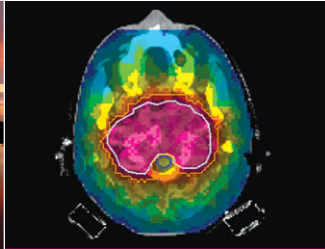


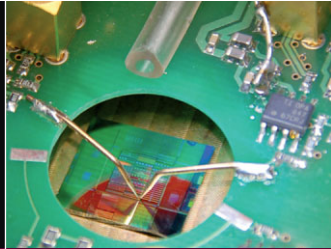
4 | 2009



**QUANTENOPTIK**  
Extinktion einzelner  
Moleküle



**MEDIZINPHYSIK**  
Iontherapie  
in der Klinik



**FESTKÖRPERPHYSIK**  
Phasenwechsel-  
Material als Speicher

# PHYSIK

IN UNSERER ZEIT



WINDMOBILE

 WILEY-VCH

# Vom Computer zum Gehirn



*Simone Raoux ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am T. J. Watson Forschungszentrum von IBM in Yorktown Heights, USA. Ihr Forschungsschwerpunkt ist die Entwicklung neuer Phasenwechsel-Materialien für Speicher- und synaptische Anwendungen.*

Die Datenflut, die die Menschheit produziert, verarbeitet und speichert, steigt in exponentiellem Tempo. Bereits 1965 veröffentlichte Gordon Moore, Mitbegründer der Firma Intel, sein nun berühmtes Gesetz. Er sagte vorher, dass sich jedes Jahr die Anzahl der Transistoren pro Flächeneinheit auf Siliciumwafern verdoppeln würde. Tatsächlich passiert das etwa alle 18 Monate.

Ray Kurzweil, einer der herausragenden Forscher auf dem Gebiet der künstlichen Intelligenz, stellte fest, dass unsere Rechenmaschinen schon lange vor der Erfindung des Transistors dem Mooreschen Gesetz gefolgt sind. Diese Entwicklung begann bereits um 1890 mit den mechanischen Rechenmaschinen. Das Moorsche Gesetz erfordert nicht nur den exponentiellen Anstieg der Rechenkapazität, sondern auch der Speicherkapazität.

Jedes Mal, wenn ein Ende dieses Trends vorhergesagt wurde, entwickelten Wissenschaftler und Ingenieure eine neue Technologie. Sie waren bislang immer erfinderisch genug, um uns weiter auf dem Mooreschen Pfad voranzutreiben. Zudem ändert sich die Natur der Probleme, die unsere Computer lösen.

## PHASENWECHSELSPEICHER KÖNNEN SYNAPSEN SIMULIEREN

Computer, deren Namen sich ja vom englischen Wort für rechnen ableitet, wurden ursprünglich genau für diesen Zweck entwickelt. Heute berechnen die leistungsstärksten Computer der Welt Probleme der Wettervorhersage oder der Struktur von Proteinen, wenn sie nicht gerade Schachweltmeister schlagen. Die Lösung vieler wichtiger numerischer Probleme basiert auf der Lösung gekoppelter partieller Differentialgleichungen. Dies erfordert schnelle Prozessoren und schnelle, dauerhafte Speicher.

Bei vielen neuen Anwendungen von heute müssen die Computer jedoch sehr große Datenmengen analysieren, anstatt Gleichungen zu lösen. Dazu zählen zum Beispiel Anfragen mit Suchmaschinen wie Google oder Bild- und Videoanwendungen. Diese datenzentrierten Aufgaben benötigen schnelle Ein- und Ausgaben sowie schnellen wahlfreien Zugriff auf Daten, mit anderen Worten: schnelle und – wenn möglich – nichtflüchtige Speicher mit sehr großer Kapazität. Wie der Beitrag von Wojciech Welnic und Matthias Wuttig auf Seite 189 dieses Hefts zeigt, sind Speicher auf der Basis von Phasenwechsel-Materialien exzellente Kandidaten, um diese neuen Aufgaben zu meistern.

Neben ihrer Funktion als Speicher für binäre Logik, also mit 0 oder 1 als Speicherzuständen, haben Phasenwechsel-Speicher das Potenzial für eine faszinierende neue Anwendung. Wie Synapsen im Gehirn, die in verschiedenen elektrochemischen Leitfähigkeitszuständen sein können, können Phasenwechsel-Speicher in verschiedene Widerstandszustände gesetzt werden. Dieses Verhalten eröffnet den Weg zu einem Computer, der wie ein Gehirn funktioniert. Dabei werden die Neuronen und Synapsen durch elektronische Bauelemente ersetzt, die die gleichen Funktionen erfüllen wie ihre biologischen Vorbilder.

Tatsächlich hat IBM gemeinsam mit fünf führenden amerikanischen Universitäten kürzlich die Gründung eines entsprechenden Forschungsprogramms verkündet. Ziel ist der Bau eines Computersystems, das die Fähigkeiten des Gehirns

wie Erkennen und Empfindung simulieren kann. All das soll mit vergleichbarem Energieverbrauch und in vergleichbaren räumlichen Abmessungen geschehen wie im Gehirn. Ob wir mit unserem eigenen Gehirn verstehen können, wie unser Gehirn

funktioniert, ist nicht nur eine wissenschaftliche, sondern auch eine interessante philosophische Frage. Wir nähern uns dem Zeitpunkt, den Ray Kurzweil als Singularität beschreibt, bei dem unsere Computer klüger als wir sein werden.

Das wichtigste Element der Phasenwechsel-Technologie sind die Materialien selbst. Wie Wojciech Welnic und Matthias Wuttig schreiben, wurde diese Materialklasse schon in den 1960er Jahren für die Datenspeicherung vorgeschlagen. Doch erst die Entdeckung schnell schaltender Materialien führte zur Entwicklung und sehr erfolgreichen Kommerzialisierung dieser Technologie.

Wie die beiden Autoren zudem anmerken, besteht ein großer Teil der Materialentwicklung auf diesem Gebiet immer noch im „Herumprobieren“. Ihre Forschungsergebnisse haben uns dem Ideal nähergebracht, neue Phasenwechsel-Materialien ganz gezielt zu entwickeln. Bei dieser Suche können wir unser Wissen über den Zusammenhang zwischen der Materialkomposition und den strukturellen, optischen und elektrischen Eigenschaften nun effizient einsetzen.

*Simone Raoux*

**Verlag:**  
 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA Weinheim,  
 Boschstraße 12, Postfach 10 11 61,  
 69451 Weinheim;  
 Telefon +49 (0)62 01/6 06-0,  
 Telefax +49 (0)62 01/6 06-2 07,  
 Telex 465 516 vchwh d.

**Redaktion**  
 Dr. Thomas Bührke, Wiesenblättchen 12,  
 68723 Schwetzingen,  
 Telefon +49(0)62 02/5 77 97 49  
 Thomas.Buehrke@t-online.de  
 Roland Wengenmayr, Konrad-Glatt-Straße 17,  
 65929 Frankfurt/M., Telefon +49 (0)69/30 85 41 76  
 roland@roland-wengenmayr.de

**Kuratorium**  
 Heinz Krenn, Graz  
 Hinrich Meyer, Hamburg  
 Thomas Müller, Karlsruhe  
 Gerhard Rempe, Garching  
 Elke Scheer, Konstanz  
 Werner Schneider, Erlangen  
 Peter Schurtenberger, Fribourg  
 Jürgen Vetter, Erlangen  
 Michael Vollmer, Brandenburg

**Herstellung**  
 Marita Beyer, Telefon +49 (0)62 01/6 06-2 68,  
 Telefax +49 (0)62 01/6 06-3 28.

**Anzeigenleitung:**  
 Marion Schulz, Telefon +49 (0)62 01/6 06-5 65,  
 Telefax +49 (0)62 01/6 06-5 50.

**Abonnenten-Service:**  
 Telefon +49 (0)62 01/6 06-4 00,  
 E-mail: service@wiley-vch.de

**Abonnementpreise**  
 (inklusive Versand und MwSt.) für 12 Monate/  
 6 Hefte: Persönliche Bezieher: € 109,14, Studenten:  
 € 72,76, Institutionelle Bezieher: € 238,61 (print),  
 € 265,37 (online), € 277,98 (print und online).  
 Studentische Abonnenten werden gebeten, ihrer  
 Bestellung eine Kopie der Immatrikulations-  
 bescheinigung beizulegen. Persönliche Abonne-  
 ments dürfen nicht an Bibliotheken verkauft oder  
 als Bibliotheksexemplare benutzt werden.  
 Abbestellungen nur bis spätestens 3 Monate  
 vor Ablauf des Bezugsjahres.

**Satz:**  
 TypoDesign Hecker, Leimen.

**Druck und Bindung:**  
 ColorDruck, Leimen.

© WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA Weinheim,  
 69451 Weinheim, 2009.  
 Printed in the Federal  
 Republic of Germany.  
 ISSN 0031-9252



# PHYSIK

## IN UNSERER ZEIT

www.phiu.z.de

### EDITORIAL

#### 167 Vom Computer zum Gehirn

Simone Raoux

### WINDENERGIE

#### 176 Mit dem Wind gegen den Wind

Jan Lehmann | Martin Kühn

### QUANTENOPTIK

#### 182 Im Schatten eines Moleküls

Ilja Gerhardt | Gert Wrigge



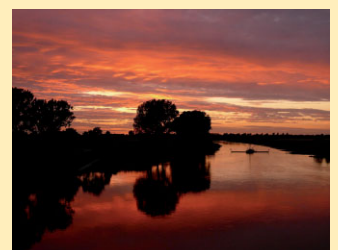
(Foto: T. Klaus)

## 176 Mit dem Wind gegen den Wind

Windenergie erzeugt heute vor allem elektrischen Strom. Könnte sie auch Fahrzeuge antreiben, die sich unabhängig von der Windrichtung bewegen? Im Prinzip funktioniert es. Das bewies das erste internationale Windmobil-Rennen Aeolus Race.

## 182 Im Schatten eines Moleküls

Wenn Licht ein optisches Medium durchläuft, dann wird es abgeschwächt. Dieser alltägliche Effekt heißt Extinktion und zeigt sich im Extremfall als Schatten. Doch der „Schattenwurf“ einzelner Atome oder Moleküle ist erst heute der experimentellen Untersuchung zugänglich. Die neuen Erkenntnisse sind für die Quanteninformationsverarbeitung interessant.



# 4 | 2009

## FESTKÖRPERPHYSIK

### 189 Schalten mit Licht und Strom

Wojciech Welnic | Matthias Wuttig

## MEDIZINPHYSIK

### 196 Tumore unter schwerem Beschuss

Gerhard Kraft

## MATERIALFORSCHUNG

### 203 Brückenschlag mit Physik

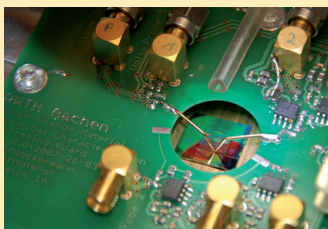
Nikolaus Nestle | Michael Kutschera |  
Luc Nicoleau | Michael Leitl | Michael Bräu

## TREFFPUNKT FORSCHUNG

- 170 Zeit für eine neue Lichtquelle
- 171 Element 112
- 171 Die Fundamente sind gesetzt
- 172 Strommessung an einzelnen molekularen Drähten
- 173 Moleküle aus Rydberg-Atomen
- 175 Neues Radon-Isotop entdeckt
- 175 Physics News

## MAGAZIN

- 210 Physik gestern und heute
- 211 Im Blickwinkel
- 212 Bücher
- 212 Kerschensteiner Kolleg
- 213 Historisches Rätsel
- 214 Mol-Gastronomie

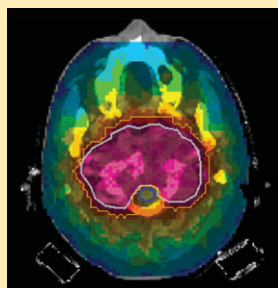


## 189 Schalten mit Licht und Strom

Phasenwechsel-Materialien besitzen in der amorphen Phase signifikant andere optische und elektrische Eigenschaften als in der kristallinen. Sie lassen sich schnell zwischen beiden Phasen „umschalten“ und eignen sich als nichtflüchtige Datenspeicher. Als optische Speichermedien sind sie in wiederbeschreibbaren CDs, DVDs und Blu-Ray-Discs längst etabliert. Sie könnten nun auch elektronische Speichertechnologien revolutionieren.

## 196 Tumore unter schwerem Beschuss

Im Heidelberger Klinikum geht die erste kombinierte Ionenstrahl-Anlage demnächst in Betrieb. Dort werden Krebstumore mit Kohlenstoff- und Protonenstrahlen behandelt. Nach einer mehr als zehnjährigen Entwicklungsphase gelang damit der Ionentherapie der Sprung von der Grundlagenforschung in die Kliniken.



## 203 Brückenschlag mit Physik

Die Materialforschung hat in den letzten Jahren aus Beton und Gips Hochleistungswerkstoffe gemacht, die kühne architektonische Konstruktionen ermöglichen. Moderne physikalische Abbildungsverfahren liefern der Forschung wichtige Einblicke in die Materialeigenschaften.

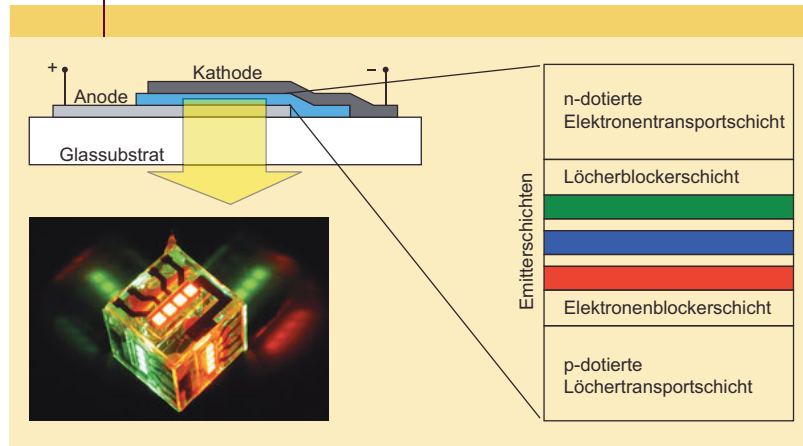


## ORGANISCHE LEUCHTDIODEN

## Zeit für eine neue Lichtquelle

Weißer organische Leuchtdioden (OLED) für Beleuchtungszwecke werden seit etwa 15 Jahren intensiv erforscht. Damit sich diese Technologie als wirkliche Alternative etablieren kann, gilt es seither, die Effizienz und Lebensdauer drastisch zu steigern. Kürzlich ist es unserer Gruppe an der TU Dresden gelungen, mit weißen OLED die Leistungseffizienz von Leuchtstoffröhren zu übertreffen [1].

ABB. 1 | AUFBAU EINER OLED



In einer OLED werden Elektronen und Löcher durch eine angelegte Spannung injiziert und in die Emitterschichten transportiert, wo sie unter Aussendung von Photonen rekombinieren. Dieses Licht wird durch die transparente Anode und das Glassubstrat ausgekoppelt. Foto: Typische Teststrukturen sind hier zu einem leuchtenden Würfel zusammengefügt.

