peaks haben offenbar Löcher in das Ozonprofil gefressen. Klarer Fall: ClO ist überführt.

Denkste! ClO hat Entlastungszeugen. Zunächst das Jülicher Modell CLaMS zur Simulation von Chemie und Transport in der Stratosphäre. Im Fall des 11. Februar 1997 ergab eine CLaMS-Rechnung Folgendes: Der Ballon wurde zufälligerweise (wirklich ein Volltreffer, dieser Starttermin) genau an dem Tag gestartet, an welchem sich der Charakter des 1996/97er Polarwirbels radikal änderte. Bis zum 10. Februar 1997 war es ungewöhnlich warm im Wirbel. In den letzten 24 Stunden vor dem Ballonstart fielen dann die Temperaturen erstmals unter die Stratosphärenwolken-Schwelltemperatur (195 K). Die am 11. Februar 1997 beobachtete enorme ClO-Konzentration kann also erst wenige Stunden zuvor entstanden sein.

In der kurzen Zeit konnte ClO nie und nimmer 0,5 ppmv Ozon wegfressen (Abbildung 1). Und noch ein Entlastungszeuge tritt auf, das extrem reaktionsträge Molekül N_2O . Im dunklen Polarwirbel ist Ozon ebenfalls reaktionsträge, und es besteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen den Konzentrationen von N_2O und Ozon, d.h. man kann die eine aus der anderen mittels einer Korrelationsgleichung berechnen (Abbildung 2). Im Polarfrühling ergibt sich aus gemessener N_2O -Konzentration und dieser Korrelationsgleichung die Ozonkonzentration, welche man finden sollte, wenn kein Ozonabbau eingetreten wäre. Wenn man davon die tatsächlich gemessene Ozonkonzentration subtrahiert, erhält man den chemischen Ozonverlust. Das gilt aber nur für Polarwirbel-Luft. Sie darf sich nicht mit Luft aus dem Randbereich oder von außerhalb des Wirbels vermischt haben, für welche die Polarwirbel-Korrelation zwischen N_2O und Ozon nie galt. Abbildung 2 zeigt zum Beispiel, dass in den Wochen vor dem Ballonflug vom 11. Februar 1997, welcher etwa auf 68° nördlicher Breite stattfand, häufig höhere Ozonwerte auftraten als anhand der Korrelation erwartet. Um den chemischen Ozonverlust mittels der Korrelationsmethode genau zu bestimmen, muss man somit über Mischvorgänge Bescheid wissen.

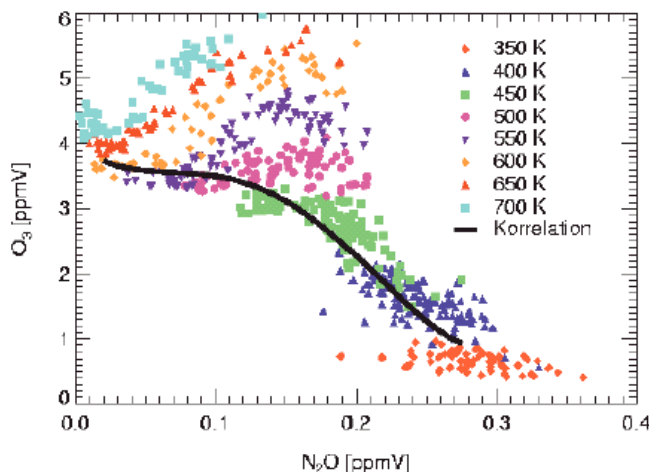


Abbildung 2: O_3 und N_2O , gemessen vom ILAS-Satelliteninstrument vom 28. Januar bis zum 11. Februar 1997 (die letzten zwei Wochen vor dem in dieser Arbeit besprochenen Ballonaufstieg) bei 68°N auf den angegebenen Niveaus potentieller Temperatur (± 5 K). Zusätzlich gezeigt ist die Polarwirbel-Korrelation des Winters 1996/97.

Für alle anderen möglichen Methoden zur Bestimmung des Ozonabbaus gilt diese Einschränkung übrigens ebenfalls. Wie oben bereits erwähnt, besteht die Bedeutung der Messung des 11. Februar 1997 darin, dass auf ihrer Basis Aussagen über das Zustandekommen derartiger Mischvorgänge getroffen werden konnten.

N_2O wurde am 11. Februar 1997 gemessen (durch den Kryosammler BONBON der Johann-Wolfgang-von-Goethe-Universität Frankfurt/Main). Abbildung 1 zeigt die daraus berechneten Ozon-Erwartungswerte. Und siehe da: Dort, wo viel ClO auftritt, entspricht Ozon den Erwartungen. Dort hingegen, wo Einschnitte im ClO-Profil sichtbar sind, findet man zuviel Ozon. Ein klares Indiz gegen chemische Ozonzerstörung und für Mischprozesse.

Gut, also ein Mischprozess als Erklärung für die Ozonstruktur. Und auch für die ClO-Struktur? Denn beide Profile haben ja offensichtlich etwas miteinander zu tun (Abbildung 1). Der Kryosammler BONBON lieferte nicht nur ein Profil von N_2O , sondern auch von Cl_y , dem gesamten für chemische Reaktionen verfügbaren Chlor. Die Cl_y -Konzentrationen an den Positionen der benachbarten ClO-Minima und -Maxima unterscheiden sich kaum. Am fehlenden Cl_y als Ausgangsmaterial zur Bildung von ClO lag es also nicht.

Bleibt die Temperatur. Man vergleiche die Temperaturverläufe, gemessen im Aufstieg und im Abstieg des Ballons (Abbildung 3a). Das sieht doch aus wie eine stehende Welle! Und der Knotenpunkt befindet sich ausgerechnet dort, wo das ClO-

Profil sein Minimum aufweist, während die Bäuche der stehenden Welle mit den ClO-Peaks übereinstimmen. Abbildung 3b zeigt eine Anpassung der gemessenen Temperaturen T_{total} an die Flugzeit t des Ballons sowie an die Höhe z nach der Gleichung

$$T_{\text{total}} = T_s e^{-\beta z} + T_a \cos\left(\frac{2\pi}{\tau} t\right) \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_z} z\right)$$

Es wurde also angenommen, dass die Temperatur zunächst exponentiell von der Höhe abhängt. Dieser Mittelwert ist zusätzlich durch eine Wellenfunktion überlagert. Angenommen wurden eine Temperaturamplitude T_a von 2K, eine vertikale Wellenlänge λ_z von 4 km und eine Periodendauer τ von 2,5 Stunden. Temperaturänderungen mit so einer kurzen Periodendauer konnte unser Simulationsprogramm CLaMS bisher nicht berücksichtigen. Für die Rechnungen, welche das Ergebnis "synoptische Temp." in Abbildung 4 lieferten, wurden Temperaturen des European Centre for Medium Range Weather Forecast (ECMWF) benutzt. Diese besitzen eine Auflösung von 1,125 Längen- bzw. Breitengraden, etwa 1-2 km Höhe und nur 6 Stunden, d.h. mehr als doppelt so lang wie die angenommene Periodendauer τ . CLaMS interpoliert diese sogenannten synoptischen Temperaturen auf jeden Datenpunkt im Modell.

Man kann nun einfach zu den interpolierten synoptischen Temperaturen die doppelten Kosinus-Funktion aus Formel (1) addieren und die CLaMS-Simulation wiederholen. Und das Ergebnis passt geradezu wie die Faust aufs Auge! An den Bäuchen der stehenden Welle durchlaufen die Luftmassen periodisch tiefe Temperaturen, welche eine massive Chloraktivierung ermöglichen.

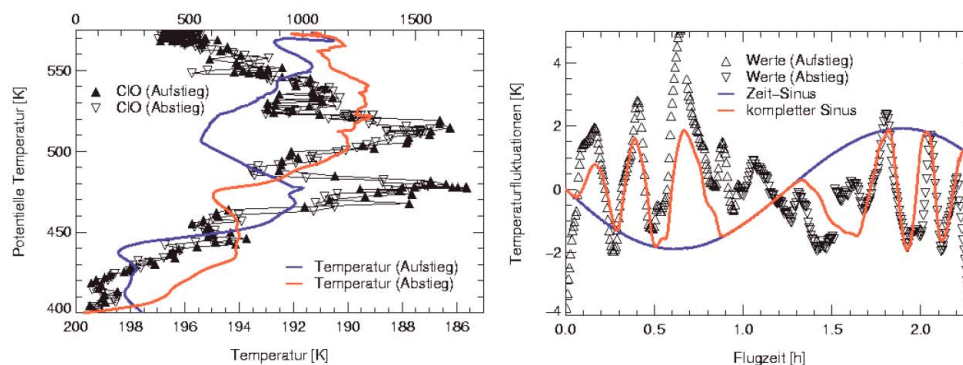


Abbildung 3a (links): ClO- und Temperaturprofile vom 11. Februar 1997. Man beachte die Orientierung der unteren x-Achse (Temperatur-Achse).
Abbildung 3b (rechts): Fluktuationen der Temperatur, gemessen am 11. Februar 1997, und Anpassung nach Gleichung (1) als Funktion der Zeit. "Zeit-Sinus" bezeichnet Gleichung (1) ohne die z-abhängige Kosinus-Funktion.

An den Knoten der Welle hingegen fällt die Chloraktivierung geringer aus. Da die Bäuche und Knoten der stehenden Welle so gut mit dem CIO-Profil übereinstimmen (Abbildung 3a), liefert CLaMS eine schöne Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation. Das Ergebnis hängt dabei kaum von der gewählten Periodendauer τ ab. Fassen wir zusammen: Das CIO-Profil lässt sich erklären, indem man einfach die Temperaturen und sonst nichts modifiziert. Das Ozonprofil hingegen lässt sich nur erklären, wenn man einen Mischvorgang annimmt. Wie hängt beides nun zusammen? Ich schlage folgende Lösung vor: Betrachten wir doch einfach noch einmal Abbildung 1a. Die Luftmassen oberhalb 21 km Höhe haben sich zwischen Aufstieg und Abstieg des Ballons nach oben bewegt. Direkt unterhalb davon wurde ein Zwischenraum frei, in welchen nun Luft seitlich nachströmen musste. Sobald sich die Luftmasse in ihrer periodischen Bewegung wieder nach unten senkt, muss sie die darunterliegende Luft wieder horizontal verdrängen. Die exakte Richtung dieser horizontalen Ausgleichsbewegung ist dabei nicht festgelegt. Somit werden im Zwischenraum zwischen den vertikal schwingenden Luftmassen, d.h. am Knotenpunkt der angenommenen stehenden Welle, Mischprozesse ermöglicht. Und wenn der Prozess, wie eben am 11. Februar 1997, gerade im Randbereich des Polarwirbels stattfindet, kann er entsprechend Mischungen über diesen Wirbelrand bewirken.