Für die Beleuchtung wird in Europa etwa 25 % des gesamten elektrischen Energieverbrauchs aufgewandt. Es ist deshalb ein wichtiges Ziel, die Effizienz der Beleuchtung deutlich zu steigern. Hier gibt es noch viel Spielraum nach oben, denn die wesentlichen Elemente der heutigen Beleuchtungstechnik, Glühlampen und Leuchtstoffröhren, wandeln nur etwa 5 % beziehungsweise 20 % der elektrischen Leistung in weißes Licht um. Als weiteren Nachteil enthalten Leuchtstoffröhren giftiges Quecksilber.

In Leuchtdioden auf der Basis von Halbleitern geschieht die Lichtemission auf „kalte“ Weise: Ein Elektron und ein Loch werden aus Elektroden injiziert, und bei der Rekombination entsteht ein Photon. Dieser Prozess erlaubt im Prinzip eine Effizienz von annähernd 100 %. Entsprechend wurden schon weiße

LED auf der Basis von anorganischen III-V-Halbleitern-Einkristallen gezeigt, die 150 Lumen Lichtstrom pro Watt elektrischer Leistung erzeugen [2]. Damit übertreffen sie deutlich Leuchtstoffröhren, die 50 bis 80 Lumen pro Watt erzeugen.

Diese anorganischen LED sind annähernd Punktquellen, was beispielsweise für Anwendungen in PKW-Frontlichtern günstig ist. In der Beleuchtungstechnik sind jedoch in der Regel Flächenlichtstrahler gefragt. Hier ist die OLED auf der Basis organischer Halbleiter (Abbildung 1) als Flächenstrahler prädestiniert. Zudem bietet sie weitere attraktive Eigenschaften, wie hohe Qualität des Weißspektrums, Flexibilität und Transparenz. Das Funktionsprinzip ist analog zur anorganischen LED, wobei jedoch nur etwa 100 nm dünne und meist amorphe aktive Schichten verwendet werden. Das

weiße Licht wird durch additive Mischung der Spektren von unterschiedlich strahlenden Emittiermaterialien – meist rot, grün und blau – erreicht (Abbildung 1), so dass nahezu jede Farbe erzeugt werden kann.

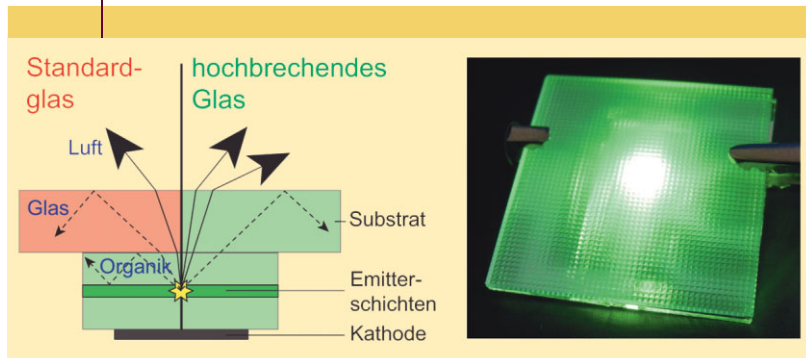
OLED auf Basis dünner Schichten wurden 1987 erstmals von Kodak vorgestellt und haben in letzter Zeit große Fortschritte gemacht. Dennoch müssen Effizienz, Stabilität und Kosten noch deutlich verbessert werden, um einen breiten Einsatz in der Beleuchtung zu ermöglichen.

Wie wir kürzlich zeigen konnten [1], lässt sich die Effizienz von weißen OLED mit einem neuartigen Design der Emitterschichten und der Verwendung eines Substrats mit einem hohen Brechungsindex auf 90 Lumen pro Watt steigern. Damit übertreffen sie Leuchtstoffröhren.

Um diese hohen Werte zu erreichen, kommen phosphoreszente Emittiermoleküle zum Einsatz, bei denen das Licht durch Rekombination in einem molekularen Triplett-Zustand entsteht. Diese Materialien ermöglichen eine hundertprozentige Rekombinationseffizienz von Elektronen und Löchern in OLED, wenn sie in ein Matrixmaterial eingebracht werden. Letzteres haben wir für den blauen, hochenergetischen Emittier so gewählt, dass beide resonant in ihren Triplett-Energien sind, was thermische Verluste minimiert. Dadurch wurden die Betriebsspannungen sehr niedrig gehalten: für 1000 Candela pro Quadratmeter, was 3- bis 4-mal heller ist als ein typischer Laptop-Schirm, betrug die Spannung 3 V, für das Zehnfache nur 4 V.

Die hochbrechenden Substrate ( $n = 1,78$ ) haben etwa denselben Brechungsindex wie die organischen Schichten und die transparente ITO-Anode. Dies führt dazu, dass das Dünnschichtsystem selbst kaum eine Wellenleiterwirkung hat und fast das gesamte Licht in das hochbrechende Glassubstrat ausgekoppelt wird (Abbildung 2). Durch ein strukturiertes Substrat (hier eine Pyramidenstruktur) kann dann ein erheblicher

ABB. 2 | MÖGLICHE LICHTWEGE



**Mögliche Wege des intern erzeugten Lichts, schematisch gezeigt für Standard- und hochbrechendes Glas. Man spricht hier von Luft-, Glas- und Organikmoden. Hat das Glas gleichen oder höheren Brechungsindex als die organischen Schichten, so wird Totalreflexion an der Organik-Glas-Grenzfläche unterbunden. Foto: Die im Text erwähnte Pyramidenstruktur, montiert auf einer grünen OLED.**

Teil des Lichts aus dem Substrat ausgekoppelt werden. Entscheidend ist auch, dass die Emitterschichten von der metallischen Kathode weiter entfernt sind, um Verluste durch Anregung von Plasmonen zu vermeiden. Hier ist die Verwendung dicker dotierter Transportschichten [3] entscheidend.

Trotz dieser Fortschritte sind noch weitere große Anstrengungen nötig: Es werden stabile tiefblaue phosphoreszente Emittersubstanzen benötigt, um akzeptable Lebensdauern von 10 000 Stunden und mehr zu erreichen und um das im vorliegenden Fall etwas zu gelbliche Licht an den gewünschten Farbpunkt zu verschieben. Weiterhin müssen die Produktionskosten deutlich sinken, was beispielsweise durch die sogenannte Rolle-zu-Rolle-Fertigung auf flexiblen Substraten möglich sein sollte. Hier konnten wir im Rahmen des BMBF-Projekts ROLLEX ([www.rollex-projekt.de](http://www.rollex-projekt.de)) bereits wesentliche Fortschritte erzielen.

### Literatur

- [1] S. Reineke et al., *Nature* **2009**, 459, 234.
- [2] Y. Narukawa et al., *Jap. J Appl. Phys. II* **2006**, 45, L1084.
- [3] J. Blochwitz et al., *Appl. Phys. Lett.* **1998**, 73, 729.

Sebastian Reineke, Björn Lüssem,  
Karl Leo, TU Dresden

### ATOMPHYSIK

## Element 112

*Der internationale Verband IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) hat offiziell anerkannt, dass das bislang schwerste Element mit der Ordnungszahl 112 am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt (GSI) entdeckt worden ist. Nun dürfen die Entdecker um Sigurd Hofmann einen Namen vorschlagen.*

Das erste Atom des Elements 112 hatten die Forscher bereits im Jahr 1996 am GSI-Beschleuniger erzeugt, ein zweites folgte im Jahr 2000. In nachfolgenden Experimenten im Beschleunigerlabor RIKEN in Japan konnten seitdem weitere Atome des Elements 112 nachgewiesen werden, welche die GSI-Entdeckung bestätigten.

Insgesamt konnten die Wissenschaftler am Beschleuniger des GSI Helmholtzzentrums seit 1981 sechs Elemente mit den Ordnungszahlen 107 bis 112 entdecken. Den bislang offiziell anerkannten Elementen 107 bis 111 hat die GSI bereits Namen gegeben: Bohrium für Element 107, Hassium (108), Meitnerium (109), Darmstadtium (110) und Roentgenium (111).

### WINDENERGIE

## Die Fundamente sind gesetzt

Am 1. Juni wurde das letzte von sechs Fundamenten für die Windturbinen des Typs AREVA Multibrid M5000 erfolgreich im Baufeld des ersten deutschen Offshore-Windparks verankert. Federführend für Bau und Errichtung der sechs Windturbinen, die sich 45 Kilometer vor der Insel Borkum befinden, ist die Multibrid GmbH. Jede der mehr als 700 Tonnen schweren Windkraftanlagen liefert 5 MW Leistung.

Der Bau der Windturbinen wird mit der Errichtung der einzelnen Turmsegmente fortgeführt, außerdem werden die Fundamente für sechs



**Abb. 1** Ein Schwimmkran positioniert einen Tripod für ein Windrad. Im Hintergrund links die Hubplattform Odin, rechts dahinter das Spannwerk (Foto: alpha ventus).

weitere Windenergieanlagen der REpower Systems AG gelegt. Die Energieunternehmen EWE, E.ON und Vattenfall betreiben gemeinsam das Projekt mit dem Namen alpha ventus.

Die laufenden Arbeiten auf hoher See können im Internet über eine Webcam verfolgt werden: [www.alpha-ventus.de](http://www.alpha-ventus.de).

TB

## NANOPHYSIK

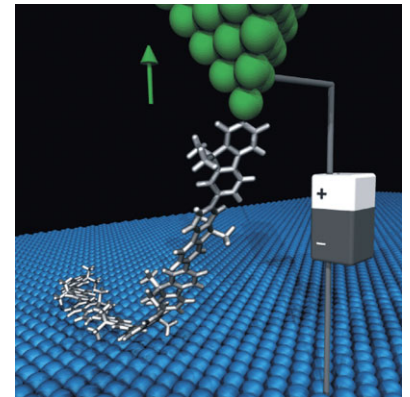
## Strommessung an einzelnen molekularen Drähten

Molekulare „Drähte“ aus einem einzigen linearen Molekül besitzen ein enormes Potenzial für zukünftige Anwendungen in der Nanotechnologie. Dabei stellt der Ladungstransport ein entscheidendes Kriterium für ihre Verwendung in dieser molekularen Elektronik dar. Unserer Gruppe an der Freien Universität Berlin ist es erstmals gelungen, einen einzelnen molekularen Draht von einer Oberfläche hochzuziehen und den dabei durch den Draht fließenden Strom in Abhängigkeit von der Länge zu messen. Dies liefert ein tieferes Verständnis der elektrischen, aber auch der mechanischen Eigenschaften solcher molekularen Drähte.

Durch die extrem geringen Abmessungen und die damit verbundenen Vorteile wie höhere Arbeitsgeschwindigkeit, niedrigere Kosten und geringerer Energieverbrauch könnten zukünftige technische Umsetzungen der Nanotechnologie eine Reihe von Anwendungen revolutionieren. Eine zentrale Vision ist der Aufbau elektronischer Schaltkreise auf der Nanometerskala. Die Entwicklung solcher faszinierenden Bauteile erfordert extrem dünne „Kabel“ – im Idealfall aus einem einzigen Molekül bestehend – und ein grundlegendes Verständnis des elektrischen Transports durch solche dünnen Drähte. Dafür ist es notwendig, elektrischen

Strom durch einzelne molekulare Drähte zu leiten, die an zwei Elektroden kontaktiert werden, und für verschiedene Drahtlängen zu charakterisieren.

Um die molekularen Drähte herzustellen, haben wir eine Methode entwickelt, mit der sich einzelne Moleküle auf einer Goldoberfläche zu einer konjugierten Polymerkette verknüpfen lassen [1]. Die Eigenschaften der einzelnen Bausteine, die Stefan Hecht und Mitarbeiter an der Humboldt-Universität zu Berlin hergestellt haben, wurden dabei so gewählt, dass die Polymerketten erstens durch chemische Seitengruppen von der Oberfläche angehoben



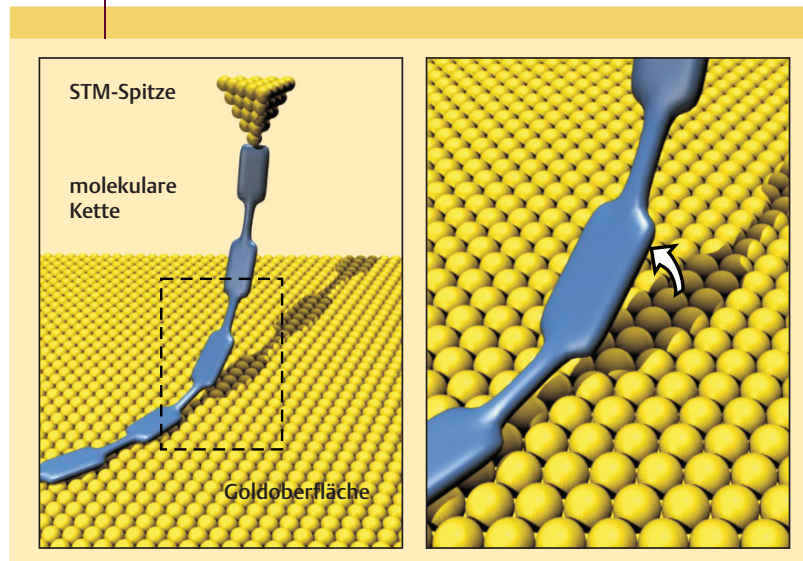
**ABB. 1** Ein an der Spitze (Grün) eines Rastertunnelmikroskops kontaktierter molekulare Draht (Grau) wird von der Goldoberfläche (Blau) hochgezogen. Dabei wird, wie durch eine Batterie symbolisch dargestellt, eine Spannung angelegt, die zu einem elektrischen Stromfluss durch ein einzelnes Polymer führt.

werden (und daher eine hohe Mobilität besitzen) und zweitens (ähnlich einem Seil) flexibel sind. Diese beiden Eigenschaften sind für die Experimente zum Ladungstransport (Abbildung 1) nötig.

In unserem Experiment haben wir ein Ende eines solchen molekularen Drahtes mit der metallischen Spitze eines Rastertunnelmikroskops kontaktiert, während das andere Ende auf der Metalloberfläche verblieb und dort wie ein flexibles Seil nachgezogen wurde. Anschließend zogen wir die Spitze hoch und variierten dadurch den Abstand zwischen den beiden Elektroden (Spitze und Oberfläche) kontinuierlich (Abbildung 2). Durch Anlegen einer Spannung zwischen den beiden Elektroden lässt sich auf diese Weise der Ladungstransfer durch ein einzelnes Polymer für variable Längen bis zu mehr als 20 nm messen [2].

Dabei wird der elektrische Leitwert  $G$  (der Kehrwert des elektrischen Widerstands) in Abhängigkeit von der Länge des molekularen Drahtes (der Teil zwischen den beiden Kontaktpunkten an der Spitze und der Oberfläche) gemessen. Die Messkurven zeigen einen exponentiellen Abfall mit der effektiven

**ABB. 2** MOLEKULARE KETTE



Die molekulare Kette lässt sich schrittweise von der Goldoberfläche abheben, wie der Ausschnitt rechts verdeutlicht.

Drahtlänge, mit deutlich unterschiedlicher Steigung als bei Tunnelstrom durch Vakuum (Abbildung 3).

Dieses Experiment zeigt den fundamentalen Unterschied von elektrischem Strom durch den molekularen Draht zu makroskopischem Ladungstransport, bei dem die lineare Abhängigkeit bei doppelter Länge zu doppeltem Widerstand führt. Diese Ergebnisse konnten Christian Joachim und Kollegen vom CEMES-CNRS in Toulouse mit theoretischen Rechnungen sehr gut bestätigen.