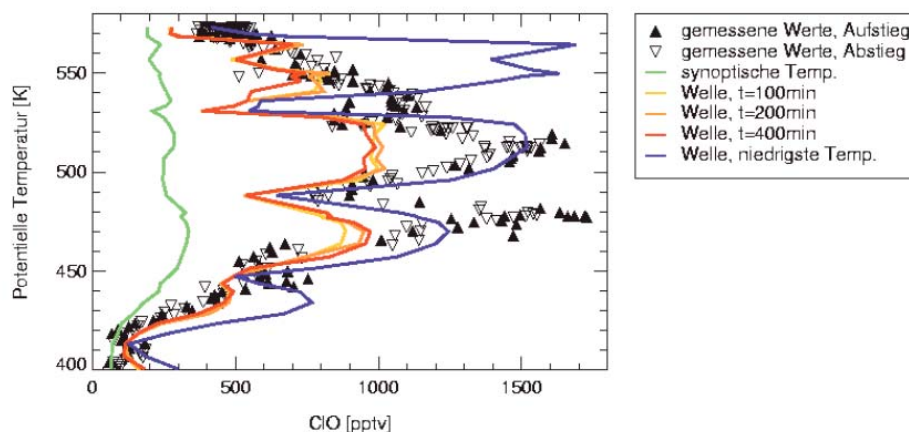


Abbildung 4: CIO-Profil vom 11. Februar 1997 und Ergebnisse von CLaMS-Rechnungen. "Synoptische Temp." bezeichnet die Rechnung auf Basis der ECMWF-Temperaturen, "Welle, $t=xxx\text{min}$ " die Rechnungen mit einer Modulation der Temperatur nach Gleichung (1), für verschiedene Periodendauern, "Welle, niedrigste Temp." Die Modulation nach Gleichung (1) unter Ersetzung der t -abhängigen Kosinus-Funktion durch -1 .

Und was bedeutet das nun? Im Wirbelrandbereich werden häufig Ozonwerte gemessen, welche die Erwartungswerten übersteigen, siehe z. B. Abbildung 2. Mischvorgänge verändern die Zusammensetzung des Polarwirbels und beeinflussen damit die Chemie in seinem Innern. Sowohl für eine exakte Modellierung dieser Chemie als auch für eine genaue Messung des chemischen Ozonverlusts (darauf wurde weiter oben eingegangen) ist eine Quantifizierung der Einmischung von großer Bedeutung. Eine solche Quantifizierung setzt allerdings ein Verständnis dafür voraus, wie die Mischvorgänge überhaupt zustande kommen. Die Ballonmessung vom 11. Februar 1997 lieferte ein starkes Indiz für Wellenvorgänge als Antrieb dieser Mischprozesse. Wann ein Wellenvorgang eintritt und wie stark die angeregten Wellen sein werden, lässt sich anhand meteorologischer Daten vorhersagen. Das Ziel zukünftiger Arbeiten besteht nun darin, aus den Meteorologiedaten direkt auf den Umfang der zu erwartenden Mischprozesse zu schließen. Dank der Messung vom 11. Februar 1997 sind wir auf diesem Weg ein gutes Stück vorangekommen.

Seit dem Jahr 2001 setzen wir unser CIO-Instrument auch auf Höhenforschungsflugzeugen ein. Und damit müssen wir nicht mehr darauf hoffen, dass einmal wieder über Kiruna eine so günstige meteorologische Konstellation eintritt wie am 11. Februar 1997. Mit einem Flugzeug ist man viel flexibler und kann einfach zu den interessanten Bereichen hinfliegen. Aus technischen Gründen fliegt man dabei bevorzugt längere Strecken parallel zur Erdoberfläche. Abbildung 1, Abbildung 3a und die Erörterungen in dieser Arbeit zeigen aber, dass es durchaus notwendig ist, auch vertikale Profile aufzunehmen. Dies muss bei der Flugplanung somit berücksichtigt werden.

2005

**Von seltenen Teilchen,
fedrigen Wolken und
verschlungenen Ketten**

Von seltenen Teilchen, fedrigen Wolken und verschlungenen Ketten

Nadeln im Heuhaufen

Kleinsten Nadeln im Heuhaufen war Peter Winter in seiner Doktorarbeit auf der Spur. Dazu brauchte er ein sehr starkes Mikroskop und ein ebenso gutes Auge, denn die gesuchten Teilchen stammen aus dem subatomaren Bereich. Dies ist die Welt der Protonen, Neutronen und Quarks – den Bausteinen unserer Materie. Doch was genau hält unsere Materie zusammen und wie ist sie in ihrem Innersten aufgebaut? Wie können positiv geladene Protonen in den Kernen auf engstem Raum zusammenbleiben, obwohl sich gleichnamige elektrische Ladungen abstoßen? Dazu ist die starke Kraft nötig – eine der fundamentalen Kräfte neben der Gravitation, dem Elektromagnetismus und der schwachen Kraft. Um die starke Kraft besser zu verstehen, lassen Experimentalphysiker stark wechselwirkende Teilchen, etwa zwei Protonen miteinander reagieren. Dazu nutzen sie den Jülicher Teilchenbeschleuniger COSY (COoler SYnchrotron), in dem Protonen auf etwa 90 Prozent Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden und dann mit anderen Protonen zusammenstoßen. Ähnlich wie ein Elektronenmikroskop die Strukturen eines Objektes sichtbar macht, ist COSY ein Mikroskop zur Visualisierung der starken Wechselwirkung. Bei Kollision entstehen ganz neue kurzlebige Teilchen und eines der Teilchenpaare interessierte den Physiker Winter ganz besonders: das positive und negative Kaon. Sie sind die gesuchten Nadeln im Heuhaufen, denn bei einer Million Kollisionen werden nur etwa zehn Kaonenpaare erzeugt! Das suchende Auge von COSY ist ein Teilchendetektor, mit dem die Teilchen "gewogen" und anschließend anhand ihrer bekannten Masse identifiziert werden können. Aber nicht nur die Anzahl der Nadeln ist wichtig, Peter Winter nahm auch die Erzeugungswahrscheinlichkeit der Kaon-Teilchen unter die Lupe. Dazu musste er die absolute Anzahl aller stattgefundenen Proton-Proton-Stöße bestimmen, also die Größe des Heuhaufens. Nach dieser langwierigen Auswertung stellte Peter Winter fest: Die Datenpunkte der Messungen liegen oberhalb jeglicher theoretischer Erwartungen. Hier sind nun die Theoretiker gefragt: Gibt es zusätzliche Wechselwirkungen zwischen Proton und Kaon oder beiden Kaonen? Erst wenn diese elementaren Wechselwirkungen richtig verstanden sind, können die Physiker auch komplexe Systeme wie Sterne besser begreifen, denn auch hier werden kurzlebige Teilchen erzeugt und spielt die starke Kraft eine wichtige Rolle.

Aus dem Leben einer Cirruswolke

Mit fedrigen – aber gar nicht federleichten – Wolken in eiskalter Atmosphäre beschäftigt sich der Geoökologe Alexander Mangold in seiner Doktorarbeit. Wie

entstehen Cirruswolken und was bestimmt ihr Aussehen und ihre Lebensdauer? Cirruswolken haben einen großen Einfluss auf den Strahlungs- und Wärmehaushalt der Erde. Daher interessierte Wolkenforscher Mangold besonders, ob der Mensch mit seinen Aktivitäten die Häufigkeit und Art dieser Wolkenfamilie beeinflusst – und auf diesem Wege auch das Klima.

Cirruswolken (von lat. cirrus = Feder) entstehen in Höhen von etwa 7 bis 13 Kilometern bei eisigen Bedingungen bis zu minus 80 Grad Celsius. Daher bestehen Cirruswolken nur aus Eiskristallen. Anzahl und Größe dieser Eiskristalle entscheiden darüber, ob die Wolke dünn oder dick erscheint. Cirruswolken unterschiedlicher Dichte wirken abkühlend oder erwärmend auf die Erdoberfläche. Einerseits kann die Strahlung der Sonne von den Eiskristallen reflektiert werden, andererseits gelangt die Wärmestrahlung von der Erdoberfläche durch dichte Wolken nicht ins All, sondern wird von den Eiskristallen zurückgestrahlt.

Alexander Mangold untersuchte das Leben einer Cirruswolke von ihrer Geburt bis zum Tod. Dazu musste er jedoch nicht in eisige Höhen aufsteigen. In einer großen Kammer im Forschungszentrum Karlsruhe können die Wissenschaftler sich ihre eigenen Wolken nachbauen. Ein wichtiger Baustein sind dabei die Aerosole. Dies sind winzige, in der Luft schwebende Teilchen, beispielsweise Schwefelsäuretröpfchen oder Rußpartikel aus Flugzeugabgasen und Brandrodung. Ohne Aerosole entstehen keine Eiskristalle, denn die bilden sich gerne dort, wo bereits ähnliche Strukturen vorkommen.

Alexander Mangold gab verschiedene Aerosolarten in die Eiskammer, unter anderem auch solche, deren Menge vom Menschen beeinflusst wird. Hierzu gehören Rußpartikel, wie sie bei Verbrennungsprozessen entstehen, aber auch Straßen- und Wüstenstaub, der durch ansteigende Wüstenbildung infolge des Klimawandels zunehmen kann. Der Wolkenforscher konnte zeigen, dass Ruß- und Staubpartikel sehr gerne und zu einem hohen Anteil Eiskristalle bilden und die Strahlungseigenschaften der Cirruswolke verändern. Zudem bilden sich die Eiskristalle – und damit die Wolken – bereits bei wärmeren Temperaturen.

Polymere als Entfesselungskünstler

Ob Shampooflasche, Einkaufstüte oder CD – überall begleiten uns in unserem Alltag Polymere. So unterschiedlich die Endprodukte auch sind, eins haben diese langen Moleküle gemeinsam: sie sind in der Schmelze viskoelastisch. Welche mikroskopischen Prozesse sich auf das viskoelastische Verhalten der Polymere auswirken, beispielsweise während ihrer Verarbeitung, ist nicht nur für Grundlagenforscher von großem Interesse. Um das geschmolzene Polymer in die richtige Form zu bringen sind gute Fließeigenschaften wichtig. In der Schmelze verschlaufen sich die langen Polymere umeinander und bilden eine Art elastisches Netzwerk, wodurch sie jedoch in ihren Bewegungen eingeschränkt sind. Der Physiknobelpreisträger Pierre deGennes beschrieb diese räumliche Einschränkung mit Hilfe einer virtuellen Röhre,

in der sich die Polymerkette bewegen kann, allerdings nur entlang ihrer Kontur. Wie eine Schlange kann die Kette jedoch aus der Röhre heraus kriechen ("Reptation"). Die Verschlaufungen lösen sich und das Polymer beginnt zu fließen. In ihrer Doktorarbeit untersuchte Michaela Zamponi diesen Prozess auf molekularer Ebene. Dafür benutzte sie die Neutronen-Spin-echo-Spektroskopie, bei der Neutronen tief ins Material eindringen können und an den Atomkernen des Polymers gestreut werden. Das Streumuster liefert Rückschlüsse auf die Struktur der Probe, die Geschwindigkeitsänderung der Neutronen verrät den Wissenschaftlern etwas über die Bewegungsprozesse der Polymerketten. Zudem werden unterschiedliche Isotope eines Elements unterschiedlich stark gestreut, so dass die Ketten mit schwerem Wasserstoff markiert werden können. So fand Michaela Zamponi heraus, dass sich lange lineare Polymere so bewegen, wie von deGennes vorhergesagt. Mit abnehmender Kettenlänge konnten die Polymere sich jedoch freier bewegen, obwohl sie immer noch lang genug waren, um sich umeinander zu verhaken. Es muss also Prozesse geben, welche die Bewegungsbeschränkung durch die Röhre aufheben. Mit gezielter Markierung der Polymere konnte die Physikerin zeigen, dass sich die Kettenenden in die Röhre zurückziehen können. Die dann leeren Röhrenstücke an den Enden werden sozusagen vergessen, so dass sich die Kettenenden anschließend in eine beliebige Richtung weiterbewegen können. Dies führt mit der Zeit ebenso zu einer immer größeren Freiheit der Kette, wie auch die Auflösung der Röhre selbst, deren Elemente – benachbarte Polymere – sich ebenfalls fortbewegen und somit die Röhre auflösen können.