Neben der Charakterisierung der elektrischen Eigenschaften geben diese Experimente auch Einblick in das mechanische Verhalten einzelner Polymere, die sich wie Ketten verhalten, da ein Glied nach dem anderen während des Hochziehens von der Oberfläche losgelöst wird. Dieses Verhalten drückt sich durch periodische Oszillationen in der Kurve des elektrischen Leitwertes aus (Abbildung 3). Dabei kommt es in regelmä-

ßigen Abständen  $z_0$  zum Abfall des Leitwertes und darauffolgend zu einem Plateau. Im Moment des Ablöses (Abbildung 2) verlängert sich augenblicklich die effektive Länge des Drahtes. Dies macht sich natürlich als abrupter Abfall im Leitwert bemerkbar. Anschließend wird der nun etwas durchhängende Draht durch das kontinuierliche Hochziehen wieder gestrafft (in dieser Phase sinkt der Leitwert nur geringfügig), bis die Kraft ausreicht, um das nächste Glied von der Oberfläche abzulösen.

Da der elektrische Transport durch einzelne molekulare Drähte von großer Bedeutung für jede elektronische Anwendung in der molekularen Nanotechnologie ist, könnten sich in Zukunft auf diese Weise molekulare Drähte hinsichtlich ihrer Eignung für Anwendungen überprüfen lassen.

[1] L. Grill et al., Nature Nanotechnology **2007**, 2, 687.

[2] L. Lafferentz et al., Science **2009**, 323, 1193.

## ATOMPHYSIK

### Moleküle aus Rydberg-Atomen

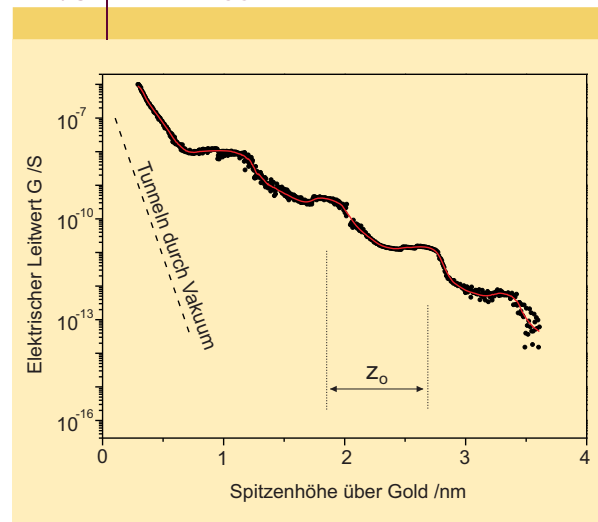
Die Eigenschaften und Wirkungsmechanismen der wichtigsten chemischen Bindungstypen wie kovalent oder ionisch sind seit langem bekannt. Unserer Gruppe an der Universität Stuttgart gelang es kürzlich erstmals, ein Molekül aus zwei Rubidiumatomen zu erzeugen, das mit 100 nm nicht nur außergewöhnlich groß ist, sondern darüber hinaus von einem neuartigen Bindungsmechanismus zusammengehalten wird [1].

Anziehung durch elektrische Polarisation ist ein gut verstandenes Gebiet der Physik: Durch ein äußeres elektrisches Feld werden in Materie die beweglichen Elektronen gegen die positiven Atomrümpfe verschoben (Abbildung 1). Es entsteht ein Dipolmoment  $d$ , durch das die Materie von einer elektrischen Ladung angezogen wird. Auf diesem Effekt basiert auch ein im Jahr 2000 von Chris Greene (JILA und Universität von Colorado, Boulder) theoretisch vorhergesagter molekularer Bindungsmechanismus

[2], der nun von uns experimentell nachgewiesen wurde.

Es war lange Zeit umstritten, ob der von Greene vorgeschlagene Bindungstyp überhaupt funktioniert, denn überraschenderweise kann ein einzelnes polarisiertes Atom, abhängig vom chemischen Element, von einem Elektron auch abgestoßen werden. Dies erkannte Enrico Fermi bereits 1934, als er mit der von ihm entwickelten Pseudopotential-Methode diese Wechselwirkung als quantenmechanische Streuung

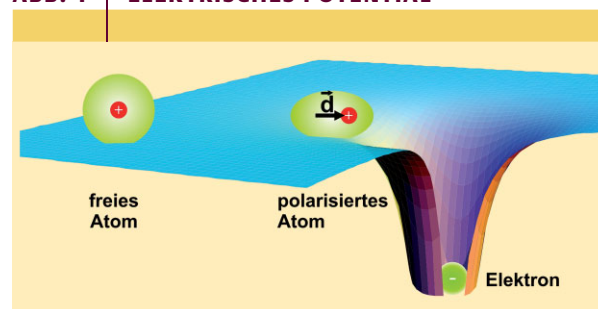
ABB. 3 ELEKTRISCHER LEITWERT



Der elektrische Leitwert fällt mit zunehmender Länge des molekularen Drahtes. Das schrittweise Ablösen der molekularen Einheiten von der Oberfläche führt dabei zu Oszillationen in der Messkurve. Der charakteristische Abstand  $z_0$  ergibt sich aus der chemischen Struktur des Polymers.

Leif Lafferentz, Leonbard Grill,  
Freie Universität Berlin

ABB. 1 ELEKTRISCHES POTENTIAL

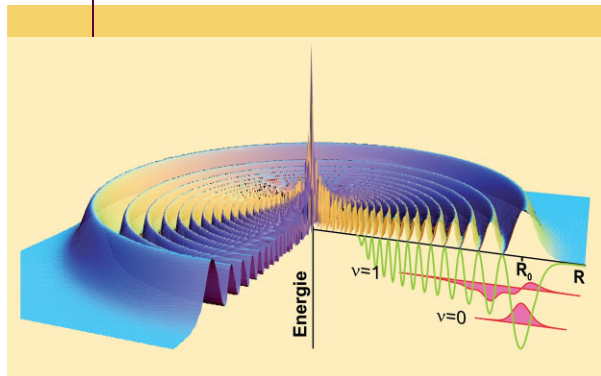


Für große Abstände zwischen Atom und Elektron ist die Ladungsverteilung des Atoms symmetrisch (links), für kleine Abstände wird es hingegen polarisiert: Es entsteht ein Dipolmoment  $d$ , und das Atom wird zum Elektron gezogen (rechts).

beschrieb. Doch wie kann ein kurzzeitiger Prozess wie eine Streuung eine lang anhaltende Molekülbinding begründen?

Streut man ein Elektron an einem Atom, so wird das Atom zwar vom Elektron angezogen, jedoch ist das Elektron viel zu schnell, als dass ihm das Atom folgen könnte. Die Lösung für eine Bindung ist verblüffend einfach: Durch einen sich ständig

ABB. 2 AUFENTHALTS-WAHRSCHEINLICHSICHTDICHTE

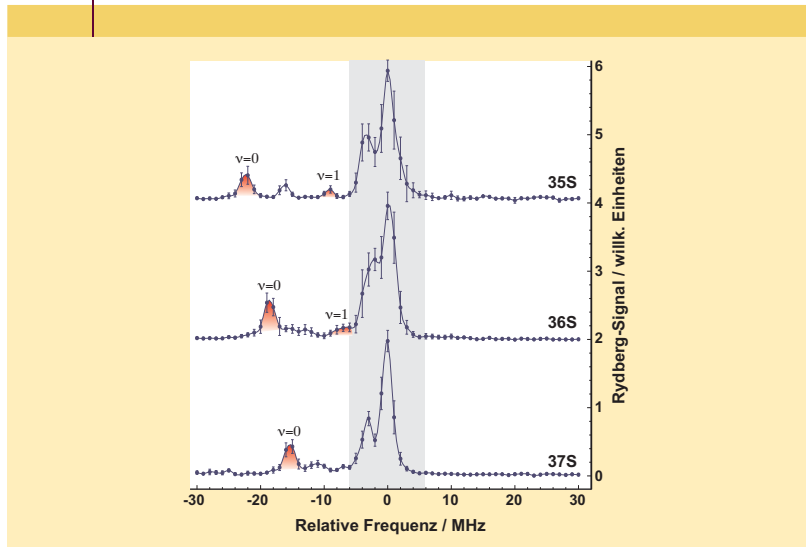


Das Oberflächendiagramm zeigt die kugelsymmetrische Aufenthaltswahrscheinlichkeitsdichte des Rydberg-Elektrons für den 35S-Zustand von Rubidium. Das Potential für ein Grundzustandsatom (Grün) ist dort am tiefsten, wo die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Elektrons am größten ist – im Abstand  $R_0$ . Außer dem molekularen Grundzustand  $\nu = 0$  existiert noch ein angeregter Schwingungszustand  $\nu = 1$ .

wiederholenden Streuprozess. Dies kann man erreichen, indem man ein Elektron, das sich semiklassisch betrachtet auf einer festen Bahn bewegt, mit einem Atom streut. Möglich ist dies in einem hochangeregten Rydberg-Zustand, in dem sich das Elektron auf einer nahezu klassischen Kreisbahn mit einem Radius von etwa 100 nm um den Atomrumpf bewegt. Bringt man nun ein polarisierbares Atom in die Nähe dieser Umlaufbahn, so wird es durch die Streuung am Elektron in Richtung der Bahn gezogen. Das Elektron hingegen wird hierbei kaum beeinflusst und bewegt sich weiterhin auf seiner Umlaufbahn. Da das Elektron den Atomrumpf 150 Milliarden Mal pro Sekunde umkreist, wird das Atom auf seiner Umlaufbahn ständig aufs Neue polarisiert, da sich der Streuprozess bei jedem Umlauf des Elektrons wiederholt. Somit kann das Elektron das Atom an seine Bahn binden.

Quantenmechanisch korrekt werden Form und Tiefe des Molekülpotentials beschrieben, wenn man das punktförmige Elektron auf seiner klassischen Bahn durch die Aufenthaltswahrscheinlichkeitsdichte des Rydberg-Elektrons ersetzt (Abbildung 2). Der zweite Beitrag zur Bindungsstärke ist die Streulänge  $a_0$  des

ABB. 3 RYDBERG-SPEKTROSKOPIE



Spektrum der Anregung von Rubidiumatomen in verschiedene Rydberg-Zustände. Die Anregung in den atomaren Zustand findet bei den grau hinterlegten Frequenzen statt. Für die rot gefärbten Linien bei negativer Verstimmung werden die Molekülzustände angeregt. Neben dem Grundzustand ( $\nu = 0$ ) existieren auch angeregte Schwingungszustände ( $\nu = 1$ )

Grundzustandsatoms. Sie ist ein Maß für die Wechselwirkungsstärke des Stoßprozesses und ist negativ für anziehende und positiv für abstoßende Streuung. Während die Eigenschaften der Rydberg-Atome theoretisch und experimentell bekannt sind, gab es bisher keine experimentellen Werte der Streulänge  $a_0$  eines Rubidiumatoms. Die theoretischen Berechnungen variieren von  $-0,6$  nm bis  $-0,8$  nm.

Um die Moleküle zu erzeugen, fangen wir zunächst etwa drei Millionen Rubidiumatome ein und kühlen sie auf eine Temperatur von  $3,5 \mu\text{K}$ . Mit einem kurzen resonanten Laserpuls regen wir dann einen Teil der Atome in den Rydberg-Zustand an (grauer Bereich in Abbildung 3). Verstimmen wir den Laser zu niedrigeren Frequenzen, so regen wir die Molekülzustände an (rote Bereiche in Abbildung 3), da deren Energie geringer ist, als die der ungebundenen Rydberg-Atome.

Im Spektrum treten neben der Linie für die Anregung in den molekularen Grundzustand ( $\nu = 0$ ) (Abbildung 2) weitere Linien auf, die wir angeregten Schwingungszuständen des Rydberg-Moleküls zuordnen.

Neben dem erstmaligen Nachweis dieses neuartigen Bindungsmechanismus, der ausschließlich auf Streuung beruht, konnten wir durch unsere Messungen auch erstmals die Streulänge von Rubidium bestimmen. Sie beträgt  $-1$  nm und ist damit größer, als theoretisch vorhergesagt. Die noch nicht zugeordneten Linien im Spektrum sind ein eindeutiges Indiz dafür, dass die einfache Theorie noch keine vollständige Erklärung liefert und eine Erweiterung des Modells nötig ist.

Prinzipiell ist dieser Bindungsmechanismus nicht auf zweiatomige Moleküle beschränkt. Falls sich ein weiteres Atom auf der Umlaufbahn des Elektrons befindet, bildet sich möglicherweise ein dreiatomiges Molekül. Die Suche nach solchen Trimer-Zuständen ist das nächste Ziel in unserem Experiment.

### Literatur

- [1] V. Bendkowsky et. al., Nature **2009**, 458, 1005
- [2] C. Greene et. al., Phys. Rev. Lett. **2000**, 85, 2458

Björn Butscher, Vera Bendkowsky,  
Tilman Pfau, Uni Stuttgart

## ATOMPHYSIK

## Neues Radon-Isotop entdeckt

Mit Penning-Ionenfallen lassen sich kurzlebige Radionuklide speichern und ihre Massen mit höchster Genauigkeit bestimmen [1]. Die präzisen Massenwerte gehen in Kernstruktur-Untersuchungen und Tests der fundamentalen Wechselwirkungen sowie in die Modelle der stellaren Nukleosynthese ein. Kürzlich gelang es der internationalen ISOLTRAP-Kollaboration mit Mitgliedern der Universitäten Greifswald und Mainz sowie des Max-Planck-Instituts für Kernphysik in Heidelberg und des Helmholtzzentrums für Schwerionenforschung in Darmstadt (GSI), das Isotop  $^{229}\text{Rn}$  mit einer „punktgenauen“ massenspektrometrischen Messung zu entdecken.

Die erstmalige Beobachtung von  $^{229}\text{Rn}$  erfolgte im Zusammenhang mit Massenuntersuchungen neutronenreicher Radon-Isotope mit dem Penning-Fallen-Massenspektrometer ISOLTRAP [2] am CERN. Von den Radon-Isotopen mit den Massenzahlen  $A = 223$  bis  $228$  waren schon einige Eigenschaften gemessen, nicht jedoch ihre Massen.

Die Massen der Nuklide werden üblicherweise als „Massenexzesse“ angegeben. Dabei handelt es sich um die Differenzen von den zugehörigen ganzzahligen Vielfachen der Atomaren Einheiten (definiert als  $1/12$  der Atommasse des Isotops  $^{12}\text{C}$ ), angegeben über  $E = mc^2$  in Energieeinheiten von Kiloelektronenvolt (keV). Die früher lediglich geschätzten Werte der Kernmassen für  $A = 223$  bis  $228$  konnten bestätigt und in ihrer Genauigkeit um einen Faktor von etwa 20 verbessert werden.

Je weiter man sich vom Gebiet der stabileren Isotope entfernt ( $^{222}\text{Rn}$  hat als langlebigstes Isotop eine Halbwertszeit von etwa vier Tagen), desto kleiner wird die Teilchenzahl, die der On-Line-Isotopenseparator für Radionuklide ISOLDE produzieren und zur Verfügung stellen kann. Im Falle von  $^{228}\text{Rn}$  waren es nur einige hundert Teilchen pro Sekunde. Würde die Ionenzahl auch für das nächste Isotop ausreichen? Und wo sollte seine Masse liegen?