Die Nadeln im Heuhaufen

Peter Winter

Was hält eigentlich unsere Materie zusammen und wie ist sie aufgebaut? Eine der fundamentalen Fragen, die bis heute noch nicht vollkommen beantwortet sind, erfordert immer aufwendigere Techniken, um Antworten zu finden. Isaac Newton konnte noch durch die Beobachtung des fallenden Apfels auf das Gravitationsgesetz schließen und benötigte neben wenigen Hilfsmitteln nur sein menschliches Auge. Später bediente man sich optischer Hilfsmittel wie dem Mikroskop, um Strukturen von der Größe einer einzelnen Zelle sichtbar zu machen. Die Bausteine unserer Materie wie Protonen, Neutronen und Quarks sind jedoch so klein, daß man ein noch hochauflösenderes Mikroskop benötigt, um ihrer Natur auf die Spur zu kommen. Und genau dies passiert in modernen Teilchenbeschleunigern, mit denen sich Wissenschaftler die Materie auf subatomarer Ebene "anschauen" können, um etwas über ihren Aufbau zu lernen.

Ein solcher Beschleuniger, das **CO**oler **SY**nchrotron COSY, steht im Forschungszentrum Jülich und ermöglicht diese Einblicke in die Materie. Ziel dabei ist die Untersuchung der bis heute nur wenig verstandenen starken Kraft. Durch den Zusammenprall zweier Teilchen kann die im Stoß freigesetzte Energie gemäß Einsteins berühmter Gleichung $E=mc^2$ in Masse umgewandelt werden. Eine Vielzahl neuer, kurzlebiger Teilchen entsteht. Meist interessiert den Wissenschaftler dabei nur ein bestimmtes Teilchen und konkret seine Erzeugungswahrscheinlichkeit. Nehmen wir beispielsweise den Zusammenstoß zweier Protonen und gehen davon aus, dass wir 1 Million davon beobachtet hätten. Aus Messungen weiß man, dass in etwa 50% der Fälle nichts passiert, außer einer gegenseitigen Ablenkung der beiden Protonen. In den restlichen Fällen entstehen zusätzliche Teilchen. So stellt man fest, dass bei 1 Million Kollisionen ungefähr 5.000 Mal zusätzlich ein sogenanntes Eta-Meson entsteht. Sofern die freiwerdende Energie ausreicht, können auch Paare von neuen Teilchen erzeugt werden. Beispielsweise ein positives und negatives Kaon, die man mit K^+ und K^- abkürzend beschreibt. Warum ein Interesse besteht, diesen Reaktionskanal zu untersuchen, werden wir am Ende verstehen. Nur soviel schon jetzt: In 1.000.000 Kollisionen werden nur etwa zehn Kaonenpaare erzeugt! Der Wissenschaftler muss also schon sehr genau "hinschauen", um in der Unmenge möglicher Reaktionen genau diese K^+K^- Paare zu finden. Er braucht ein sehr starkes Mikroskop und ein ebenso gutes Auge, um der Aufgabe gerecht zu werden. Begeben wir uns also auf die Suche nach den Nadeln im Heuhaufen!

1. COSY – ein starkes Mikroskop

Wie viele fundamentale Kräfte kennen Sie? Wahrscheinlich fallen Ihnen spontan zwei ein, nämlich die allgegenwärtige Gravitation, ohne die das Leben auf der Erde recht schwierig wäre und der Elektromagnetismus, der unser heutiges Technologiezeitalter wohl maßgeblich beeinflusst. Vielleicht haben Sie auch über die noch fehlenden beiden, die schwache und die starke Kraft, gelesen oder gehört. Sie sind uns im Alltag allerdings nicht so vertraut wie die beiden erstgenannten Wechselwirkungen. Und doch sind sie für den Aufbau der Materie und die Entstehung des Universums von elementarer Bedeutung. Wie sonst könnten die positiv geladenen Protonen in den Kernen auf engstem Raum zusammenbleiben, wenn nicht die starke Kraft sie zusammenhielte? Schließlich stoßen sich gleichnamige elektrische Ladungen ab. Aber wie genau die Quarks sich in Dreiergruppen zusammenschließen, um Protonen und Neutronen zu formen und sich diese dann zu Kernen verbinden, ist bis heute noch nicht vollkommen verstanden. Niemand konnte bisher ein freies Quark beobachten. Es gibt sie nur im Dreierpack oder als Quark-Antiquark-Paar, das man mit Meson bezeichnet und zu denen auch das Kaon gehört.

Um die starke Kraft nun besser zu verstehen, bedarf es der Beobachtung zweier stark wechselwirkender Teilchen, wie etwa zweier Protonen, die miteinander reagieren. Die Aufgabe des Experimentalphysikers besteht darin zu "sehen", welche Teilchen mit welcher Wahrscheinlichkeit in der Kollision erzeugt werden. Und genau dafür eignet sich das in Abbildung 1 gezeigte COSY, in dem Protonen auf etwa 90% der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden und dann mit anderen Protonen kollidieren.

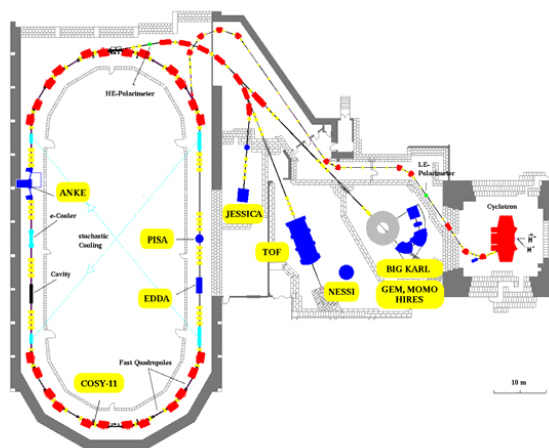


Abbildung 1: Das Cooler Synchrotron COSY mit dem Zyklotron zur Injektion, dem eigentlichen Synchrotron links und den verschiedenen Experimentplätzen.

Die Funktionsweise ist vergleichbar mit einem Elektronenmikroskop, in dem ein Elektronenstrahl die Strukturen des zu untersuchenden Objektes sichtbar macht. Und COSY ist anschaulich nichts anderes als ein Mikroskop für die Visualisierung der starken Wechselwirkung. Es eignet sich dafür besonders gut, weil sein Strahl gekühlt wird, woher sich auch der erste Teil des Namens Cooler Synchrotron ableitet. Aber dazu gleich mehr. Die Bezeichnung Synchrotron bezieht sich auf die Konzeption des Beschleunigers, ist aber hier von keiner besonderen Bedeutung. Was geschieht aber genau in der Anlage, bevor der Experimentator seine Messungen durchführen kann? Aus einer Ionenquelle stammend werden die Protonen im Zyklotron vorbeschleunigt und anschließend in das eigentliche Synchrotron eingeschossen, um dort auf die gewünschte kinetische Endenergie gebracht zu werden. Wie die Moleküle in einer Tasse Tee sind aber auch die Strahlprotonen noch "heiß". Das bedeutet, dass sie senkrecht zu ihrer Flugrichtung hin- und herschlingern, ähnlich wie ein Diskus im Flug um die eigentliche Wurfrichtung hin- und herflattert. Um diese unerwünschten Seitwärtsbewegungen zu eliminieren, wird der Strahl durch aufwendige Techniken gekühlt. Anschaulich bekommen die Teilchen mit leicht falscher Flugrichtung einen kleinen "Fußtritt" in Form eines elektrischen Signals, so dass sie anschließend in die gewünschte Richtung fliegen. Die störenden Bewegungen senkrecht zur Flugrichtung werden deutlich geschwächt und die Strahlteilchen besitzen anschließend nahezu gleiche Geschwindigkeit und Flugrichtung. Ideale Voraussetzungen für die folgenden hochpräzisen Messungen. Was noch fehlt ist eine Art menschliches Auge für die Reaktionsprodukte. Denn was nützt das beste Mikroskop, wenn keiner hineinschaut?

2. COSY-11 – ein gutes Auge

Wir haben nun also einen Protonenstrahl im Beschleuniger, der immer und immer wieder durch den Ring fliegt. Das Mikroskop ist angeschaltet und wir sind bereit für die Kollision mit dem Zielobjekt. Zunächst brauchen wir also ein Target gefüllt mit Protonen. Am internen Experimentaufbau COSY-11, der sich in einer Kurvensektion des Beschleunigers befindet, benutzt man als Target kleine Kügelchen, sogenannte Cluster aus Protonen, die durch den Strahl hindurchfallen. Durch schnelles Abkühlen des Wasserstoffgases nahe dem absoluten Nullpunkt gefriert das Gas zu kleinen Tröpfchen mit bis zu 10^6 Atomen. Die etwa 10^{11} Protonen im Strahl haben nun genügend Kollisionspartner, wenn sie auf ein solches Gaskügelchen treffen, so dass pro Sekunde Tausende von Reaktionen stattfinden. Der Heuhaufen ist groß genug, aber noch haben wir kein Auge, um die Nadeln darin zu finden.

Hier kommt das eigentliche Handwerkszeug des Experimentators ins Spiel, nämlich ein Teilchendetektor wie beispielsweise der in Abbildung 2 gezeigte namens COSY-11. Er ist das Auge, mit dem der Physiker die vielen Teilchen sehen und identifizieren kann. Aber wie genau geht dies vor sich? Zunächst einmal ist es wichtig zu wissen, dass wir als Ziel haben werden, die Teilchen anhand ihrer bekannten Masse zu identifizieren. Wenn wir also ein Teilchen "gewogen" haben, können wir feststellen,

was es war. Entscheidend ist nun, dass uns Einstein das passende Handwerkszeug mit auf den Weg gegeben hat, um die Teilchen richtig zu wiegen. Denn aus der Relativitätstheorie folgt eine Gleichung, nach der sich unter Kenntnis des Impulses p und der Geschwindigkeit v die Masse m eines Teilchens berechnen lässt. Halten wir also fest: Für das Wiegen benötigt man die beiden Größen Impuls und Geschwindigkeit. Und genau darauf basiert das Nachweisprinzip des Detektors COSY-11.

Schaut man sich den Detektor in der Abbildung 2 an, so sieht man, dass das erwähnte Cluster-Target vor einem Dipolmagneten montiert ist. Dieser dient eigentlich dazu, den Protonenstrahl um die Kurve zu leiten. Denn ein geladenes Teilchen, das durch ein Magnetfeld fliegt, wird senkrecht zu seiner Flugrichtung abgelenkt. Es wirkt die sogenannte Lorentzkraft und oft kennt man das Phänomen noch durch die Rechte-Hand-Regel aus dem Physikunterricht.

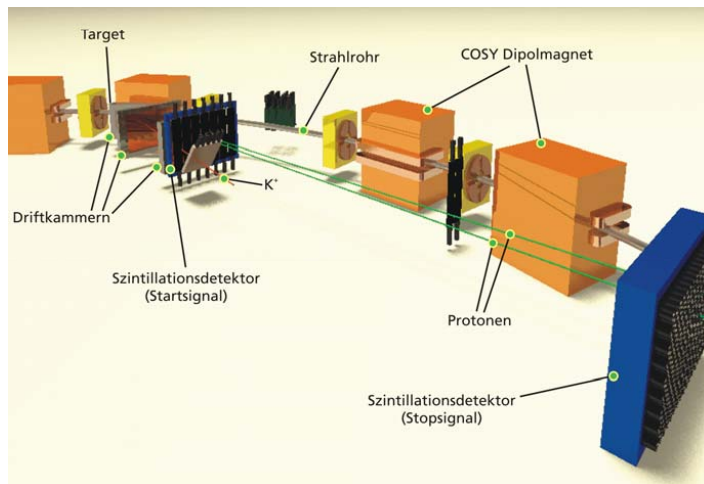


Abbildung 2: Das interne Experiment COSY-11 in einer schematischen Ansicht mit den wichtigsten Komponenten, die im folgenden Text von Bedeutung sein werden.

Kollidiert nun ein Proton des Strahles mit einem im Target, so kann es wie erwähnt manchmal dazu kommen, dass durch die im Stoß freiwerdende Energie ein K^+K^- Paar erzeugt wird. Abkürzend schreibt man eine solche Reaktion mit $pp \rightarrow ppK^+K^-$. Das heißt, nach der Kollision haben wir zwei Protonen und zwei Kaonen, die alle in etwa in Richtung des Strahles weiterfliegen und dann in das Magnetfeld des Dipols kommen, so wie in Abbildung 3 schematisch dargestellt. Nun ist aber die Ablenkung eines geladenen Teilchens im Dipolmagneten abhängig von seinem Impuls. Da die 4 Reaktionsprodukte im Vergleich zum Strahl einen geringeren Impuls besitzen, werden die drei positiven Teilchen stärker ins Ringinnere abgelenkt und erreichen so den eigentlichen Detektor. Das zur Außenseite abgelenkte negative K^- wird nicht nachgewiesen. Sie werden noch sehen, dass wir auf seinen Nachweis getrost

verzichten können. In Abbildung 3 erkennen Sie, dass die Protonen und das K^+ zunächst mehrere Driftkammern passieren. In ihnen ist in mehreren Ebenen eine große Anzahl von Drähten gespannt, die sich in einem elektrischen Feld befinden. Durchquert ein geladenes Teilchen die mit einem speziellen Gas gefüllte Kammer, entstehen durch Ionisation freie Elektronen. Unter dem Einfluss des elektrischen Feldes wandern (driften) sie zum nächstgelegenen Draht und erzeugen dort ein elektrisches Signal. Aus der Information über die Orte derjenigen Drähte, an denen ein solches Signal erzeugt wurde, lässt sich dann in der späteren Auswertung sehr präzise die Flugrichtung des Teilchens ermitteln. Ferner wissen wir, dass das Teilchen vom Targetort stammen muss. Dadurch haben wir eine Ortsinformation vor seinem Eintritt in den Dipolmagneten und eine nach dem Verlassen desselben. Damit ist es möglich, die Krümmung der Spur im Dipolmagneten zu berechnen. Jetzt ist der erste Schritt unserer Aufgabe fast getan, denn die Spurkrümmung im Magnetfeld ist über eine einfache Beziehung mit dem Teilchenimpuls verknüpft. Die Driftkammerinformationen liefern somit den Impuls des Teilchens.

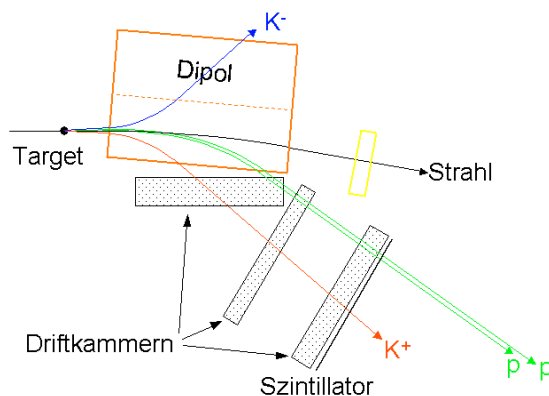


Abbildung 3: Aufsicht des Experimentes COSY-11 für ein Ereignis $pp \rightarrow ppK^+K^-$.

Was noch fehlt ist die Geschwindigkeit, die man bekannterweise aus der für eine bestimmte Flugstrecke benötigten Flugzeit errechnet. Deshalb durchqueren die positiv geladenen Reaktionsprodukte nach den Driftkammern einen Szintillationsdetektor. Dieses durchsichtige Plastikmaterial besitzt die Eigenschaft, dass ein geladenes Teilchen beim Durchqueren in ihm Licht erzeugt, welches anschließend in Photomultipliern in ein elektrisches Signal umgewandelt wird. Dieser elektrische Impuls wird genutzt, um eine Zeitmessung zu starten. In einer Entfernung von etwa 10 Metern befindet sich ein weiterer Szintillator, der das Stoppsignal für die Zeitmessung auslöst. Aus der Zeitdifferenz und dem zurückgelegten Weg erhält man die Fluggeschwindigkeit. Mit der bereits oben erwähnten Beziehung kann nun aus Impuls und Geschwindigkeit eines Teilchens dessen Masse errechnet werden.

Geschafft! Wir haben das unbekannte Teilchen gewogen und können es nun identifizieren – also sagen, von welcher Sorte es war.

Das war es also, könnten Sie an dieser Stelle vermuten. Jetzt nehmen wir alle Ereignisse, bei denen wir zwei Teilchen mit der Masse eines Protons und eines mit der Masse eines Kaons nachweisen. Aber alleine bis hierher ist der Weg der Analyse oft sehr viel langwieriger, als es diese kurze Beschreibung errahnen lässt. Zu Beginn steht zunächst die Eichung aller Detektorkomponenten. Denn durch unterschiedliche Laufzeiten der elektrischen Signale in den Kabeln müssen die verschiedenen Zeitsignale zueinander geeicht werden. Zusätzlich muss zugleich immer geprüft werden, ob alle Detektorkomponenten einwandfrei funktioniert haben. Das erfordert die Auswertung zahlreicher Spektren und unterschiedlichste Kontrollen. Aber selbst wenn alle diese Vorarbeiten ausgeführt sind und die Ereignisse, bei denen 2 Protonen und ein K^+ entstanden sind, herausgefiltert wurden – also die Nadeln im Heuhaufen gefunden wurden – ist die Arbeit noch lange nicht beendet.

3. Kaonenproduktion – nicht nur die Anzahl der Nadeln ist wichtig

Erinnern wir uns an den zu untersuchenden Reaktionskanal $pp \rightarrow ppK^+K^-$, so haben wir bisher erst drei der vier entstandenen Teilchen identifiziert. Bleibt das negative Kaon übrig, das im Detektor nicht direkt "gewogen" wird. Aber hier hilft uns ein wichtiges Grundprinzip der Natur, nämlich das der Energie- und Impulserhaltung. Da wir beide Größen vor der Kollision aus den Einstellungen des Beschleunigers kennen, brauchen wir von ihnen nur die Energien und Impulse der drei positiv geladenen Teilchen abzuziehen und erhalten so die fehlenden Werte für das nicht nachgewiesene Teilchen. Und daraus erhält man seine Masse, womit wir es wieder identifizieren können. Ein direkter Nachweis des K^- ist nicht nötig!

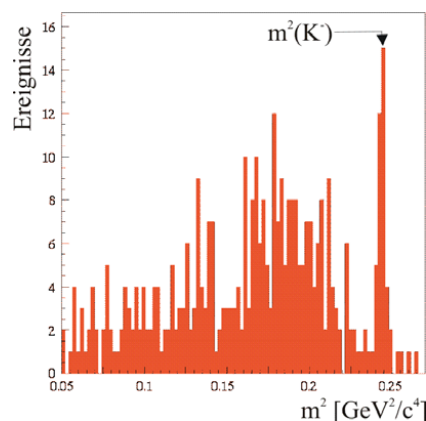


Abbildung 4: Häufigkeitsverteilung der quadrierten Masse des nicht nachgewiesenen Teilchens für alle Ereignisse mit 2 Protonen und einem K^+ .

Für alle Ereignisse mit 2 Protonen und einem K^+ zeigt Abbildung 4 die Häufigkeitsverteilung der für jedes Ereignis berechneten quadrierten fehlenden Masse m^2 . Der eingezeichnete Pfeil markiert die Masse des K^- und genau hier ragt ein deutlicher Peak aus dem Spektrum hervor. Die breite Verteilung zu niedrigeren Massen mit dem Maximum bei etwa $m^2=0.18 \text{ GeV}^2/c^4$ rührt von Reaktionen her, die ähnliche Signaturen wie der Kanal $pp \rightarrow ppK^+K^-$ aufweisen. Weil bei ihnen die fehlende Masse aber meist nicht der eines Kaons entspricht, sind sie über das gesamte Spektrum weit verstreut. Da wir aber die Anzahl der K^+K^- Paare brauchen, müssen diese Untergrundreaktionen subtrahiert werden. Eine nicht immer triviale Aufgabe. Im hier vorgestellten Beispiel ist jedoch das Kaonensignal um den Bereich des eingezeichneten Pfeils nahezu untergrundfrei. Die abschließende Auswertung liefert knapp 30 Ereignisse mit einem K^+K^- Paar. Die Suche nach den Nadeln und ihrer Häufigkeit ist beendet.

Leider ist damit das Ende noch nicht erreicht. Die eigentlich interessante Größe ist die zu Beginn erwähnte relative Wahrscheinlichkeit der untersuchten Stoßereignisse in Relation zur Gesamtzahl aller Kollisionen. Um sie angeben zu können, brauchen wir also auch die absolute Anzahl aller stattgefundenen Stöße, also die Größe des Heuhaufens. Außerdem müssen wir genau wissen, ob wir auch wirklich alle erzeugten Kaonenpaare im Detektor messen.

Ein einfaches Beispiel verdeutlicht den Sachverhalt: Angenommen wir wollten den Prozentsatz roter Autos am Gesamtmarkt bestimmen und stellen uns dazu an eine vielbefahrene Straße. Nach einer Stunde haben wir 300 rote Autos gezählt. Gleichzeitig waren wir so schlau, die 200 schwarzen Autos mitzuzählen, weil wir ihren Marktanteil von 20% kennen. Mit einem einfachen Dreisatz können wir auf 30% Marktanteil roter Autos schließen. Falls wir aber nun eine Rot-Grün-Schwäche hätten, würden wir vielleicht jedes dritte rote Auto als ein grünes interpretieren. Wir würden dann nur 200 rote Autos notieren und auf einen falschen Marktanteil von 20% schließen. Erst durch Korrektur der bekannten Verlustrate beim Zählen erhalten wir wieder das richtige Ergebnis von 30%!

Für unser Experiment verhält es sich ähnlich: Den schwarzen Autos entsprechend messen wir stets parallel eine Referenzreaktion. So wie der Marktanteil schwarzer Wagen gegeben war, sind für sie alle wichtigen Größen aus früheren Messungen bekannt, so dass man mit ihrer Hilfe die absolute Anzahl aller Proton-Proton-Stöße ermitteln kann. In Analogie zur Rot-Grün-Schwäche gibt es auch an jedem Detektor mehr oder weniger große Detektionsverluste durch beispielsweise eine nicht hundertprozentige Ansprechwahrscheinlichkeit des Detektors oder durch Teilchenflugbahnen außerhalb des Detektors. Mit aufwendigen Computersimulationen ist es jedoch möglich, die Höhe dieser Verluste im Detektor zu bestimmen. Dies geschieht bei jedem Nachweisexperiment und ist wichtiger Bestandteil der gesamten Auswertung.