Die Massenwerte der bekannten Isotope können linear extrapoliert werden, wobei die Abschätzung zu einer Punktlandung führte. Tatsäch-

lich konnte das Isotop  $^{229}\text{Rn}$  produziert und dessen Masse mit einer Genauigkeit von  $6 \cdot 10^{-8}$  bestimmt werden [3]. Die ebenfalls erstmalig bestimmte Halbwertszeit von 12 Sekunden hat eine Unsicherheit von 10 %.

Diese neuen Ergebnisse gehen unter anderem auch wesentlich auf die hervorragenden Produktionsverhältnisse an ISOLDE für Edelgasnuklide zurück. Im laufenden Jahr sollen die Messungen an neutronenreichen Argon-, Krypton- und Xenon-Isotopen fortgesetzt werden. Vielleicht gelingt so ein weiteres Mal die Entdeckung eines neuen Isotops mit der Präzisionsmassenspektrometrie.

### Literatur

- [1] K. Blaum et al., Physik in unserer Zeit **2002**, 33(5), 208; L. Schweikhard et al., Physik in unserer Zeit **2005**, 36(3), 113; S. George et al. Physik in unserer Zeit **2007**, 38(4), 163.
- [2] M. Mukherjee et al., Eur. Phys. J. A **2008**, 35, 1.
- [3] D. Neidherr et al., Phys. Rev. Lett. **2009**, 102, 112501.

Lutz Schweikhard, Uni Greifswald;  
Dennis Neidherr, Uni Mainz;  
Klaus Blaum  
MPI für Kernphysik, Heidelberg

## PHYSICS NEWS

Die Verschränkung von mechanischen Schwingungszuständen gepaarter Ionen ist einer Gruppe um John Jost vom National Institute of Standards and Technology in Boulder, USA, gelungen. Hierfür sperrten sie in einer Paul-Falle zwei Ionenpaare ein, die jeweils aus einem Beryllium- und einem Magnesium-Ion bestanden. Jedes Ion kann als mechanischer Oszillator angesehen werden, deren Schwingungen die Physiker mit Laserstrahlen verschränken konnten (J. D. Jost et al., Nature **2009**, 459, 683).

+++

Wasser-Dampf-Strömungen bei 50 atm Druck und von 264 °C haben Physiker am Forschungszentrum Dresden-Rossendorf (FZD) mit Hochgeschwindigkeitskameras erstmals beobachtet. Die Experimente dienen der Sicherheit von Kernreaktoren, denn solche Strömungen würden beispielsweise im Primärkreislauf von Druckwasser-Reaktoren auftreten, wenn es zu einem Leckstörfall käme (www.fzd.de/db/Cms?pNid=473&pOid=28458).

+++

Natürliche Spinnenfäden werden haltbarer, wenn man sie mit Metallionen dotiert. Das hat ein Team um Mato Knez vom Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik in Halle herausgefunden. Ein Spinnenfaden, den sie beispielsweise mit Aluminium-Ionen beschossen hatten, ließ sich anschließend doppelt so stark dehnen wie ein natürlicher Spinnenfaden. Die Forscher vermuten, dass die Metallatome Proteinmoleküle untereinander stärker verbinden als die Wasserstoffatome, die normalerweise hierfür verantwortlich sind. Möglicherweise lässt sich das Verfahren auf synthetische Materialien übertragen und kann damit den Weg in die Anwendung finden (Seung-Mo Lee et al., Science **2009**, 324, 488.)

+++

Den Ursprung diffuser Röntgenstrahlung aus der Milchstraße konnten Astrophysiker jetzt klären. Seit rund 25 Jahren rätselten Astrophysiker über deren Ursprung. Mit Beobachtungen des Röntgenteleskops Chandra und des Infrarotteleskops Spitzer konnte ein Team um Mikhail Revnivtsev von der TU München das Strahlungsfeld in Einzelquellen auflösen. Demnach stammt die Strahlung überwiegend von Weiße Zwergen, die Materie aus ihrer Umgebung ansaugen, sowie von Sternen mit einer hohen Aktivität ihrer äußersten Atmosphäre, der Korona (Nature Mikhail Revnivtsev et al., **2009**, 458, 1142).

+++

Die stärkste Laseranlage der Welt beginnt mit neuen Experimenten. In der National Ignition Facility (NIF) des Lawrence Livermore National Laboratory in Kalifornien werden 192 gepulste Laserstrahlen mit einer Gesamtenergie von 1,8 MJ in einem Punkt zusammengeführt. Die Experimente dienen zum Teil der Fusionsforschung. Andere experimentelle Ergebnisse unterstützen Computersimulationen von Atombombenexplosionen (lasers.llnl.gov).

## Das Windfahrzeug InVentus Ventomobil

# Mit dem Wind gegen den Wind

JAN LEHMANN | MARTIN KÜHN

*Windenergie erzeugt heute vor allem elektrischen Strom. Könnte sie auch Fahrzeuge antreiben, die sich unabhängig von der Windrichtung bewegen? Im Prinzip funktioniert es. Das bewies das erste internationale Windmobil-Rennen Aeolus Race. Hier stellen wir den Sieger vor.*

An der Universität Stuttgart bauten wir ein Fahrzeug, das ausschließlich mit der Kraft des Windes fährt. Es entstand im Herbst 2007 im Rahmen von Diplom- und Studienarbeiten am Stiftungslehrstuhl Windenergie. Um die beiden Diplomanden Jan Lehmann und Alexander Miller formte sich ein Team von über zwanzig Studierenden, die einen großen Teil ihrer Freizeit in das Projekt investierten. Ihr windgetriebenes Fahrzeug sollte möglichst schnell gegen den Wind fahren können, ohne wie ein Segelboot kreuzen zu müssen. Denn erst wenn die Fahrtrichtung von der Windrichtung unabhängig ist, kann so ein Fahrzeug sich im Prinzip auf einer Straße fortbewegen. Entsprechend besitzt unser Ventomobil kein Segel, sondern einen in den Wind drehbaren Rotor.

Mit dem Ventomobil nahm unser InVentus-Team im August 2008 am ersten internationalen Rennen für windgetriebene Fahrzeuge in den Niederlanden teil. Beim Aeolus Race in Den Helder traten Fahrzeuge aus ganz Europa gegeneinander an. Wir konnten mit deutlichem Abstand zur Konkurrenz siegen und erhielten den Preis für das schnellste Fahrzeug und das innovativste Design.

## Drei Konzepte

Entscheidend für die Entwicklung eines Windmobils ist die Wahl des Rotorkonzeptes. Prinzipiell stehen drei verschiedene Möglichkeiten der Energieumwandlung zur Verfügung, die alle auf dem Aeolus Race vertreten waren.

Erstens kann man eine moderne, schnell laufende Windenergieanlage mit horizontaler Achse verwenden, ähnlich vielen heutigen Anlagen zur Elektrizitätserzeugung. Die wenigen Rotorblätter dieser Windenergieanlagen laufen mit mehreren hundert Umdrehungen

pro Minute. Obwohl die Gesamtfläche der Rotorblätter nur wenige Prozent der Rotorfläche abdeckt, ist die den Wind abbremsende Kraft – der Schub – fast so groß wie die aerodynamische Widerstandskraft einer geschlossenen Kreisscheibe mit demselben Durchmesser. Grund dafür ist die Aerodynamik der Rotorblätter. Windkraftanlagen dieses Typs haben einen sehr hohen Leistungsbeiwert von gut 50 %, müssen jedoch immer in die Windrichtung ausgerichtet werden. Der Leistungsbeiwert ist das Verhältnis aus aerodynamischer Leistung der Anlage zur (kinetischen) Leistung des Windes. Er ist also eine Art Wirkungsgrad, der aus physikalischen Gründen 59 % nicht übersteigen kann.

Alternativ kann man eine langsam drehende Windkraftanlage mit horizontaler Achse wählen. Diese „Windpumpe“ erreichen vergleichsweise geringe Anströmgeschwindigkeiten an den Rotorblättern. Deshalb benötigen sie relativ viele Blätter mit großer Fläche, um den Wind optimal abzubremsen. Für ein Windmobil jedoch bieten die geringere Drehzahl und ein hohes Drehmoment beim Anlaufen Vorteile. Während des Rennens stellte sich jedoch heraus, dass der wegen bauartbedingter aerodynamischer Verluste geringere Leistungsbeiwert von etwa 30 % diese Vorteile zunichte macht.

Die dritte Alternative ist ein Darrieus-Rotor, eine „liegende“ Windkraftanlage mit einer vertikalen Drehachse. Der für ein Fahrzeug besonders geeignete H-Darrieus besitzt vertikal aufgestellte Rotorblätter, die Kragarme mit der Drehachse verbinden. Im Querschnitt erinnert er an ein „H“. Auch er bremst den Wind mit aerodynamisch geformten Blattprofilen ab und wandelt so dessen kinetische Energie in mechanische Rotationsenergie um. Der Leistungsbeiwert eines Darrieus-Rotors liegt mit etwa 40 % zwar etwas unter dem einer schnellläufigen Horizontalachs-Windkraftanlage. Durch seine Windrichtungsunabhängigkeit und die Lage der Achse bietet er aber andere Vorteile. Er benötigt keine Windrichtungsnachführung, und wegen seines „rechteckigen“ Querschnitts kann er bei gleicher Höhe und Breite eine größere Rotorfläche nutzen als die aufrecht stehenden Rotoren. Deren maximale Außenmaße gibt nämlich das Reglement des Aeolus Race vor.

## Theorie

Bei näherer Überlegung erkennt man schnell, wie sinnvoll es ist, die Rotorblätter speziell für die fahrende Windkraftanlage auszulegen. Ausgangspunkt ist die elementare Aerodynamik von Windenergieanlagen [1]. Diese bremsen die

### INTERNET

Windenergie an der Uni Stuttgart  
[www.uni-stuttgart.de/windenergie](http://www.uni-stuttgart.de/windenergie)

InVentus  
[www.inventus.uni-stuttgart.de](http://www.inventus.uni-stuttgart.de)

Aeolus Race  
[www.windenergyevents.com](http://www.windenergyevents.com)

ungestörte Windgeschwindigkeit  $v_1$  weit vor dem Fahrzeug auf  $v_2$  am Rotor und letztendlich auf  $v_3$  weit hinter dem Mobil ab. Bei einer gegen den Wind fahrenden Turbine (Abbildung 1) wachsen diese drei Geschwindigkeiten  $v_{in\ i}$  ( $i = 1, 2, 3$ ) im mitbewegten Bezugssystem jeweils um die Fahrgeschwindigkeit  $v_{car}$ :

$$v_{in\ i} = v_i + v_{car} \tag{1}$$

Abhängig von Wind- und Fahrgeschwindigkeit können wir die aerodynamische Leistung  $P_{WT}$  und den Schub  $S_{car}$  der Windturbine berechnen. Beide hängen vom Abbremsungsverhältnis  $v_{in3}/v_{in1}$ , der Luftdichte  $\rho$  und der überstrichenen Rotorfläche  $A$  ab (Herleitung siehe [1]):

$$P_{WT} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_{in1}^3 \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot \left( 1 + \frac{v_{in3}}{v_{in1}} \right) \cdot \left( 1 - \frac{v_{in3}}{v_{in1}} \right)^2 \right], \tag{2}$$

$$S_{car} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_{in1}^2 \cdot \left( 1 + \frac{v_{in3}}{v_{in1}} \right) \cdot \left( 1 - \frac{v_{in3}}{v_{in1}} \right). \tag{3}$$

Zum Fahren gegen den Wind muss man den Schub als Gegenkraft ständig überwinden. Diese zusätzlich nötige Antriebsleistung setzt sich aus dem Produkt aus Schub und Fahrgeschwindigkeit zusammen:

$$P_S = S_{car} \cdot v_{car} \tag{4}$$

Zum Fahren muss das Windmobil die Verlustleistungen  $P_S$  aus dem Schub  $S$ ,  $P_{Fr}$  aus dem Rollwiderstand  $F_r$  und  $P_{Fa}$  aus dem Luftwiderstand  $F_a$  überwinden (rot gestrichelte Kurve in Abbildung 2). Alle Leistungskomponenten hängen unterschiedlich von der Fahrgeschwindigkeit  $v_{car}$  ab. Abbildung 2 zeigt zudem für den Fall einer konstanten Windgeschwindigkeit  $v_1$  zwei Dinge: Erstens muss das Windmobil beim Anfahren nur geringe Widerstände überwinden, zweitens gibt es für eine bestimmte Windgeschwindigkeit  $v_1$  eine maximal erreichbare Fahrgeschwindigkeit, bis zu welcher das Fahrzeug beschleunigt. Bei diesem Wert von  $v_{car}$  gilt:

$$P_S + P_{Fr} + P_{Fa} = P_{WT} \cdot \eta \tag{5}$$

Dabei ist  $\eta$  der Wirkungsgrad des reibungsbehafteten Triebstrangs, der im realen Windmobil die am Rad ankommende aerodynamische Leistung um diesen Faktor senkt. Mit (4) und

$$P_{Fr} = F_r \cdot v_{car} \text{ sowie } P_{Fa} = F_a \cdot v_{car}$$

folgt aus (5) für die erreichbare Geschwindigkeit des Fahrzeugs:

$$v_{car} = \frac{P_{WT} \cdot \eta}{S_{car} + F_r + F_a} \tag{6}$$



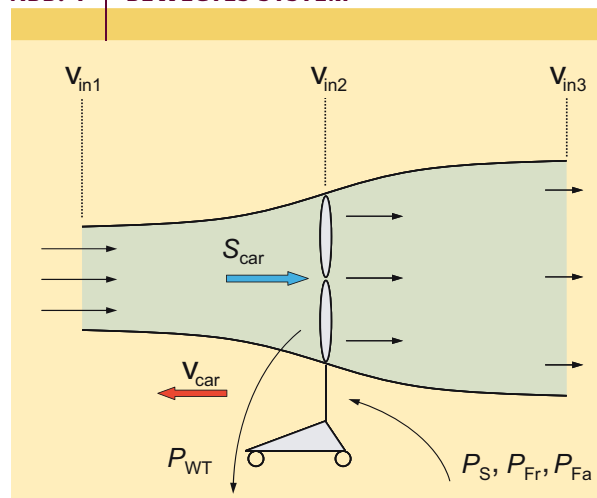
Das Stuttgarter InVentus Ventomobil (vorne) und das niederländische ECN Impulse am Start in Den Helder (Foto: T. Klaus).

$$= \frac{P_{WT}}{S_{car}} \cdot \eta \cdot \frac{1}{1 + \frac{F_r + F_a}{S_{car}}}$$

Den Rotor unseres Ventomobils legten wir aerodynamisch so aus, dass wir nicht wie bei einer normalen Windenergieanlage die Leistung optimierten, sondern die Fahrgeschwindigkeit [2]. Dazu setzten wir unter anderem eine Simulationssoftware für horizontale Windkraftanlagen ein. Die Fahrgeschwindigkeit ist umso größer, je höher das Verhältnis der aerodynamischen Rotorleistung  $P_{WT}$  zur Verlustleistung  $P_S$  durch den Schub ist.