Jetzt können wir uns erst einmal entspannt zurücklehnen. Eine vielfältige und langwierige Auswertung liegt hinter uns. Nun ist der Experimentalphysiker bereit, die

K^+K^- Erzeugungswahrscheinlichkeit anzugeben. In der Sprache der Physik heißt die entsprechende Größe totaler Wirkungsquerschnitt σ und für die besprochene Reaktion sind die verfügbaren Messungen in Abbildung 5 durch die verschiedenen Symbole angegeben, wobei die blauen Dreiecke der hier vorgestellten vorgestellten Analyse entsprechen. Die x-Koordinate gibt die im System überschüssige Energie Q an. Bei $Q=0$ reicht die im Stoß freiwerdende Energie gerade aus, um die beiden Kaonen zu produzieren.

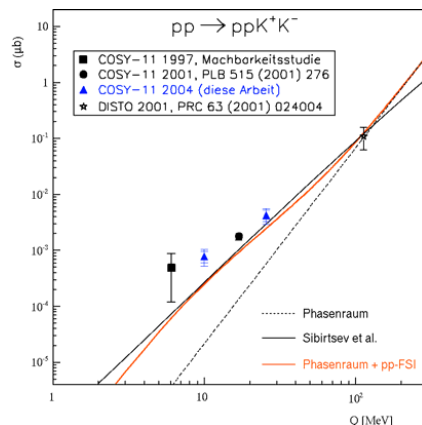


Abbildung 5: Totaler Wirkungsquerschnitt für die Reaktion $pp \rightarrow ppK^+K^-$.

Im Vergleich dazu sind drei theoretische Vorhersagen eingezeichnet. Während die gestrichelte Linie die einfachste denkbare Physik enthält, ist die durchgezogene schwarze Linie eine Modellberechnung der Jülicher Theoriegruppe. Die rote Linie beschreibt die Berücksichtigung einer Wechselwirkung, von der wir wissen, dass sie zwischen den beiden Protonen wirkt. Sie wird im Englischen mit Final-State-Interaction (kurz FSI) bezeichnet. Ohne auf die Details der Rechnungen einzugehen: Die neuen Messungen verstärken den jetzt deutlichen Trend der Datenpunkte oberhalb jeglicher theoretischer Erwartungen zu liegen. Es ist nun an der Theorie, hierfür eine plausible Erklärung zu liefern. Ideen liegen zwar schon vor, jedoch werden erst die Rechnungen zeigen, inwieweit die Daten zukünftig beschrieben werden können. Und damit erkennt man, dass die Messung eines Reaktionskanals, wie dem hier vorgestellten, hilfreich ist, die Wechselwirkungen verschiedener Teilchen zu studieren. In unserem Fall ist zu vermuten, dass wir zusätzliche Wechselwirkungen zwischen dem Proton und dem Kaon oder beiden Kaonen in der Theorie benötigen. Denn erst wenn diese elementaren Wechselwirkungen richtig verstanden sind, wird man in der Lage sein, auch viel komplexere Systeme wie beispielsweise Sterne richtig zu verstehen, in denen auch die starke Kraft und die Erzeugung kurzlebiger Teilchen eine Rolle spielen.

Eisigkalt, federleicht und schleierhaft: aus dem Leben einer Cirruswolke

Alexander Mangold

Wolken sehen wir tagtäglich am Himmel. Gerne bewundern wir mit zurückgelehntem Kopf ihre ästhetische Vielfalt und verfolgen den ständigen Wechsel ihres Aussehens. Man könnte meinen, am Himmel läuft ein spannender Spielfilm. Wolkenforscher benennen die Wolken entsprechend ihrem Aussehen und teilen sie in Familien, Gattungen und Arten ein. In meiner Doktorarbeit habe ich mich mit der Familie der Cirruswolken befasst. Wie entstehen sie und was sind die Faktoren, die ihr Aussehen und ihre Lebensdauer bestimmen?

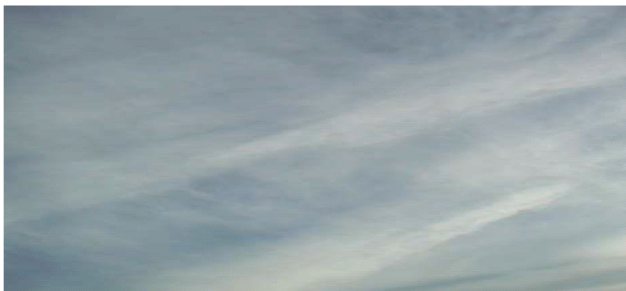


Abbildung 1: Typisches Beispiel für Cirruswolken; Quelle: <http://www.contrails.nl>

Die Bezeichnung "Cirrus" leitet sich aus dem lateinischen Namen für Feder ab. Ihr feines, weißes, oftmals zerfranstes Aussehen dürfte der Grund für diesen Namen sein. Cirruswolken bilden sich in den obersten Stockwerken der Troposphäre (das ist der untere Teil der Erdatmosphäre, in dem sich das Wettergeschehen abspielt). Diese obersten Stockwerke befinden sich in unseren geographischen Breiten in Höhen von etwa 7 bis 13 km. Dort herrschen eisige Bedingungen: Die Temperatur beträgt nur noch -25 °C bis hin zu grimmigen -80 °C. Daher bestehen Cirruswolken nur aus Eiskristallen. Wegen diesen geringen Temperaturen ist der Wassergehalt der Luft dort auch sehr gering. Er beträgt nur noch bis zu $\frac{1}{1000}$ des üblichen Wassergehalts nahe der Erdoberfläche. Die Eiswolken erscheinen dem Beobachter daher viel luftiger und weniger kompakt als die tieferen Wolken. Es scheint sich nur ein leichter Schleier vor die Sonne gelegt zu haben (daher auch der landläufige Name Schleierwolke).

Das Wettergeschehen und damit auch die Wolken werden schon lange erforscht und wir sollten annehmen können, dass die Physik der Wolkenbildung sehr gut verstanden ist. Dies trifft für die tieferen Wolken, die aus flüssigen Tröpfchen bestehen, auch zu – jedoch nicht für Cirruswolken. Doch warum ist es wichtig, auch

den Prozess der Bildung von Cirruswolken zu verstehen? Der Grund liegt darin, dass Cirruswolken einen großen Einfluss auf den Strahlungs- und damit den Wärmehaushalt der Erde haben. Wenn wir den physikalischen Prozess der Bildung dieser Eiswolken besser verstehen, können wir auch beurteilen, ob der Mensch durch seine Aktivitäten die Häufigkeit und die Arten der Eiswolken und damit auf diesem Weg auch das Klima beeinflusst.

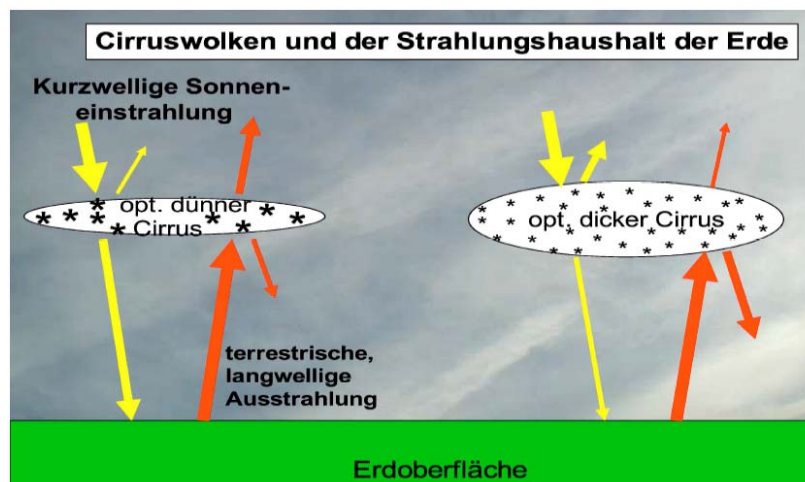


Abbildung 2: Zur Veranschaulichung des Einflusses der Cirruswolken auf den Strahlungshaushalt

An dieser Stelle ist ein kurzer Exkurs zum Einfluss der Cirruswolken auf den Strahlungshaushalt notwendig. Cirruswolken haben nämlich die Eigenschaft, die Erdoberfläche sowohl abzukühlen als auch zu erwärmen. Zum einen kühlen sie, weil die kurzwellige Sonnenstrahlung teilweise an den Eiskristallen reflektiert wird. Zum anderen wärmen sie, weil die von der Erde ausgehende langwellige Wärmestrahlung von den Eiskristallen aufgenommen und zur Erdoberfläche zurückgestrahlt wird. Bei optisch dünnen Cirruswolken überwiegt der erwärmende Effekt, da die Sonnenstrahlung nur unwesentlich abgeschwächt wird, während optisch dichtere Cirren durch die stärkere Reflexion kühlend wirken. Ob dünn oder dicht, darüber entscheidet der gesamte, in Form von Eis gebundene Wassergehalt und die Anzahl und Größe der Eiskristalle. Ein bestimmter Eiswassergehalt kann sich nämlich sowohl auf weniger, dafür aber größere, oder auf viele, aber kleinere Eiskristalle verteilen. Dabei entsteht, wie in Abbildung 2 zu sehen ist, im ersten Fall eine optisch dünnere, im zweiten Fall eine optisch dichtere Cirruswolke. Bessere Kenntnisse über die physikalischen Prozesse der Eisbildung helfen uns, zuverlässigere Vorhersagen über die Anzahl und Größe der Eiskristalle machen zu können.

Wie lassen sich die Cirruswolken nun am besten untersuchen? Ihr Vorkommen in großer Höhe macht sie nicht gerade sehr zugänglich für regelmäßige direkte Messungen. Die Cirruswolken scheinen sich einem ausführlichen Studium also zu

entziehen. Aber Forscher sind ja bekanntlich findige Leute. Sie bauen sich ganz einfach große Kammern. In denen schaffen sie die Bedingungen, unter denen sich Cirruswolken wohlfühlen und sich dann auch bilden. So lassen sich diese Eiswolken viel bequemer unter die Lupe nehmen.

Für die Durchführung dieser Doktorarbeit habe ich eng mit dem Forschungszentrum Karlsruhe zusammengearbeitet. Dort steht nämlich die AIDA, eine sehr große Kammer mit 84m^3 Volumen. In Abbildung 3 ist sie zu sehen. Der klangvolle Name steht als Abkürzung für "Aerosol Interactions and Dynamics in the Atmosphere". In der Kammer werden die chemischen und physikalischen Wechselwirkungen zwischen Aerosolen und deren Verhalten unter möglichst atmosphärennahen Bedingungen studiert. Dort können wir mit vielen verschiedenen Messinstrumenten alle uns interessierenden Parameter (z.B. die Feuchte oder die Eigenschaften der Eiskristalle) sehr genau messen. Und wir können dieselben Experimente öfters wiederholen, also statistisch absichern.