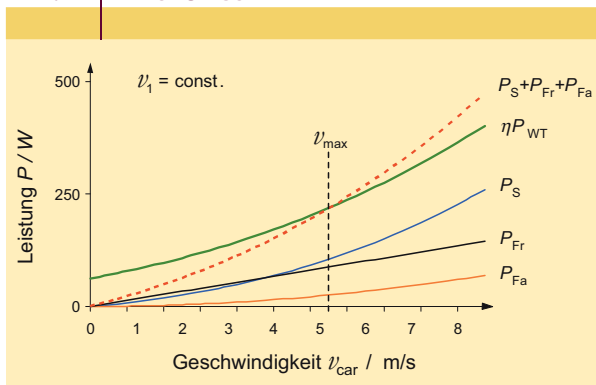
Im Vergleich zu einer feststehenden Windkraftanlage kamen wir so auf eine kleinere Zahl von nur zwei Rotor-

ABB. 1 | BEWEGTES SYSTEM



Windgeschwindigkeiten im Bezugssystem des Ventomobils, das mit  $v_{car}$  fährt. Zudem sind der Schub  $S_{car}$ , die durch diesen verursachte Verlustleistung  $P_S$ , die aerodynamische Leistung  $P_{WT}$  sowie die Verlustleistungen aus Rollreibung  $P_{Fr}$  und Luftwiderstand  $P_{Fa}$  angedeutet.

**ABB. 2 LEISTUNGSBILANZ**



**Abhängigkeit der unterschiedlichen Leistungen, die am Fahrzeug wirken, von der Fahrtgeschwindigkeit  $v_{car}$  bei gegebener Windgeschwindigkeit  $v_1$ . Verlustleistungen:  $P_S$  durch den Schub,  $P_{Fr}$  durch den Rollwiderstand,  $P_{Fa}$  durch den Luftwiderstand.  $P_{WT}$  aerodynamische Leistung,  $\eta$  Wirkungsgrad des Antriebstrangs.**

blättern und eine geringere Breite der Blätter (Blatttiefe). Das reduziert den bremsenden Schub stark, senkt aber die Rotorleistung im Verhältnis wenig. Als Konsequenz steigt das Verhältnis von Leistungs- zu Schubbeiwert, also die Beziehung zwischen dimensionsloser Leistung und Schub, und damit die maximal erreichbare Fahrgeschwindigkeit.

Um das zu zeigen, müssen wir noch zwei Größen einführen. Das Verhältnis aus aerodynamischer Leistung zur Leistung im Wind beschreibt der Leistungsbeiwert

$$c_p = \frac{P_{WT}}{\frac{\rho}{2} \cdot A \cdot v_{in 1}^3}, \quad (7)$$

und das Verhältnis aus Schub zu Staudruck mal Rotorfläche  $A$  ergibt den Schubbeiwert



**Abb. 3 Das InVentus Ventomobil ohne Verkleidung**  
(Foto: T. Klaus).

$$c_s = \frac{S_{car}}{\frac{\rho}{2} \cdot A \cdot v_{in 1}^2}. \quad (8)$$

Setzen wir  $c_p$  und  $c_s$  und für  $P_{WT}$  und  $S_{car}$  die Ausdrücke (2) und (3) in Gleichung (6) ein und kürzen dann den Schub  $S_{car}$  heraus, so erhalten wir die gesuchte Beziehung:

$$v_{car} = \frac{c_p}{c_s} \cdot \eta \cdot \frac{1}{1 + \frac{F_r + F_a}{S_{car}}} \cdot v_{in 1}. \quad (9)$$

Auch wenn Gleichung (9) noch implizit von  $v_{car}$  abhängt, erkennen wir die wesentlichen Einflussgrößen. Die Fahrgeschwindigkeit lässt sich demnach durch ein hohes Verhältnis aus Leistungs- zu Schubbeiwert, einen guten mechanischen Wirkungsgrad sowie geringen Luftwiderstand und niedriger Rollreibung des Fahrzeugs maximieren.

### Triebstrang und Fahrgestell

Für die Effizienz eines windgetriebenen Fahrzeugs ist es wichtig, dass die Energie vom Rotor auf das Rad unter möglichst geringen Verlusten übertragen wird. Zwei besonders naheliegende Konzepte sind die elektrische und die mechanische Übertragung. Die elektromechanische Wandlung benötigt einen Generator, der dann wieder über einen Elektromotor die Räder antreibt. Eine Leistungselektronik ermöglicht die Unabhängigkeit der Motordrehzahl von der Rotordrehzahl, vergleichbar mit modernen drehzahlvariablen Windenergieanlagen. Dadurch kann der Rotor im optimalen Punkt der Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie laufen. Bei Einsatz hochwertiger Komponenten erreicht zudem die elektromechanische Wandlung einen sehr hohen Wirkungsgrad  $\eta$ .

Trotzdem entschieden wir uns beim Stuttgarter Ventomobil für eine mechanische Kraftübertragung, weil sie konstruktiv einfacher ist. Bei ihr überträgt eine Welle im Turm oder ein Treibriemen das Rotordrehmoment direkt auf die Antriebsräder. Ein Schaltgetriebe erlaubt die Regelung der Rotordrehzahl – allerdings in bestimmten Grenzen und Schrittweiten. Dieses Prinzip ist sehr übersichtlich, und Fehler können schnell gefunden und behoben werden. Der Wirkungsgrad ist jedoch relativ schlecht, auch die Regelbarkeit ist begrenzt.

Für die Stabilität des Fahrzeuges ist die Anzahl der Räder entscheidend. Durch den Rotorschub und den Luftwiderstand kann es entweder über seine Hinterachse oder bei Schräganströmung um seine Seitenachsen kippen. Dieses Problem wächst mit der Wind- und der Fahrgeschwindigkeit. Ihm wirkt das Gewicht von Fahrer und Fahrzeug entgegen. Der Schwerpunkt sollte dabei möglichst weit von den Kippachsen entfernt liegen. Ein Vierrad oder ein Dreirad mit dem einzelnen Vorderrad sind um die Hinterachse, wo der Rotor sitzt, gleich stabil.

Der Schwerpunkt sollte möglichst weit vorne liegen, um die Stabilität weiter zu erhöhen. Hinsichtlich der Stabilität um die Seitenachse ist das Vierrad etwas überlegen,

denn bei ihm lässt sich der Schwerpunkt in größerem Abstand zu den seitlichen Kippachsen anordnen. Dreiräder mit einem Vorderrad haben allerdings den Vorteil einer einfacheren Bauweise der Lenkung, weshalb wir uns in Stuttgart dafür entschieden. Denkbar ist noch ein Dreirad mit einem Rad hinten. Das hat jedoch bei hinten angeordnetem Rotor eine sehr viel schlechtere Kippstabilität, da der Schwerpunkt sehr nahe an den Kippachsen liegt.

Beim Aeolus Race traten alle Konzepte gegeneinander an. Unter den Windverhältnissen im Rennen wurde das Kippen für Dreiräder mit einem Vorderrad noch nicht kritisch.

### Entwicklung des Ventomobils

Da wir mit unserem Ventomobil entwicklerisches Neuland betraten, wollten wir eine möglichst große Modularität bei allen Komponenten erreichen. Dadurch konnten wir Komponenten, die sich als ungünstig erwiesen, schnell durch Alternativen ersetzen und zudem verschiedene Konzepte testen. Außerdem bevorzugten wir bereits etablierte Lösungen, da die Entwicklungszeit kurz sein musste. Wegen des hohen Wirkungsgrades und der großen Datenbasis entschieden wir uns für einen Rotor mit horizontaler Achse. Seine Blätter können wie bei großen Windkraftanlagen um die Blattlängsachse in oder aus dem Wind gedreht (gepitcht) werden. Damit können wir ein höheres Anfahrmoment erzeugen und bei maximaler Windgeschwindigkeit die Leistung begrenzen, um den Triebstrang nicht zu überlasten.

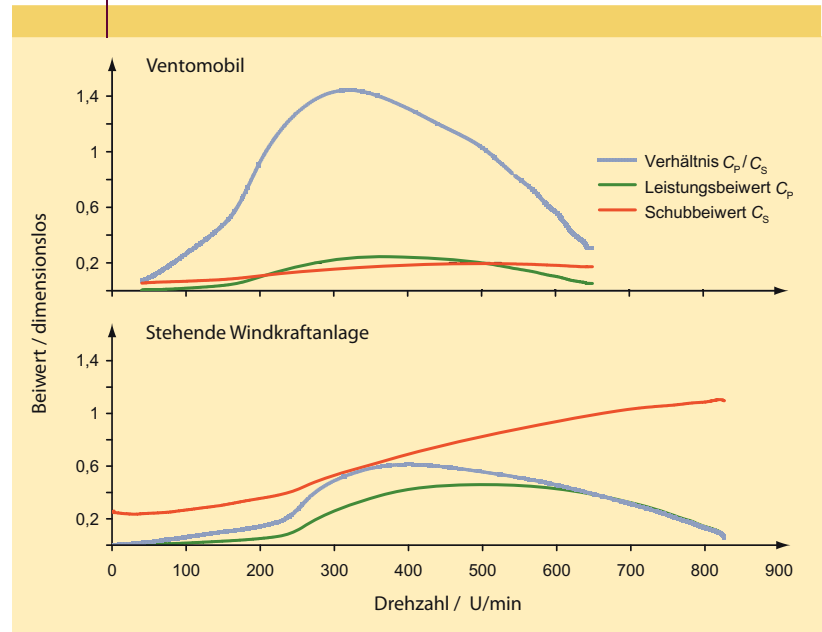
Die Windkraft am Rotor wird im Turmkopf über einen Kegelradsatz in eine Turmwelle umgelenkt. Am Turmfuß überträgt sie ein Winkelgetriebe über eine Fahrradkette an die Hinterräder. Mit einer Fahrradkettenschaltung kann der Fahrer die Rotordrehzahl an unterschiedliche Fahrgeschwindigkeiten anpassen. Ändert der Wind seine Richtung, dann richtet man über einen Giermechanismus den Rotor danach aus. So ist es möglich, sogar bei Seiten- und Rückenwind zu fahren. Bei Rückenwind fährt das Ventomobil allerdings langsamer als bei Gegenwind!

Dank des am Institut für Flugzeugbau der Universität Stuttgart vorhandenen Knowhows konnten wir das komplette Fahrzeug in Leichtbauweise auslegen. Kohlefaserverbundmaterial sorgt bei Rahmen, Rotorblättern und Verkleidung für ein sehr leichtes und trotzdem stabiles Grundgerüst. Die restlichen mechanischen Komponenten sind größtenteils aus Aluminium hergestellt.

Kohlefaser ist mehr als viermal leichter als Stahl und weist trotzdem eine vielfach höhere Festigkeit auf. Den Rahmen stellten wir in Preform-Bauweise her, bei dem man die Kohlefasern zunächst trocken um eine Form legt. Für Letztere verwendeten wir Schaumkerne. Am Schluss wird in das Kohlefasergeflecht um die Kerne durch Vakuuminfiltration Epoxydharzes injiziert. Das gibt den Bauteilen ihre endgültige Festigkeit. Die so entstandenen Streben klebten wir dann an ihren Verbindungsstellen zusammen.

Wie bei allen Faserverbundbauteilen sind die Anschlussstellen zu anderen Komponenten kritisch. An den Verbindungsstellen wurden Inserts eingefügt und diese

ABB. 4 TESTERGEBNISSE



Testergebnisse des InVentus-Rotors im Windkanal (oben) im Vergleich zu einer feststehenden Windenergieanlage gleichen Durchmessers: Leistungsbeiwert  $c_p$ , Schubbeiwert  $c_s$  und  $c_p/c_s$  als Funktion der Drehzahl. Die Windgeschwindigkeiten  $v_{in1}$  (oben) und  $v_1$  (unten) sind jeweils 7 m/s.

dann mit Kohlefasern umflochten. Sie leiten die Kräfte in die einzelnen Faserschichten, ohne die maximal zulässigen Spannungen zu überschreiten. Schon beim ersten Entwurf des 4 m langen und 2 m breiten Rahmens konnten wir so einschließlich aller Verbindungselemente ein Gewicht von unter 25 kg erreichen.

Für Sicherheit sorgen verschiedene Systeme. Mehrere Bremssysteme an Vorderrad, Hinterrädern und Rotor garantieren, dass das Ventomobil in jedem Betriebszustand angehalten werden kann. Eine Fliehkraftbremse im Turmkopf hält den Rotor unter seiner Maximaldrehzahl von etwa 1000 U/min. Sollte er – trotz intensiver Tests – versagen, dann fangen ein Ring um den Rotor und Netze vor und hinter ihm wegfliegende Teile auf. Der Fahrer ist zusätzlich durch Dach, Helm und Schutzkleidung geschützt.

### Das Ventomobil im Test

Ein wesentlicher Abschnitt in der Entwicklung war die Testphase aller einzelnen Komponenten und des gesamten Fahrzeugs. Besonders wichtig ist der Rotor. Nachdem wir die Rotorblätter gebaut hatten, versicherten wir uns zunächst deren Festigkeit bei einer Zugkraft von 10 kN. Dann testeten wir die aerodynamischen Eigenschaften des Rotors, mit einer Schwungmasse auf einer Welle befestigt, im Windkanal. Dabei durchfuhren wir alle Betriebspunkte. Je mehr Leistung der Rotor dem Wind entzieht, desto stärker ist seine Drehbeschleunigung. So macht der Drehzahlverlauf die Stelle eindeutig erkennbar, an der die Anlage optimal läuft. Bei der Maximaldrehzahl, die ungefähr doppelt so hoch wie die



**Abb. 5** Das Ventomobil im Windkanal (Foto: InVentus).

optimale Auslegungsdrehzahl ist, entspricht die aerodynamische Leistung gerade den Reibungsverlusten. Die Ergebnisse des ersten Windkanaltests stimmten sehr gut mit unseren Berechnungen und Simulationen überein.

Abbildung 4 vergleicht die charakteristischen Eigenschaften des InVentus-Rotors mit einer normalen, feststehenden Windenergieanlage gleichen Durchmessers, nämlich die gemessenen Leistungs- und Schubbeiwerte sowie deren Verhältnis. Aus Gründen der Anschaulichkeit wählten wir hier die Rotordrehzahl, die sich bei einer Windgeschwindigkeit  $v_{in1}$  beziehungsweise  $v_1$  von 7 m/s ergibt. Gerade weil der InVentus-Rotor im Bestpunkt dem Wind nur gut halb so viel Leistung wie eine gewöhnliche Windener-

gieanlage entzieht, ist hierzu weniger als ein Drittel der Schubkraft der gewöhnlichen Windenergieanlage erforderlich. Dadurch erzielt der Rotor des Ventomobils ein mehr als doppelt so hohes Verhältnis aus Leistungs- zu Schubbeiwert, das nach Gleichung (9) direkt proportional zur maximal erreichbaren Fahrgeschwindigkeit ist.

Ein weiterer wichtiger Schritt war der Test des kompletten Fahrzeuges im Windkanal (Abbildung 5). Dafür stand ein Kfz-Teststand zur Ermittlung der Leistungskurve eines Motors zur Verfügung. Das ermöglichte die Berücksichtigung der Verluste im Triebstrang und der Rollreibung. Damit konnten wir die zunächst hohen Leistungsverluste kräftig reduzieren. Danach folgten Freilandtests, um die richtigen Einstellungen für Pitchwinkel, Übersetzung und Rotorausrichtung zu finden. Bei einem letzten Test kurz vor dem Rennen erreichte unser Ventomobil schließlich bei Gegenwind fast die halbe Windgeschwindigkeit. Motiviert fuhr unser Team nach Den Helder.