Was aber sind Aerosole? Es sind winzige, in der Luft schwebende Teilchen unterschiedlichster chemischer Zusammensetzung. Sie können fest (z.B. Ruß aus Flugzeugabgasen) oder völlig flüssig (reines Wasser oder in Wasser gelöste chemische Substanzen, z.B. verdünnte Schwefelsäuretröpfchen aus Flugzeugabgasen oder Vulkanausbrüchen) sein. Es ist auch möglich, dass sie einen festen Kern haben, der von Flüssigkeit umgeben ist. Einige Aerosole sind so klein, dass man sie mit bloßem Auge nicht sehen kann. Sind sie zahlreich in der Luft vorhanden, sprechen wir z.B. von einem dunstigen Himmel oder von dreckiger Luft. Was haben Aerosole nun mit Cirruswolken zu tun? Ganz einfach – ohne Aerosole entstehen keine Eiskristalle und damit auch keine Eiswolken.



Abbildung 3: Die AIDA beim Einbau in das Experimentiergebäude; Maße der AIDA: etwa 4m Durchmesser und etwa 7m Höhe; die Kranseile sind wegretuschiert

Damit aus den Aerosolteilchen Eiskristalle werden, muss in der umgebenden Atmosphäre eine bestimmte, die sogenannte kritische Luftfeuchte erreicht werden.

Da wir uns mit Eiswolken befassen, verwenden wir aber nicht die Luftfeuchte bezüglich flüssigem Wasser, sondern bezüglich einer Eisoberfläche. In unserem Zusammenhang interessiert nur, dass diese Eisfeuchte sich von der sonst verwendeten Luftfeuchte dadurch unterscheidet, dass es bei 100% Eisfeuchte trockener ist als bei 100% Feuchte bezüglich flüssigem Wasser.

Völlig flüssige Aerosole gefrieren erst bei sehr hohen kritischen Eisfeuchten von bis zu 170 %. Wie werden diese hohen Eisfeuchten erreicht? Dies geschieht vor allem durch eine starke Abkühlung der betroffenen Luftmassen aufgrund atmosphärischer Auftriebsprozesse (z.B. durch Konvektion). Aber auch eine bedeutende Wasserzufuhr (z.B. durch Zufluss von feuchten atlantischen Luftmassen) oder beide Prozesse gleichzeitig können dafür verantwortlich sein. Über den Gefrierprozess unter Beteiligung unterschiedlicher fester Partikel ist noch wenig bekannt. Man geht davon aus, dass in diesem Fall für die Bildung von Eiskristallen deutlich geringere Eisfeuchten ausreichen. Eiskristalle bilden sich nämlich besonders gerne dort, wo bereits ähnliche Strukturen vorhanden sind, wie z.B. auf den Oberflächen fester Partikel.

In der AIDA untersuchen wir das Verhalten folgender Aerosolarten: verdünnte Schwefelsäure oder Ammoniumsulfattröpfchen, reine Rußpartikel, zwei Sorten mineralischen Staubs (amerikanischer Straßen- und ägyptischer Wüstenstaub) sowie Schwefelsäure- oder Ammoniumsulfattröpfchen mit einem Rußkern. Wieso ausgerechnet diese Aerosolarten? Schwefelsäure und Ammoniumsulfattröpfchen sind von jeher in hoher Anzahl in der Atmosphäre vorhanden. Dagegen wird die Menge an Staub- und Rußpartikeln in der Atmosphäre durchaus vom Menschen beeinflusst. Beispielsweise können die Staubemissionen aufgrund zunehmender Wüstenbildung infolge des Klimawandels zunehmen. Rußpartikel entstehen bei vielen Verbrennungsvorgängen (z.B. Brandrodung, Flugzeugabgase), auf die der Mensch direkten Einfluss hat. Unsere Aerosolauswahl erlaubt uns sowohl Schlussfolgerungen zu dem grundsätzlichen Prozess als auch über den menschlichen Einfluss auf den Wolkenbildungsprozess.

In der AIDA können wir das Leben einer Cirruswolke von ihrer Geburt (d.h. der Bildung der ersten Eiskristalle), über ihr Wachstum (d.h. das Erreichen der maximalen Anzahl von Eiskristallen und deren Größenwachstum) bis zu ihrem Tod (d.h. dem Verdampfen der einzelnen Eiskristalle) genauestens verfolgen. Es ist zwar nur eine "Mini"-Cirruswolke, aber die physikalischen Prozesse sind dieselben wie bei ihren Schwestern in freier Natur.

Wie wir wissen, bilden sich die Cirren bei sehr tiefen Temperaturen. Wir müssen die AIDA also in eine Mega-Tiefkühltruhe verwandeln. Um die eisigen Bedingungen von bis zu -80 °C zu erreichen, werden Tanklastertanklastungen voll flüssigem Stickstoff als Kühlmittel benötigt. Eine zuvor berechnete Menge Wasser wird als Wasserdampf in die noch nicht allzu kalte AIDA eingeleitet. Bei der anschließenden Tiefkühlung schlägt sich dieses Wasser als Eisschicht auf den inneren Wänden der AIDA nieder. Diese Eisschicht dient uns als Wasserreservoir und sorgt dafür, dass wir 100% Eisfeuchte haben, bevor wir mit der eigentlichen Wolkenproduktion beginnen. Zuvor

werden die Aerosole über Rohrleitungen in die AIDA eingeblasen. Dabei müssen wir uns bei jeder Eiswolke für einen unserer Aerosoltypen entscheiden.

Für die Entstehung der Eiswolke müssen wir die Eisfeuchte schnell und stark erhöhen. Dies erreichen wir, indem wir aus der AIDA mit kräftigen Pumpen die Luft herausaugen und damit den Luftdruck in der Kammer erniedrigen. Das hat den gleichen Effekt, wie wenn eine Luftmasse in der Atmosphäre aufwärts transportiert werden würde. Mit der Höhe nimmt der Luftdruck ab, die Luftmasse kann sich ausdehnen und kühlt sich dabei ab. Der Wassergehalt bleibt aber derselbe. Wenn die für den Aerosoltyp kritische Eisfeuchte erreicht bzw. überschritten ist, bilden sich Eiskristalle. Diese nehmen Wasser aus der umgebenden Luft auf und wachsen an. Normalerweise saugen wir aus der AIDA über eine Dauer von 5 Minuten Luft ab. Die Temperatur sinkt dabei um etwa 5°C. Wir lösen die Cirruswolke auf, indem wir trockene Luft in die AIDA blasen, bis der Ausgangsluftdruck wieder erreicht ist. Das hat den umgekehrten Effekt wie das Abpumpen – wir erhöhen den Luftdruck, die Temperatur steigt, die Eisfeuchte sinkt und die Eiskristalle verdampfen. In der freien Atmosphäre haben wir diesen Fall, wenn die Luftmasse absinkt bzw. trockenere Luft zugeführt wird.

Wenn wir die AIDA kräftiger, d.h. mit höherer Pumpleistung abpumpen, ist das so, als hätten wir stärkere Auftriebsprozesse. Dadurch sinkt die Temperatur stärker und die Eisfeuchte steigt höher. Deshalb ist die für einen Aerosoltyp kritische Eisfeuchte länger überschritten und es können sich mehr Eiskristalle bilden. Die höhere Anzahl von Eiskristallen muss sich aber mit derselben Menge Wasser begnügen und die Eiskristalle wachsen daher nur zu geringeren Größen an. Wenn wir dagegen bei kälteren Temperaturen starten, ist insgesamt weniger Wasser vorhanden. Auch dies bewirkt, dass wir kleinere Eiskristalle bekommen. Aufgrund physikalischer Gesetzmäßigkeiten erreichen wir bei kälteren Starttemperaturen auch leichter höhere Eisfeuchten. Dadurch bekommen wir tendenziell mehr Eiskristalle. Neben der Art der Aerosole ist also die Temperatur, die Feuchte und die Geschwindigkeit der Abkühlung (d.h. die Stärke der Auftriebsprozesse) entscheidend dafür, wie unsere Cirruswolke aussieht.

Wie beeinflussen nun die einzelnen Aerosolarten die Cirruswolkenbildung? Im Falle der kritischen Eisfeuchte (Abbildung 4, links) entdecken wir deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Aerosoltypen. Reine Schwefelsäuretröpfchen (SC) zum Beispiel bilden erst bei Eisfeuchten zwischen 140 und 160% die ersten Eiskristalle. Reine Ammoniumsulfattröpfchen (AS) und reine Rußpartikel dagegen bilden Eiskristalle schon bei 120 bis 130% Eisfeuchte. Die niedrigsten Werte von knapp über 100% finden wir jedoch bei amerikanischem Straßen- (ASS) und ägyptischem Wüstenstaub (WS).

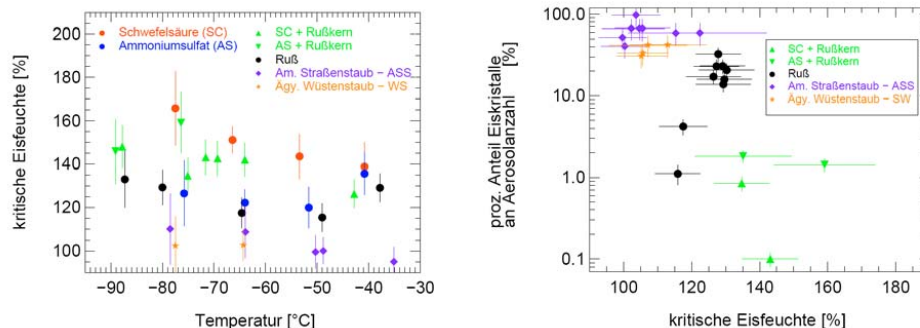


Abbildung 4: linkes Bild: kritische Eisfeuchte für die Bildung der ersten Eiskristalle für alle untersuchten Aerosolarten; rechtes Bild: prozentualer Anteil der Aerosol Ausgangsmenge, der Eiskristalle bildet, in Abhängigkeit der kritischen Eisfeuchte; jeder Punkt kennzeichnet ein Experiment; die Fehlerbalken berücksichtigen jeweils die Unsicherheiten der Temperatur-, Wasser- und Aerosolmessung

Bei jedem Aerosoltyp möchten wir zudem wissen, wieviele Eiskristalle er insgesamt generiert (d.h. ob die Cirruswolke optisch dünn oder dicht ist) und wieviele Eiskristalle dies im Verhältnis zur Ausgangsmenge des Aerosols sind. Dieser prozentuale Anteil des Aerosols, der Eiskristalle bildet, ist im rechten Teil von Abbildung 4 zu sehen. Wieder finden wir deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Aerosoltypen. Bei reinen Rußpartikeln bilden im Mittel 10% der Partikel Eiskristalle. Die Staubpartikel jedoch übertreffen alle anderen. Während bei ägyptischem Wüstenstaub etwa 40% der Ausgangsmenge Eiskristalle generiert, ist der amerikanische Straßenstaub mit mittleren 70% noch effizienter. Im Fall der völlig gelösten AS- bzw. SC-Tröpfchen hat sich herausgestellt, dass sich immer etwa dieselbe absolute Anzahl von Eiskristallen bildet, egal wie hoch oder niedrig die Aerosol Ausgangsmenge ist. Eine prozentuale Angabe, welcher Teil des Aerosols Eiskristalle gebildet hat, ist daher in diesen Fällen immer willkürlich und fehlt deshalb im rechten Teil von Abbildung 4.

Was sagt uns das, wenn wir unsere Ergebnisse auf die freie Atmosphäre übertragen? Wir wollen ja wissen, ob wir Menschen die Häufigkeit und die Arten der Cirruswolken und dadurch auch das Klima beeinflussen. Bei Schwefelsäure- und Ammoniumsulfattröpfchen hat sich gezeigt, dass unterschiedliche Mengen dieser Aerosolarten die Anzahl der Eiskristalle in einer Cirruswolke und dadurch deren optische Eigenschaften kaum beeinflussen. Ganz anders dagegen die Ruß- und Mineralstaubpartikel. Sie besitzen eine sehr hohe Gefriereeizienz und ihre Menge ist vom Menschen stark steuerbar. Erhöhen wir ihren Anteil in der oberen Atmosphäre, können die Cirruswolken sich früher, d.h. bei höheren Temperaturen, bilden. Dadurch verändern wir die Häufigkeit der Cirren. Zudem nehmen wir Einfluss auf die Anzahl der erzeugten Eiskristalle, also auf die optischen und damit auf die Strahlungseigenschaften der Eiswolke.

Dabei müssen wir jedoch noch beachten, dass die Anzahl der Ruß- bzw. Mineralstaubpartikel in der oberen Atmosphäre normalerweise 100- bis 1000fach geringer ist (wir finden pro cm^3 etwa ein solches Teilchen) als die Anzahl völlig flüssiger Aerosoltröpfchen. Auch wenn die festen Aerosole ein früheres Gefrieren auslösen, muss die entstehende Cirruswolke daher nicht unbedingt auch mehr Eiskristalle enthalten. Allerdings können wir davon ausgehen, dass z.B. in stark frequentierten Flugkorridoren der Einfluss von Rußpartikeln deutlich ist. Außerdem dürfen wir einen anderen Sachverhalt nicht vernachlässigen: Nimmt die globale Durchschnittstemperatur zu, enthält die Luft auch mehr Wasserdampf, d.h. die Grundfeuchte in der Atmosphäre erhöht sich. Entsprechend steigt auch die Wahrscheinlichkeit der Wolkenbildung. Insgesamt vergrößern wir das Potential einer Klimaveränderung.

Übrigens – ganz so federleicht sind diese "Feder"wolken dann doch nicht: Eine durchschnittliche Cirruswolke von 0,5 km Höhe, 1,5 km Breite und 5 km Länge erreicht bei einem durchschnittlichen Eiswassergehalt von $0,25 \text{ g/m}^3$ ein Gesamtgewicht von etwa 940 Tonnen.

Polymere – Molekulare Entfesselungskünstler

Michaela Zamponi

Polymere sind aus unserem heutigen Leben nicht mehr wegzudenken, sie begegnen uns tagtäglich, meist ohne dass es uns bewusst ist. So besteht z.B. die Shampooflasche aus Polypropylen, wir ziehen vielleicht einen Pullover an, der Polyamid enthält, tragen unsere Einkäufe in einer Polyethylen-Tüte nach Hause und hören abends zur Entspannung eine CD (Polycarbonat). Polymere sind sehr lange Moleküle, die aus einer großen Anzahl sich wiederholenden chemischen Einheiten bestehen. Sie zeigen eine große Vielfalt verschiedener Eigenschaften, allein schon die Architektur des Polymers, d.h. ob es eine einfache lineare Kette ist oder vielleicht Seitenzweige hat, führt zu ganz unterschiedlichem Verhalten. Sie sind seit Jahren Objekt intensiver Forschung und doch sind die Ursachen der verschiedenen Eigenschaften noch nicht völlig verstanden. Dabei ist der Zusammenhang zwischen den mikroskopischen Eigenschaften und dem makroskopischen Verhalten nicht nur für die Grundlagenforschung von großer Bedeutung. So ist es vor allem für die Verarbeitung der Polymere wichtig zu verstehen, welche Prozesse in der Polymerschmelze ablaufen. Um die Polymere in die richtige Form zu bringen, werden sie aufgeschmolzen und dann nach Bedarf gespritzt oder gezogen, so dass gute Fließeigenschaften wichtig sind, das fertige Produkt dagegen soll stabil sein, z.B. sollte der Gartenstuhl später in der Sonne nicht zerfließen.

Flexiblen Polymeren gemein ist ein viskoelastisches Verhalten in der Schmelze. Je nach Länge der Moleküle, ihrer Beanspruchung und der Temperatur, sind sie elastisch wie ein Gummi oder zeigen viskose Eigenschaften wie Flüssigkeiten. Zur Erklärung der Viskoelastizität entstand vor einigen Jahrzehnten die Vorstellung, dass die langen Polymermoleküle sich in der Schmelze umeinander verschlaufen und, ähnlich einem Gummi, eine Art Netzwerk bilden, das sich aber, im Gegensatz zu einem permanenten Gummnetzwerk, mit der Zeit wieder lösen kann. So werden vor allem Bewegungen senkrecht zu dem Kettenprofil behindert, da die Kette dann andere Ketten mitbewegen muss. Diese topologische Bewegungseinschränkung beschrieb Physiknobelpreisträger Pierre de Gennes durch eine virtuelle Röhre, die eine gegebene Polymerkette einschränkt, so dass sie sich nur noch innerhalb dieser Röhre bewegen kann (Abbildung 1).

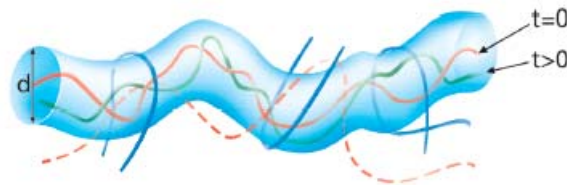


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Röhrenbeschränkung in Polymer-schmelzen. Eine gegebene Kette wird durch die sie umgebenden anderen Ketten in einer Röhre mit dem Durchmesser d eingesperrt.

Der Röhrendurchmesser ist dabei ein Maß für die laterale Bewegungsfreiheit der Kette und entspricht dem Abstand zwischen zwei Verschlaufungen, bestimmt also wie elastisch das Polymer ist. Die einzige Bewegungsmöglichkeit, die der Kette dann noch bleibt, ist eine Kriechbewegung entlang ihrer eigenen Kontur, ähnlich einer Schlange, aus der Röhre hinaus ("Reptation").

Durch diesen Prozess werden die Verschlaufungen wieder gelöst, das Polymer beginnt zu fließen.

Erst vor wenigen Jahren ist es mit Hilfe der Neutronenspinchospektroskopie (NSE, Abbildung 2) gelungen, diesen dynamischen Prozess direkt auf molekularer Ebene nachzuweisen. Neutronen, die neutralen Teilchen der Atome, eignen sich hervorragend als Sonde für solche Systeme. Da sie elektrisch neutral sind, wechselwirken sie kaum und können so tief ins Material eindringen. Dort werden sie an den Atomkernen gestreut, so dass man aus der Winkelverteilung der gestreuten Neutronen Rückschlüsse auf die Struktur der streuenden Probe erhält. Die Geschwindigkeitsänderung der Neutronen bei der Streuung verrät etwas über die Bewegungsprozesse in der Probe. Das einzige Problem dabei ist der große Geschwindigkeitsunterschied: die Neutronen fliegen mit einer 100000-fachen größeren Geschwindigkeit durch die Probe als die langsame molekulare Bewegung der langen Polymerketten, die im Bereich von mm/s liegt.

Um so langsame Bewegungen verfolgen zu können, muss man sich eines Tricks bedienen. Neutronen haben einen Spin, ein Eigendrehimpuls, der sich in Magnetfeldern um die Feldrichtung dreht. So kann man den Neutronenspin als eine Art Stoppuhr benutzen, um die winzige Geschwindigkeitsänderung zu messen, die ein Neutron bei der Streuung an der Probe erfährt: Man lässt die Neutronen vor der Probe durch ein Magnetfeld kreiseln ("präzedieren"), wobei die Anzahl der Umdrehungen von der Geschwindigkeit der Neutronen abhängt. Am Probenort invertiert man dann die Spinorientierung und lässt die gestreuten Neutronen durch ein gleichstarkes Magnetfeld "rückwärts" kreiseln. Hat sich die Neutronengeschwindigkeit nicht geändert, ist die Zahl der Präzessionen vor und nach der Probe gleich, die Neutronen haben wieder dieselbe Spinorientierung wie am Anfang

("Spinecho"). Ändert sich die Geschwindigkeit bei dem Stoß mit den Probenatomen, nimmt dagegen das Signal am Detektor ab, da ein Analysator dafür sorgt, dass nur Neutronen mit dem gleichem Spin wie am Start gezählt werden.

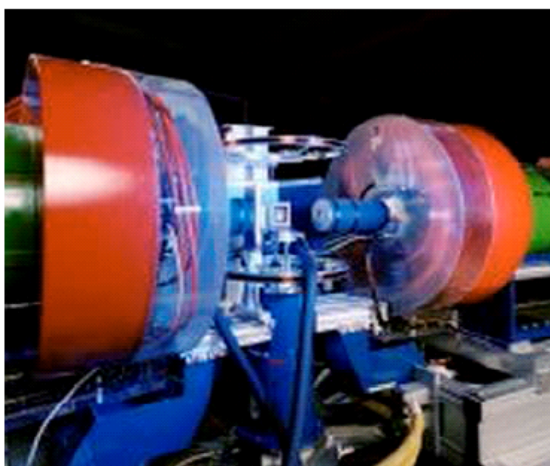


Abbildung 2: Photo des Jülicher Neutronenspinechospektrometers. Rechts und links sieht man die großen Magnetspulen, in der Mitte befindet sich der Probenort.

Ein einzigartiger Vorteil der Neutronenstreuung ist die Tatsache, dass nicht nur die unterschiedlichen chemischen Elemente der Probe, sondern sogar die verschiedenen Isotope eines Elementes die Neutronen unterschiedlich stark streuen. Insbesondere geben Wasserstoff und Deuterium ("schwerer Wasserstoff") einen stark unterschiedlichen Streukontrast. Dies kann man ausnutzen, um ganze Moleküle oder auch nur Teile einer Kette zu markieren, ohne dabei das chemische oder dynamische Verhalten der Kette zu ändern. So fällt einem Neutron ein protoniertes Polymer in einer Umgebung von deuterierten, aber ansonsten gleichartigen Ketten auf, wie eine bunte Nudel in einem Teller Spaghetti. Mischt man wenige protonierte, d.h. markierte Ketten in eine deuterierte Matrix, kann man mit der Neutronenspin-echospektroskopie direkt die Dynamik der einzelnen Polymerketten in der Schmelze messen. Das NSE-Spektrometer misst dabei direkt den sogenannten "dynamischen Strukturfaktor" $S(q, t)$, wobei q der Impulsübertrag während des Streuprozesses ist und so Informationen über die räumliche Struktur gibt und t für die Zeit steht. Anschaulich ist der dynamische Strukturfaktor eine Korrelationsfunktion der Ketten-segmente, der Abbau dieser Korrelationen führt zu einem Abfall des Strukturfaktors und lässt Rückschlüsse auf Art und Geschwindigkeit der Kettenbewegung zu.