### Das erste Aeolus Race

Das erste Aeolus Race lief über zwei Renntage. Sechs Teams aus Europa (Tabelle 1) traten jeweils paarweise gegeneinander an. Der wind Turbine racer der Technischen Universität Dänemark Risø/DTU war ein vierrädriges Fahrzeug mit horizontaler Windkraftanlage mit vier Rotorblättern und mechanischer Kraftübertragung. Der ECN Impulse der Energy Research Center of the Netherlands (ECN) trat ebenfalls mit einer horizontalen Windkraftanlage an. Die Energieübertragung erfolgte mechanisch, die Übersetzung und der Pitch konnten während der Fahrt nicht geändert werden. Das Windbike der FH Flensburg fuhr mit einem niedrigtourigen Windrad auf einem Liegerad langsam aber zuverlässig gegen den Wind. Aus Griechenland flog ein Team von der Technischen Universität Athen ein. In ihrem Zephyros trat ebenfalls eine horizontale Windkraftanlage Dienst. Die Universität und Fachhochschule Kiel präsentierten zusammen ihren Baltic Thunder: ein Dreirad mit Darrieus-Rotor, elektrischer Energiewandlung und der Möglichkeit der Energiespeicherung.

Beide Renntage waren geprägt von spannenden Wettkämpfen, aber auch vielen Reparaturen. Am ersten Tag überboten sich die Teams mit Bestzeiten für die drei Kilometer lange Strecke. Am Abend des ersten Tages konnte das InVentus Ventomobil die schnellste Zeit vorweisen und übernahm den Schritt mit einer Geschwindigkeit von 64 % des Gegen-

**TAB. 1** DIE TEAMS

Institution	Mobil	Windkraftanlage	Rotor	Anmerkung
CRES Griechenland	Zephyros	horizontal	3 Blätter	stufenloses Getriebe
DTU Dänemark	wind Turbine racer	horizontal	4 Blätter, pitchbar	variable Übersetzung
ECN Niederlande	ECN Impulse	horizontal	3 Blätter	400 kg
FH Flensburg	Windbike	horizontal langsam laufend	24 Blätter	Liegerad
FH & Universität Kiel	Baltic Thunder	H-Darrieus Rotor	3 Blätter	elektromechanische Wandlung
Universität Stuttgart	InVentus Ventomobil	horizontal	2 Blätter, pitchbar	mechanischer Triebstrang

windes die Hälfte der Windgeschwindigkeit deutlich. Bei einer Windgeschwindigkeit von 10 m/s (36 km/h) erreichten wir eine Geschwindigkeit von 24 km/h.

In der folgenden Nacht nahm der Wind stark ab. Am nächsten Tag mussten die Teams bei einer Windgeschwindigkeit von nur 10 km/h darum kämpfen, überhaupt vom Fleck zu kommen. Unser Ventomobil schlug schließlich auf den letzten 100 Metern das dänische Team. Dieser Sieg war ausschlaggebend für den Gesamtsieg. Am nächsten Tag konnten wir den Erfolg ausgiebig feiern (Abbildung 6).

Der Erfolg des Stuttgarter InVentus-Teams war letztlich nur durch die Einbettung in Lehre und Forschung möglich. Hinzu kam die lokale Vernetzung des Teams an der Universität und in der Region: Ohne konsequente Verwendung von Leichtbautechniken wäre das Stuttgarter Ventomobil nicht in der Lage gewesen, auch bei niedrigen Windgeschwindigkeiten gute Ergebnisse zu erzielen.

Nach dem erfolgreichen ersten Aeolus Race läuft am Stiftungslehrstuhl Windenergie nun die Planung für das nächste Rennen an. Berechnungen haben gezeigt, dass in windgetriebenen Fahrzeugen noch ein hohes Potenzial steckt. Theoretisch sind Geschwindigkeiten von über 100 % der Windgeschwindigkeit bei Gegenwind denkbar, bei Seitenwind sogar noch deutlich mehr. Für die nächsten Jahre ist die Fortsetzung des Aeolus Race geplant.

### Zusammenfassung

Beim ersten internationalen Windmobil-Rennen Aeolus Race in den Niederlanden im Herbst 2008 traten sechs Fahrzeuge gegeneinander an. Sie demonstrierten, dass sie direkt gegen den Wind fahren konnten, ohne zu kreuzen. Das ermöglicht der Einsatz von Rotoren statt Segeln. Das InVentus Ventomobil der Universität Stuttgart gewann, da die Studierenden kreativ und engagiert das theoretische Wissen aus Vorlesungen in die Praxis umsetzten. Konsequente aerodynamische Auslegung des Rotors, Einsatz von modernstem Leichtbau, umfangreiche Tests und etwas Glück führten zum Erfolg.

### Stichworte

Windmobil, InVentus Ventomobil, horizontaler Rotor, vertikaler Rotor, Darrieus-Rotor, bewegte Windkraftanlage.



Abb. 6 Siegerfoto des InVentus-Teams.

### Literatur

- [1] R. Gasch, J. Twele, Windkraftanlagen, 5. Aufl., B. G. Teubner, Stuttgart 2007.
- [2] J. Lehmann et al., Aerodynamic Calculation of the Rotor for a Wind Driven Vehicle, DEWEK, Bremen 2008.

### Die Autoren



Jan Lehmann, geb. 1981, studierte 2002–2008 Luft- und Raumfahrttechnik an der Universität Stuttgart. 2007 bis 2008 war er InVentus-Projektleiter, seit 2008 ist er bei der Aerodynamic Consult GmbH.



Martin Kühn, geb. 1963, studierte Physikalische Ingenieurwissenschaften in Hannover, Berlin und an der TU Delft, dort ab 1993 wissenschaftlicher Mitarbeiter und 2001 Dissertation. 1999 bis 2003 bei der GE Wind Energy GmbH. Seit 2004 Inhaber des ersten deutschen Lehrstuhls für Windenergie, den Karl Schlecht, Gründer der Putzmeister AG, der Universität Stuttgart stiftete.

### Anschrift

Prof. Dr. Dipl.-Ing. Martin Kühn, Stiftungslehrstuhl Windenergie (SWE), Allmandring 5B, 70550 Stuttgart. kuehn@ifb.uni-stuttgart.de

# Extinktionsmessung an einzelnen Quantensystemen Im Schatten eines Moleküls

ILJA GERHARDT | GERT WRIGGE

*Wenn Licht ein optisches Medium durchläuft, etwa einen Farbfilter, dann wird es abgeschwächt. Dieser alltägliche Effekt heißt Extinktion und zeigt sich im Extremfall als Schatten. Doch der „Schattenwurf“ einzelner Atome oder Moleküle ist erst heute der experimentellen Untersuchung zugänglich. Die neuen Erkenntnisse sind gerade für die Quanteninformationsverarbeitung interessant.*

Im Jahr 1729 stellte der französische Physiker Pierre Bouguer (1698–1758) den exponentiellen Zusammenhang zwischen der Intensitätsabnahme eines Lichtstrahls und der Schichtdicke eines von ihm durchlaufenen optischen Mediums fest. Bouguers Ausführungen wurden von dem deutschen Mathematiker und Physiker Johann Heinrich Lambert (1728–1777) aufgegriffen. Der deutsche Forscher August Beer (1825–1863) beschrieb 1852 die Abhängigkeit dieses Effekts von der Konzentration der dabei optisch aktiven Substanz, zum Beispiel eines Farbstoffes in Lösung. Deshalb sind die beschriebenen Phänomene als Lambert-Beersches Gesetz bekannt. Dieses wird in Physik, Chemie und Biologie in den ersten Semestern gelehrt (Abbildung 1). Es gilt

$$\ln \frac{I}{I_0} = -\alpha_\lambda \cdot c \cdot d. \quad (1)$$

Die Kenngrößen sind die Konzentration  $c$  und Schichtdicke  $d$ ,  $I_0$  und  $I$  sind die Intensitäten des Lichtstrahls vor und nach der Probe, und  $\alpha_\lambda$  ist der sogenannte napierische molare Extinktionskoeffizient. Diese phänomenologisch eingeführte Konstante hängt von den Stoffeigenschaften und der Wellenlänge des Lichtes ab. Sie lässt sich experimentell einfach bestimmen (siehe „Mikroskopische Extinktion“ auf S. 185) und gibt an, wie stark das Medium Licht abschwächt. Ihre typische Größenordnung liegt bei  $10^5 \text{ L}/(\text{mol} \cdot \text{cm})$ . Der in der Literatur häufig verwendete dekadische molare Extinktionskoeffizient ist für den Logarithmus zur Basis 10 definiert.

Das Licht verschwindet natürlich nicht einfach beim Durchlaufen eines Mediums. Prinzipiell gibt es zwei Mechanismen. Einerseits kann das Medium die eingestrahlte Energie in eine andere, nicht detektierte Energieform umwandeln. Es wird dann zum Beispiel warm oder strahlt die Energie in einer anderen Farbe wieder ab. Dieses Phänomen

ist als Absorption bekannt. Andererseits kann das Medium das Licht in andere Richtungen ablenken, dieser Effekt ist als Streuung geläufig. Ein typisches Beispiel für ein streuendes Medium ist die Erdatmosphäre: Sie streut besonders effizient den blauen Anteil des Sonnenlichts, was zu Himmelblau und Abendrot führt.

Absorption und Streuung vermindern zusammen die Intensität eines Lichtstrahls entlang seiner Ausbreitungsrichtung, man spricht von Extinktion (lat. für Auslöschung). Oft wird Extinktion pauschal mit der Absorption gleichgesetzt, zum Beispiel in Bezeichnungen wie Absorptionsspektrometer oder Absorptionsfilter. Wir werden allerdings sehen, dass die Streuung eine ganz zentrale Rolle bei der Erklärung der Extinktion spielt. Mehr noch: Die besten Abschwächer sind Substanzen, die nur streuen und gar kein Licht absorbieren.

Das Lambert-Beersche Gesetz gibt eine makroskopische Erklärung der Extinktion. Ein Lichtstrahl, der meist mit einer ebenen Welle beschrieben wird, trifft auf ein Ensemble von optisch aktiven Teilchen. Dabei wird er abgeschwächt oder bildet sogar einen Schlagschatten aus. Was passiert aber, wenn anstelle einer farbstoffgefüllten Küvette nur ein einzelnes Molekül in dem Lichtstrahl platziert ist?

Für diesen Fall kann man den zu erwartenden Wert der Lichtabschwächung aus dem Ensemble-Experiment extrapolieren, wenn man die Konzentration der optisch aktiven Teilchen kennt. Üblicherweise ordnet man dabei jedem einzelnen Teilchen einen Extinktionsquerschnitt zu. Er entspricht der Fläche eines fiktiven schwarzen Scheibchens im Lichtstrahl, das für eine vergleichbare Abschwächung sorgen würde. Dieses Bild beschreibt die Extinktion also mikroskopisch. „Mikroskopische Extinktion“ auf S. 185 zeigt ein Rechenbeispiel für den organischen Farbstoff Rhodamin 6G.

In atomaren Größenordnungen weit unterhalb der Wellenlänge des Lichts gilt jedoch das Strahlenoptikbild nicht mehr. Die Vorstellung von einem Molekül als winziges schwarzes Scheibchen ist sicher nicht physikalisch. Im Folgenden wollen wir uns deshalb der korrekten Beschreibung der Extinktion von Licht durch ein einzelnes Quantensystem widmen. Dabei kann es sich um Atome, Moleküle oder auch Quantenpunkte handeln. Es stellt sich die Frage, was man sich unter dem Schattenwurf eines einzelnen Quantensystems vorstellen kann. Wie stark schwächt zum Beispiel ein einzelnes Farbstoffmolekül tatsächlich einen Laserstrahl ab? Kann man dies experimentell nachweisen, optimieren oder sogar technisch nutzen?



**Pierre Bouguer**  
(1698–1758).



**Johann Heinrich Lambert**  
(1728–1777).



**Sonnenauf- und -untergänge zeigen eindrucksvoll die Lichtextinktion der Erdatmosphäre. Sie streut den blauen Anteil des Sonnenlichts besonders effizient. Da bei niedrig stehender Sonne der Lichtweg durch die Luft lang ist, gelangt vor allem der rote Spektralanteil bis zum Auge** (Foto: © Dewona/www.pixelio.de).

### Ein ideales Atom im Strahlengang

Stellen wir uns folgendes Experiment vor: Ein Lichtstrahl in Form einer Planwelle treffe auf ein einzelnes Atom. Im Grenzfall eines sehr schwachen Lichtfeldes können wir das Atom klassisch modellieren. Es verhält sich dann wie ein Elektron, das in dem harmonischen Potential einer positiven Ladung gebunden ist, und das von dem elektromagnetischen Feld des Lichtstrahls zur Oszillation angeregt wird (Abraham-Lorentz-Modell).

Damit haben wir den Fall einer erzwungenen Schwingung. Wenn die Frequenz des Lichtstrahls exakt der Resonanzfrequenz des Oszillators entspricht, schwingt das Elektron mit  $90^\circ$  Phasenverschiebung dem treibenden Feld hinterher. Dabei strahlt es wie jede beschleunigte Ladung wieder elektromagnetische Wellen ab – Reaktionsfeld genannt. Dieses Feld, dessen Amplitude durch die Stärke der Anregung und die Dämpfung des Oszillators bestimmt ist, emittiert der Oszillator in Dipolform. Von zentraler Bedeutung ist hierbei, dass das vom Atom abgestrahlte Feld die identische Frequenz und eine feste Phasenbeziehung zum treibenden Laserfeld hat: Es wurde kohärent gestreut.

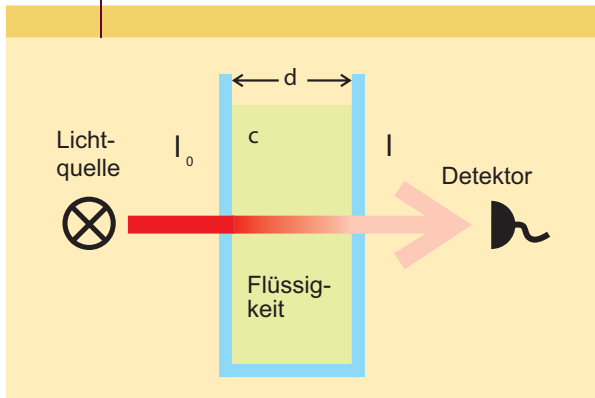
Die beiden Felder, das ursprüngliche Feld des Anregungslichtes und das kohärent gestreute Dipolfeld, überlagern sich und interferieren. Die Berliner Physiker Harry Paul und Randolph Fischer zeigten 1983 [1] ein anschauli-

ches Bild: Sie berechneten den zeitlich gemittelten Energiefluss (Poynting-Vektor) der Summe beider Felder und zeichneten die zugehörigen Flusslinien. Ein solcher Graph (Abbildung 2) macht deutlich, wie das Atom die Energie der von links einlaufenden ebenen Welle förmlich in sich „hineinsaugt“.