Aufgrund des limitierten messbaren Zeitbereichs des NSE-Spektrometers kann man die eigentliche Reptation, das Kriechen der Kette aus der Röhre, nicht messen, der dynamische Strukturfaktor zeigt allerdings das Gefangensein der Kette in der Röhre: Nach einem anfänglichen Abbau der Korrelationen durch Bewegung der Segmente innerhalb der Röhre, stagniert die Relaxation, da keine weitere Bewegung mehr

möglich ist und der Strukturfaktor mündet in einem Plateau. Das Niveau der Plateaus für verschiedene Impulsüberträge verrät dann die Größe des Röhrendurchmessers, je weiter die Röhre ist, desto größeren Bewegungsspielraum haben die Kettensegmente, desto weiter fällt der Strukturfaktor ab, desto tiefer liegt das Plateau. Für lange lineare Polyethylen (PE) Ketten, ein flexibles Polymer einfacher chemischer Struktur, konnte das Reptationsmodell bestätigt werden, aber eine systematische Studie an PE Ketten verschiedener Länge zeigte mit abnehmender Kettenlänge der Moleküle eine stärkere Relaxation als erwartet. Die Ketten, obwohl sie immer noch lang genug sind, so dass sie sich umeinander verhaken, scheinen sich freier bewegen zu können als im einfachen Reptationsmodell vorhergesagt. Neben der langsamen Reptation muss es also noch weitere, schnellere Relaxationsprozesse geben, die die Röhrenbeschränkung aufheben. Um diesen Prozessen auf die Spur zu kommen, wurde die Markierungsmethode der Polymere weiter verfeinert.



Abbildung 3: Schematische Darstellung des Röhrenabbaus durch Fluktuationen der Kettenenden. Sobald die Kette sich ein Stück in die Röhre zurückzieht, wird dieser Teil vergessen und die Enden können sich freier bewegen.

Einer der wichtigsten Relaxationsprozesse sind die sogenannten "Konturlängenfluktuationen" (Abbildung 3): Durch die thermische Anregung fluktuieren die Kettensegmente innerhalb der Röhre, auch die Kettenenden führen diese willkürliche Bewegung aus. Allerdings kann es dabei passieren, dass die Kettenenden sich ein Stück in die Röhre zurückziehen. Das dann leere Röhrenstück wird sozusagen vergessen, so dass sich die Kettenenden danach in eine beliebige Richtung weiterbewegen können. So wird die Röhre mit der Zeit immer weiter abgebaut, was zu der größeren Freiheit der Kette führt.

Um diesen Relaxationsprozess direkt nachzuweisen, wird er ausgeblendet! Dafür werden die Kettenenden einer ansonsten protonierten Kette deuteriert, so dass sie in einer deuterierten Matrix für die Neutronen nicht mehr sichtbar sind (Abbildung 4). Wie weit man die Enden maskieren muss, lässt sich aus der Theorie berechnen.

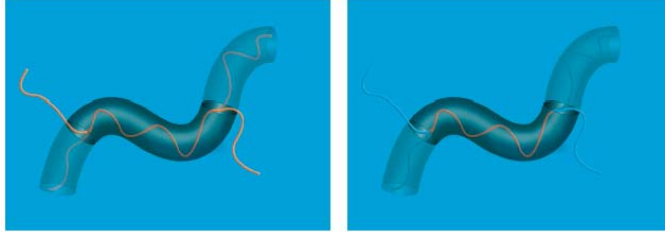


Abbildung 4: Darstellung des Markierungsschemas. Bei einer vollmarkierten Kette sieht man die Relaxation durch die Kettenenden (links), bei einer mittenmarkierten Kette dagegen werden die Konturlängenfluktuationen ausgeblendet (rechts).

Vergleicht man nun die Daten einer vollmarkierten mit denen einer entsprechenden gleichlangen mittenmarkierten Kette, so unterscheiden sich die Daten nur um eins: den gesuchten Relaxationsprozess (Abbildung 5). Die mittenmarkierte Kette zeigt dieselbe Röhrenbeschränkung wie eine sehr lange vollmarkierte Kette, für die Endeffekte wie Konturlängenfluktuationen keine Rolle spielen. Die vollmarkierte Kette dagegen zeigt die zusätzliche Relaxation durch die Konturlängenfluktuationen. So kann man also direkt nachweisen, dass die beobachtete schnellere Relaxation der kürzeren Ketten in der Tat ein Relaxationsprozess der Enden ist. Dies erklärt auch den zunehmenden Abfall des Strukturfaktors mit abnehmender Kettenlänge, da für die kürzeren Ketten der Beitrag der Kettenenden zur Relaxationsfunktion an Bedeutung zunimmt.

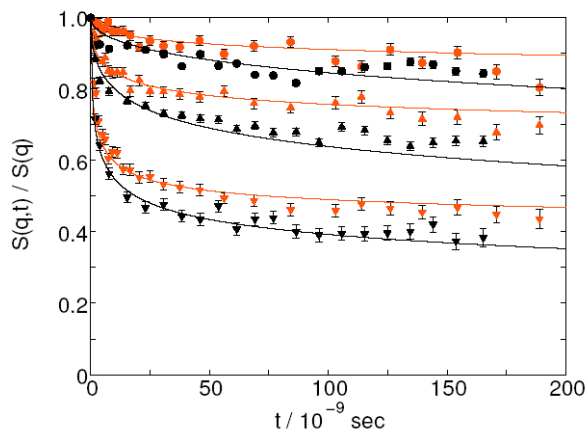


Abbildung 5: Dynamischer Strukturfaktor für die vollmarkierte (schwarze Symbole) und die mittenmarkierte Kette (rote Symbole) für drei verschiedene Impulsüberträge. Die Linien zeigen die theoretische Erwartung aus dem Reptationsmodell für die mittenmarkierte Kette und mit Berücksichtigung der Konturlängenfluktuationen für die vollmarkierte Kette.

Eine andere Messreihe konnte zeigen, dass noch ein weiterer Relaxationsprozess berücksichtigt werden muss, der im Standard-Röhrenmodell nicht betrachtet wird. Die Röhre selbst ist natürlich kein starres Objekt, sondern wird aus Ketten gebildet, die denselben dynamischen Prozessen unterliegen wie die betrachtete Testkette. Das bedeutet, dass sich nicht nur die Testkette selbst durch Fluktuationen oder Reptation aus der Röhre befreit, sondern auch die Röhre sich mit der Zeit durch die Bewegung der Ketten, die sie bilden, auflöst. Diesen Effekt nennt man "constraint release" (Beschränkungsauflösung). Um diesen Prozess direkt zu beobachten, betrachtet man die Dynamik einer langen markierten Kette in unterschiedlich kürzeren deuterierten Matrixketten, die die Röhre bilden. Die markierte Kette muss lang sein, damit der Effekt der Konturlängenfluktuationen keine Rolle spielt und man nur die allmähliche Auflösung der Röhre durch die schnellere Bewegung der kurzen Matrixketten sieht.

Eine lange Kette, die in einer Matrix derselben Länge noch vollkommen in der Röhre gefangen ist, zeigt mit abnehmender Matrixkettenlänge einen zunehmenden Abfall des dynamischen Struktur factors (Abbildung 6). Diese beobachtete zusätzliche Relaxation ist ein Effekt der Umgebung, je kürzer die Matrixketten sind, desto schneller kann die Röhre aufgelöst werden, "constraint release" wird sichtbar. Das bedeutet, dass für Polymerketten intermediärer Länge nicht nur Konturlängenfluktuationen frühzeitig zu einer Relaxation in der Schmelze führen, sondern auch die Beschränkungsauflösung der Umgebung dazu beiträgt.

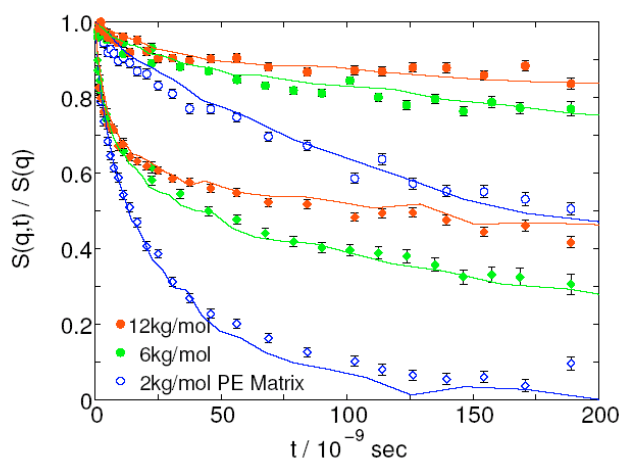


Abbildung 6: Dynamischer Struktur factor für die lange markierte Kette (36kg/mol PE) in verschiedenen kürzeren Matrixketten für zwei verschiedene Impulsüberträge. Die Linien zeigen den Vergleich mit den Ergebnissen eines neuen Simulationsmodells, das von einem Theoretiker der Universität Leeds entwickelt wurde.

Die in dieser Arbeit präsentierte ausgeklügelte Kombination von höchstauflösender Neutronenspektroskopie und gezielter Markierung der Polymere erlaubt erstmalig, Relaxationsprozesse direkt auf einer molekularen Ebene getrennt voneinander zu beobachten, die bisher zwar theoretisch vorhergesagt waren, aber nie direkt nachgewiesen werden konnten. Die Berücksichtigung von Konturlängenfluktuationen und der Beschränkungsauflösung führt dann zu einer konsistenten Beschreibung der Dynamik von linearen Polymerschmelzen im Rahmen des Röhrenmodells.

1. **Fundamentos de Ensaio de Vazamento e Estanqueidade**

von J. da Cruz Payão Filho, W. Schmidt, G. Schröder (2000), 340 Seiten
ISBN: 3-89336-278-9

2. **Nur das Geld zählt? Erfassung von Nutzenorientierungen bei der Zuteilung von Geld und materiellen Gütern**

von M. Ertinger (2003), 333 Seiten
ISBN: 3-89336-336-X

3. **Advances in Nuclear and Radiochemistry**

Extended Abstracts of Papers presented at the Sixth International Conference on Nuclear and Radiochemistry (NRC-6), 29 August to 3 September 2004, Aachen, Germany

edited by S. M. Qaim, H. H. Coenen (2004), XXXII, 794 pages
ISBN: 3-89336-362-9

4. **Wissenschaft im Zeichen der Zeit**

Preisträger des Leibfried-Preises im Forschungszentrum Jülich 2000 – 2005
herausgegeben von R. Ball (2005), ca. 185 Seiten
ISBN: 3-89336-411-0

Günther Leibfried (1915–1977) ist der Namensgeber des internen Jülicher Wissenschaftspreises. Der Physiker Günther Leibfried hat seit der Gründung des Forschungszentrums bis zu seinem frühen Tode die theoretische Physik in Jülich maßgeblich mitgestaltet. Lange bevor in Deutschland die öffentliche Debatte über die Notwendigkeit der Popularisierung von Wissenschaft geführt wurde, sah Leibfried es als eine besondere Herausforderung aber auch Selbstverständlichkeit an, gerade komplexe und anspruchsvolle wissenschaftliche Zusammenhänge allgemeinverständlich, lebensnah und abwechslungsreich darzustellen.

Im vorliegenden Band werden die Beiträge der Leibfried-Preisträger und Preisträgerinnen des Forschungszentrums aus den Jahren 2000 bis 2005 veröffentlicht. Mit achtzehn allgemeinverständlichen Arbeiten bietet er „Wissenschaft kompakt“, gibt einen Überblick über die Breite der Forschung in Jülich und will zugleich zur Nachahmung anregen.

Forschungszentrum Jülich
in der Helmholtz-Gemeinschaft



Band / Volume 4
ISBN 3-89336-411-0

Allgemeines
General