In dieser Abbildung gewinnt auch der Extinktionsquerschnitt eine anschauliche Bedeutung. Seine theoretische Querschnittsfläche von der Seite gesehen ist durch den Doppelpfeil links dargestellt. Gleichzeitig wird in diesem Bereich der Energiefluss verändert. Der Extinktionsquerschnitt ist also tatsächlich ein anschauliches Maß für den Einflussbereich eines einzelnen Teilchens im Strahlengang. Allerdings kann man nicht von einem scharfen Schattenwurf sprechen, da die Phasenfronten von Planwelle (eben) und Dipol (sphärisch) nicht übereinstimmen.

Die Größe des Extinktionsquerschnitts hängt von der Stärke der kohärenten Streuung bei gegebener Anregungslichtstärke – und damit von der Güte des Oszillators – ab. Das bereits beschriebene Rhodaminmolekül ist kein ideales System, da es mit der Umgebung wechselwirkt und zusätzliche Reibungsverluste erleidet. Der Extinktionsquerschnitt eines solchen Moleküls ist also verglichen mit dem Beispiel in Abbildung 2 sehr klein. Dagegen kann ein ideales System, das nur über das Reaktionsfeld gedämpft wird, einen sehr

ABB. 1 | LAMBERT-BEERSCHES GESETZ



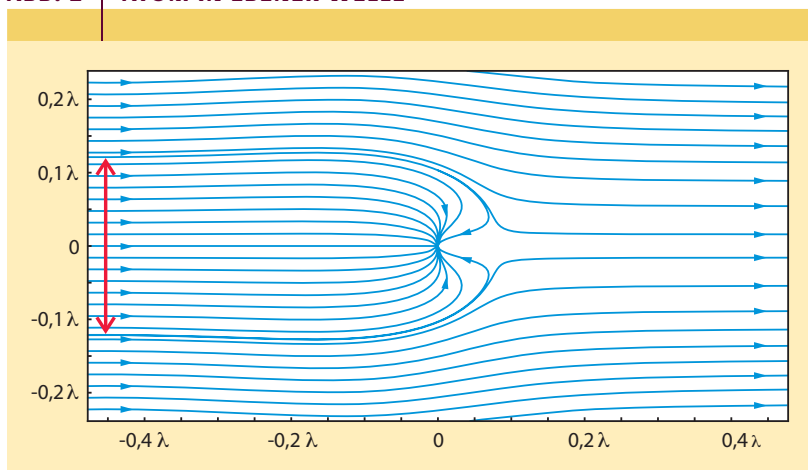
**Abnahme der Intensität  $I_0$  eines Lichtstrahls beim Weg durch ein Medium mit optisch aktiven Stoffen – zum Beispiel Farbstoffmolekülen – auf die Intensität  $I$ . Die Weglänge  $d$  und auch die Konzentration  $c$  gehen logarithmisch ein.**

großen Extinktionsquerschnitt  $\sigma$  aufweisen und maximal den Wert

$$\sigma = \frac{3\lambda^2}{2\pi}$$

annehmen, wobei  $\lambda$  die Resonanz-Wellenlänge ist. Für optische Wellenlängen bei etwa 600 nm (rot-orange) entspricht  $\sigma$  einer Fläche von fast 500 nm Durchmesser. Der Einflussbereich kann im idealen Fall die physikalische Ausdehnung des Atoms um mehrere Größenordnungen überreffen.

ABB. 2 | ATOM IN EBENER WELLE



**Eine von links einlaufende, ebene elektromagnetische Welle der Wellenlänge  $\lambda$  trifft auf einen Dipol („Atom“) im Ursprung des Koordinatensystems, der senkrecht zur Papierebene orientiert ist. Sie regt ihn zum kohärenten Abstrahlen an. Addiert man beide Felder und plottet den Verlauf des Poynting-Vektors (Energieflusslinien), so erhält man dieses Bild. Der rote Doppelpfeil markiert den Bereich, in dem die Energieflusslinien in das „Atom“ hinein laufen. Die Abstrahlung des Dipols ist hier schwächer angenommen als bei einem perfekten, verlustfrei strahlenden Atom. Dadurch liegt der Extinktionsquerschnitt unterhalb des theoretischen Maximums, das Bild ist aber besonders anschaulich.**

## Ein ideales Atom im Laserfokus

Der Einfluss eines einzelnen Atoms auf eine – theoretisch unendlich ausgedehnte – ebene Welle wird trotz des verhältnismäßig großen Wertes von  $\sigma$  nicht messbar sein. Allerdings kann man das einfallende Licht der Wellenlänge  $\lambda$  nach dem Rayleigh-Kriterium auf einen Durchmesser von nur  $\lambda/2$  fokussieren, was in etwa dem theoretischen Extinktionsquerschnitt  $\sigma$  eines Atoms entspricht. Diese Situation wollen wir uns genauer anschauen.

Im nächsten Gedankenexperiment fokussieren wir einen Laserstrahl möglichst stark und platzieren in diesen Fokus wieder ein einzelnes, idealisiertes Atom. Abbildung 3a zeigt den Verlauf des elektrischen Feldes innerhalb des Laserfokus. Hier wird ein weiterer wichtiger Effekt deutlich: Verglichen mit dem Feld einer ebenen Welle erfährt das Laserfeld auf seinem Weg vom Fokus ins Fernfeld eine Phasenverschiebung von  $+90^\circ$  – wie man erkennt, wenn man sich in Gedanken in Abbildung 3a auf den engsten Fokuspunkt als Bezugspunkt „setzt“. Diese sogenannte Gouy-Phase ergibt sich als geometrische Phase aus den Weglängenunterschieden in einem realen Gaußschen Fokus verglichen mit einem idealen sphärischen Fokus. Anschaulich gesprochen ist sie eine Folge des „Umstülpens“ der Wellenfronten von sphärisch einlaufend in sphärisch auslaufend.

Abbildung 3c zeigt die Feldverteilung der kohärent gestreuten Dipolstrahlung, wie zuvor mit einer Phasenverschiebung von  $-90^\circ$  zum antreibenden Feld am Ursprung. Abbildungen 3b und d zeigen die – computersimulierten – zeitlich gemittelten Intensitäten des fokussierten und gestreuten Lichtes.

Die beiden Felder, also das ursprüngliche Laserfeld und das kohärent gestreute Feld, überlagern sich. In der Vorwärtsrichtung ergibt sich eine konstante Phasendifferenz von  $180^\circ$ , und im Gegensatz zum vorher besprochenen Fall der Planwelle stimmen die Phasenfronten in diesem Fall sehr gut überein. Hinter dem Atom schwächen sich also die Felder gegenseitig ab, sie interferieren destruktiv. In der Rückwärtsrichtung dagegen, also in Abbildung 3e nach links, sind das Laserfeld und das gestreute Feld gegenläufig. Abbildung 3e zeigt oben das Laserfeld und unten das Dipolfeld. Die Pfeile geben die Ausbreitungsrichtung der Strahlung an.

In Abbildung 3f ist die zeitlich gemittelte Intensität des Gesamtsystems zu sehen, also der überlagerten Felder von Laserfokus und Atom. In Vorwärtsrichtung (nach rechts) sieht man eine deutliche Abschwächung im Vergleich zu Abbildung 3b. In Rückwärtsrichtung (nach links) bildet sich eine stehende Welle aus. In andere Raumrichtungen läuft die vom Atom emittierte Dipolstrahlung aus, ohne vom gerichteten Laserstrahl überlagert zu werden.

Bei diesen Versuchen gilt natürlich die Energieerhaltung. Das in Vorwärtsrichtung fehlende Licht, die extinktierte Leistung, ist gleich der Leistung, die insgesamt gestreut wurde:

$$P_{\text{Extinktion}} = P_{\text{Streueung}}$$

Die hier gegebene Beschreibung der Lichtextinktion als Interferenz mit dem gestreuten Licht ist gewöhnungsbedürftig, allerdings in der klassischen Elektrodynamik eine etablierte Methode. Zunächst könnte man denken, dass das kohärent gestreute Licht quasi als zusätzliche Lichtquelle mit zusätzlicher Leistung willkürlich in die Szene eingefügt wurde. Doch die feste Phasenbeziehung zum anregenden Feld sorgt für eine destruktive Interferenz, die exakt so viel Leistung „vernichtet“, wie insgesamt in alle Raumrichtungen gestreut wird.

Das Interferenzbild bietet den zusätzlichen Vorteil, dass es einen genaueren Einblick in die Effizienz der Wechselwirkung von Licht mit einem Atom bietet. Beim Fokussieren nimmt beispielsweise der Laserstrahl mit wachsender Öffnung des Einfallswinkels (numerische Apertur) die Gestalt einer Kugelwelle an, ähnelt also zunehmend dem Strahlungsmuster des Dipols. Entsprechend stärker wird die Interferenz zwischen eingestrahlem und gestreutem Licht in Vorwärtsrichtung. Im Grenzfall, wenn die einlaufende - und damit auch die auslaufende - Anregungswelle die Gestalt einer Dipolwelle annimmt, kann sie in Vorwärtsrichtung durch die Interferenz völlig ausgelöscht werden. Das führt zu einer perfekten Reflexion des eingestrahnten Lichts [2].

Die Wirkung eines einzelnen Atoms in einem beliebigen Lichtfeld kann man sich also vereinfacht wie folgt vorstellen. Wenn man die einlaufende Welle als Summe einer Dipol- und einer Nichtdipol-Mode darstellt, dann wird die Dipolmode in Vorwärtsrichtung durch destruktive Interferenz eliminiert. Die komplementäre Nichtdipol-Mode passiert dagegen das Atom unbeeinflusst. Das Atom filtert selektiv den Dipolanteil eines einfallenden Lichtstrahls heraus.

### Absorption

Kommen wir noch mal auf die Absorption zurück. Ein getriebener elektrischer Dipol strahlt immer ein Reaktionsfeld aus. Im Idealfall ist diese abgestrahlte Leistung die einzige Ursache von Dämpfung, die das System erleidet. Ein reales System wird meist zusätzlich gedämpft, etwa durch die Erzeugung von Vibrationen in der Umgebung (Wärme) oder Abstrahlung von Licht in einer anderen Farbe. Dann sinkt bei gleich starker Laseranregung die Intensität der kohärenten, interferenzfähigen Streuung.

Angenommen, durch zusätzliche Reibungsverluste sei die insgesamt kohärent gestreute Intensität nur noch ein Viertel so groß wie bei einem idealen Oszillator. Die Interferenz mit dem unverändert starken Anregungsfeld, also die Extinktion, wird in diesem Fall nur um einen Faktor  $1/2$  verringert. Schließlich basiert diese Interferenz auf der Amplitude des gestreuten Feldes und nicht auf ihrem Quadrat, der Intensität. Die Differenz  $1/2 - 1/4 = 1/4$  liefert den Anteil der Energie, der durch Reibung verloren gegangen ist (und der in Abbildung 2 als Energiefluss auf dem Dipol endet). Die vollständige Leistungsbilanz lautet also

$$P_{\text{Extinktion}} = P_{\text{Streuung}} + P_{\text{Absorption}}$$

### MIKROSKOPISCHE EXTINKTION

Hier zeigen wir am Beispiel des rot-orangen Laserfarbstoffs Rhodamin 6G, wie man den Extinktionsquerschnitt aus Messwerten berechnet.

Eine 10-mikromolare Lösung des Farbstoffes ( $c = 10^{-5}$  mol/L) befindet sich in einer 1 cm dicken Küvette ( $d = 1$  cm). Das eintretende Licht mit einer Wellenlänge von 572 nm (gelb) hat eine Intensität von  $1 \text{ mW/cm}^2$  ( $I_0$ ). Es wird in der Küvette auf  $69 \mu\text{W/cm}^2$  ( $I$ ) abgeschwächt. Mit diesen Werten ergibt sich ein Extinktionskoeffizient von

$$\alpha_\lambda = \frac{\ln(I_0/I)}{c \cdot d} = 2,67 \cdot 10^5 \frac{\text{L}}{\text{mol} \cdot \text{cm}}$$

Damit ist nun ganz einfach die Abschätzungsfläche pro Rhodaminmolekül definiert:

$$\sigma = \frac{\alpha_\lambda}{N_A}$$

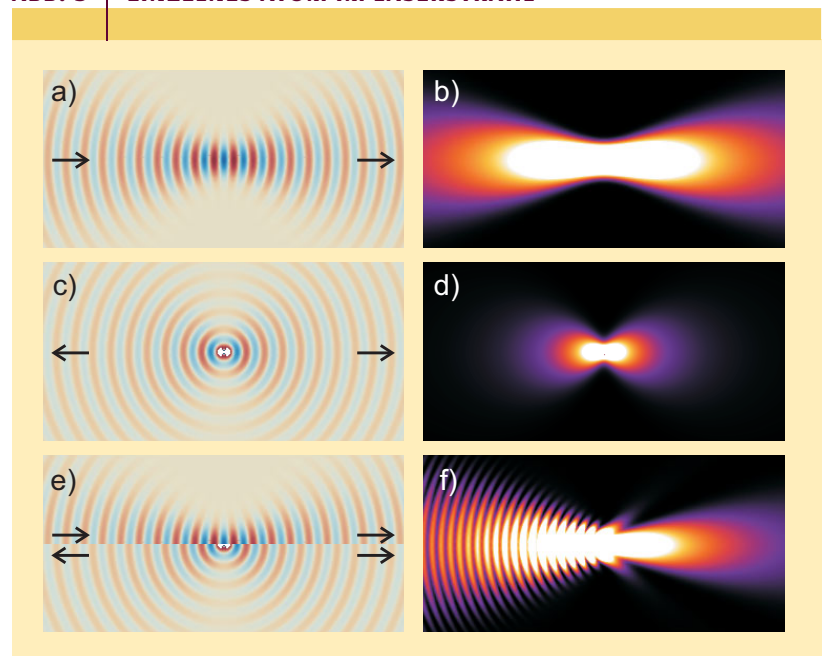
es ergibt sich:

$$\sigma = 4,4 \cdot 10^{-2} \text{ nm}^2.$$

Das ist interessanterweise deutlich kleiner als die laterale Ausdehnung des Rhodaminmoleküls selbst.

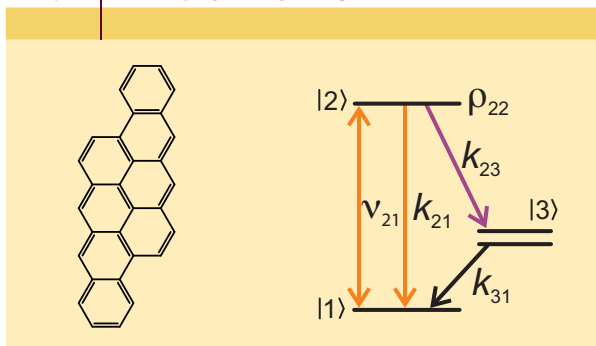
Für die Abschwächung eines Lichtstrahls ist immer eine gewisse, zum eingehenden Laserstrahl kohärente (phasentreue) Streuung notwendig. Nur sie führt zur gewünschten destruktiven Interferenz mit dem Anregungslicht. Ein zusätzlicher Absorptionsterm wird die kohärente Streuung und damit die Abschwächung grundsätzlich verringern und

ABB. 3 | EINZELNES ATOM IM LASERSTRAHL



**Links:** Phasenverläufe in einem simulierten Extinktionsexperiment, in dem ein von links kommender, fokussierter Laserstrahl auf ein ideales Atom trifft. Die linken Bilder zeigen Feldverteilungen a) des fokussierten Laserstrahls, c) der kohärent gestreuten Dipolstrahlung des Atoms und e) beider Felder im Vergleich. Rechts: jeweils zugehörige Intensitätsverteilung, gemittelt über eine optische Periode. f) Intensitätsverteilung der überlagerten Laser- und Dipolstrahlung: In Vorwärtsrichtung (nach rechts) schwächt sich der Laserstrahl ab, in Rückwärtsrichtung entsteht eine stehende Welle.

ABB. 4 | FARBSTOFFMOLEKÜL



**Struktur eines Dibenzanthantren-Moleküls (links) und sein Energieniveau-Schema (rechts). Der Übergang zwischen den beiden Energieniveaus |1> und |2> entspricht orangem Licht (etwa 589 nm). Das eingestrahlte Licht treibt das System zwischen beiden Niveaus an. Dieser Übergang erzeugt auch die kohärente Streuung. Zerfällt |2> dagegen via Fluoreszenz in das Energieniveau |3>, dann entspricht dies einer Absorption: Die Energie wandelt sich in eine andere Form um.**

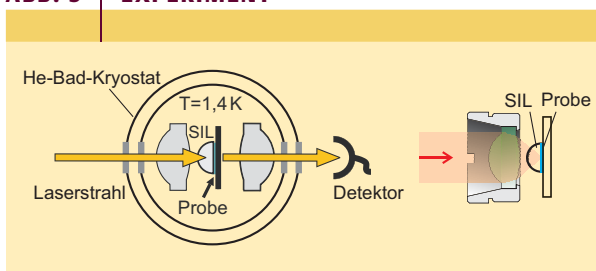
$\sigma$  verkleinern. Demnach streut ein guter Abschwächer vor allem das Licht und absorbiert möglichst wenig davon.

Dieses Konzept entspricht nicht unbedingt unserer anschaulichen Erfahrung. Ein – wie auch immer geartetes – „schwarzes Teilchen“ schwächt Licht folglich schlechter ab als ein stark resonant fluoreszierender Farbstoff oder sogar ein Atom. Aus dem täglichen Leben sind wir natürlich größere Stoffmengen gewöhnt. Ein Stück Kohle streut Licht sehr ineffizient, deshalb erscheint es dem Betrachter auch schwarz. Allein die große Anzahl von Teilchen sorgt dafür, dass die Kohle das durchgehende Licht vollständig schluckt.

### Quantenmechanisch

Ein Atom oder ein sonstiges Quantensystem wird meist nicht als klassischer Oszillator, sondern als Zwei-Niveau-System beschrieben, mit Grund- und angeregtem Zustand. Das Zwei-Niveau-System unterscheidet sich vom klassischen Oszillator vor allem darin, dass es sättigt: Bei steigender Anregungsintensität wächst die extinktierte Leistung nicht direkt proportional mit, sondern nähert sich asymptotisch ei-

ABB. 5 | EXPERIMENT



**Experimenteller Aufbau. Rechts sind der Strahlverlauf durch die Immersionslinse aus Zirkoniumdioxid (SIL: Solid Immersion Lens) und die Probe genauer dargestellt.**

nem maximalen Wert. Dies hat seine Ursache in der zunehmenden Bevölkerung des angeregten Zustandes. Wird zu viel Anregungslicht angeboten, treten auch „konkurrierende“ stimulierte Emissionsprozesse auf, sowie inkohärente spontane Emissionsprozesse, und das System wird im zeitlichen Mittel gesehen transparenter. Daher wurden viele der aktuellen Experimente am unteren Anregungslimit durchgeführt.

### Aktuelle Experimente

Die effektive Wechselwirkung eines einzelnen Quantensystems mit einem Laserfeld ist seit einigen Jahren ein reges Forschungsgebiet. Eine Hauptstrategie war hierbei die Verwendung optischer Resonatoren mit hoher Güte, die das Licht gleich mehrfach an einem Atom „vorbei“ führen. Diese Experimente sind sehr erfolgreich, jedoch technisch aufwendig. Deshalb gibt es den neuen Ansatz, eine starke Wechselwirkung von Licht und einem einzelnen Emitter in einem sogenannten Single-Pass-Experiment zu realisieren, bei dem das Licht nur einmal auf das System trifft. Besonders interessant ist die totale Abschattung von Licht durch ein einzelnes Quantensystem. Aber wie lässt sie sich experimentell realisieren?

Leider zeigen alle realen Quantensysteme mehr oder weniger starke Absorptionsverluste. Teilweise werden sie durch Wechselwirkung mit der Umgebung hervorgerufen – zum Beispiel zerstört sie die Kohärenz im System durch Stöße, nach denen sich das System jeweils erst wieder einschwingen muss. Daher erreicht man eine maximale Extinktion nur, wenn es gelingt, das Quantensystem effizient von seiner Umgebung zu isolieren. Dies ist vor allem eine experimentelle Herausforderung.

Einzelne Atome kann man in einer optischen Dipolfalle in einem Laserfokus festhalten. Festkörpersysteme wie Quantenpunkte oder Moleküle muss man in einem Heliumkryostat auf Temperaturen knapp über dem absoluten Nullpunkt kühlen, um thermische Schwingungen in der umgebenden Matrix auszufrieren. In allen Fällen ist außerdem die starke Fokussierung des Laserlichtes ein Problem. In Atomexperimenten ist der optische Zugang oft durch die Fallengeometrie beschränkt, ein ähnliches Problem besteht in Heliumkryostaten mit sehr geringem Platzangebot.

### Extinktion durch ein einzelnes Molekül

Schauen wir uns genauer an, wie man die Extinktion von Licht durch ein einzelnes Molekül misst (Abbildung 5). Bestimmte organische Farbstoffmoleküle, die in organische Festkörperkristalle eingebaut sind, können sich bei sehr niedrigen Temperaturen um ein Kelvin herum wie ideale Zwei-Niveau-Systeme verhalten. Sie werden dann nicht mehr durch thermisch angeregte Gitterschwingungen in der Umgebung gestört und gedämpft. Im Idealfall ist die Linienbreite nur noch durch die Lebensdauer des angeregten Zustandes begrenzt. Wir verwendeten zum Beispiel für unsere Experimente das hochkondensierte, aromatische Farbstoffmolekül Dibenzanthantren (DBATT, Abbildung 4 links).

Dieses betteten wir in eine kristalline Matrix ein und kühlen sie in einem Heliumkryostaten auf 1,4 K [3].

Bei derart niedrigen Temperaturen können wir in unserem Heliumkryostaten keine kommerziellen, mehrlinsigen Mikroskopobjektive einsetzen. Deshalb verwendeten wir zum Fokussieren des Laserstrahls eine Festkörper-Immersionlinse aus Zirkoniumdioxid. Sie erlaubt – ähnlich wie bei einem Ölimmersionsobjektiv – einen Fokusdurchmesser von 370 nm bei einer Anregungswellenlänge von etwa 600 nm (Abbildung 5). Der Strahl eines durchstimmbaren Farbstofflasers traf direkt hinter dem Kryostaten auf eine hochempfindliche Photodiode, wir maßen also die Transmission durch das Gesamtsystem.

Um die transmittierte Leistung ohne Einfluss des Moleküls zu messen, nahmen wir regelmäßig Frequenzscans auf, die außerhalb der Resonanz des Moleküls liegen. War der Laserstrahl dagegen in der Resonanzfrequenz des molekularen Zwei-Niveau-Systems (Abbildung 4 rechts) gestimmt, so sank die Lichtintensität in Vorwärtsrichtung um mehr als zehn Prozent (Abbildung 6).

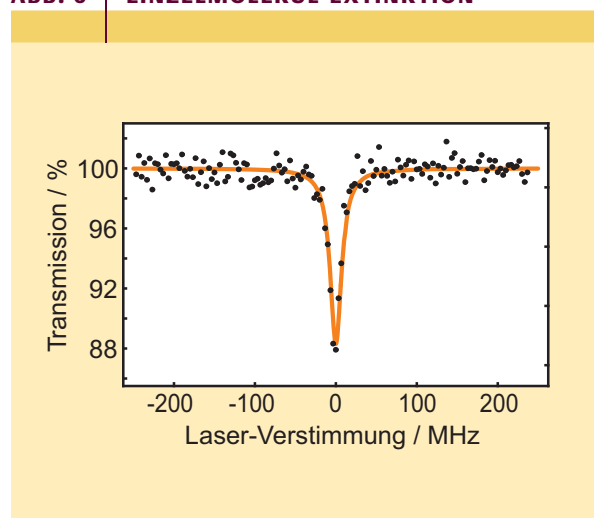
## Anwendungen

Trotz der großen technischen Herausforderung gelangen in letzter Zeit wichtige experimentelle Fortschritte. Die Extinktion von Laserlicht sowohl durch ein einzelnes Atom [4], Farbstoffmolekül [3] und Quantenpunkt [5] konnte direkt mit Photodetektoren gemessen werden. In allen Fällen wurde das Laserlicht durch die Anwesenheit eines einzelnen Quantensystems um etwa zehn Prozent abgeschwächt. Wie bereits bemerkt sagen theoretische Modelle voraus, dass ein einzelnes Quantensystem einen gerichteten Laserstrahl vollständig abschwächen beziehungsweise reflektieren kann [2]. Die experimentellen Fortschritte geben Anlass zur Hoffnung, dieses Phänomen auch tatsächlich beobachten zu können.

Für eine hocheffiziente Kopplung von Licht und Materie gibt es eine Vielfalt von Anwendungen in Grundlagenforschung und Technik. Ein wesentliches Motiv für diese Experimente liegt in der Frage, wie man Licht-Materie-Wechselwirkung optimal umsetzen kann. Man diskutiert derzeit verschiedene Modelle, die einlaufende Lichtwelle so zu gestalten, dass die Kopplung an das einzelne Quantensystem besonders effizient wird. So muss beispielsweise die Polarisation des Lichts möglichst gut zu den Eigenschaften des Quantensystems passen. Auch die Wellenfronten müssen auf die Dipolemission des Systems optimiert sein. Andernfalls ist die destruktive Interferenz nur gering oder gar nicht vorhanden.

Extinktionsmessungen erweisen sich auch als interessante alternative Methode zur optischen Detektion von Quantenemittern, Nanopartikeln oder auch Viren. Üblicherweise werden diese Objekte mit Hilfe von Fluoreszenz beobachtet. Die meisten Zellen oder Viren fluoreszieren jedoch nicht von selbst, weshalb sie vorher eingefärbt werden müssen. Extinktionsmessungen machen diesen Schritt überflüssig. Außerdem „bündelt“ sich bei ihr bildlich ge-

ABB. 6 | EINZELMOLEKÜL-EXTINKTION



**Die gemessene Extinktion durch ein einzelnes Dibenzanthracen-Molekül. Die x-Achse gibt die Farbe des Lasers an, die y-Achse die relative Intensität  $I/I_0$  in Prozent. Gesamte Messdauer: etwa 3 s. Interessant ist, dass ein einzelnes Molekül Licht nur in einem extrem schmalen Wellenlängenbereich abschwächt: 100 MHz entsprechen bei dieser Wellenlänge einem Bereich von etwa 0,0001 nm.**

sprochen die gesamte Wechselwirkung mit dem Teilchen in der Abschwächung der Lasermode. Die erfolgreiche Detektion der Fluoreszenz dagegen beruht meist auf hocheffizienten Licht-Sammeloptiken und sensitive Einzelphotonen-Detektoren. Damit kann die Messung der Extinktion potenziell ein besseres Signal-zu-Rausch-Verhältnis bieten.

Eine effiziente Wechselwirkung eines einzelnen Photons mit einem einzelnen Quantenemitter würde zudem erlauben, den quantenmechanischen Zustand eines Photons auf ein einzelnes Quantensystem zu übertragen. Gelingt das, dann würde dies viele Protokolle ermöglichen, die in der Quanteninformationsverarbeitung vorgeschlagen wurden. Auch effiziente Wechselwirkungen zwischen zwei Quantensystemen, zum Beispiel zwei Atomen, ließen sich über weite Entfernungen realisieren – etwa über eine optische Glasfaser.

Wie wir gesehen haben, wird im Idealfall das Anregungslicht am Quantensystem reflektiert. Befindet sich das System jedoch vorher im angeregten Zustand, dann wird es mit „stimulierter Emission“ abgeregt und sendet ein Photon aus. Dies ist exakt der zur Extinktion gegenteilige Prozess und kann als konstruktive Interferenz in Vorwärtsrichtung beschrieben werden. Ein solcher Effekt erlaubt die Verstärkung von Licht auf der Einzelphotonenebene – ein hochaktuelles Forschungsgebiet [6].

Das neue Feld der direkten Extinktionsmessungen an einzelnen Quantensystemen öffnet also die Tür zu vielen weiteren Experimenten. Sie beantworten grundlegende Fragestellungen der Licht-Materie-Wechselwirkung und können für verschiedene technische Anwendungen genutzt werden.

## Zusammenfassung

Das Phänomen ist alltäglich: Licht durchläuft ein optisches Medium und wird dabei abgeschwächt. Der Effekt heißt Extinktion. Zu dieser „Auslöschung“ tragen zwei Mechanismen bei: Streuung und Absorption. Dabei ist besonders die Frage interessant, welchen „Schatten“ einzelne Quantensysteme wie Atome oder Moleküle werfen. Inzwischen gelingt es, experimentell in diesen Größenbereich vorzudringen. Die Streuung am System ist dabei entscheidend: Die destruktive Interferenz zwischen einfallendem und gestreutem Licht kann das einfallende Licht in Ausbreitungsrichtung sogar vollständig auslöschen. Ob auch im Experiment ein einzelnes Atom zu dieser vollständigen Auslöschung fähig ist, gehört zu den noch offenen Fragen. Das Forschungsgebiet hat zudem für die Quanteninformationsverarbeitung Bedeutung. Diese benötigt eine möglichst effiziente Kopplung eines Lichtfeldes an ein einzelnes Quantensystem.

## Stichworte

Einzelmolekülspektroskopie, Extinktion, Schattenwurf, Streuung, Absorption, Dipol, Zwei-Niveau-System, Farbstoffmolekül, Licht-Materie-Wechselwirkung, Quanteninformationsverarbeitung.

## Literatur

- [1] H. Paul, R. Fischer, Sov. Phys. Usp. **1983**, 26(10), 923.
- [2] G. Zumofen et al., Phys. Rev. Lett. **2008**, 101, 180404.
- [3] G. Wrigge et al., Nature Phys. **2008**, 4, 60.
- [4] M. Khoon Tey et al., Nature Phys. **2008**, 4, 924.
- [5] A. Vamivakas et al., Nano Letters **2007**, 7, 2892.
- [6] J. Hwang et al., in Vorbereitung, private Kommunikation.

## Danksagung

Wir danken Prof. Dr. V. Sandoghdar für die großzügige Unterstützung. Ein besonderer Dank gilt Dr. G. Zumofen als engagiertem Gesprächspartner. Die Ergebnisse zur Extinktion von Licht durch ein einzelnes Molekül wurden zusammen mit J. Hwang, P. Bushev, M. Agio und R. Pfab erarbeitet.

## Die Autoren



Ilja Gerhardt forscht nach seiner Doktorarbeit an der ETH Zürich inzwischen am neuen Centre for Quantum Technologies an der National University of Singapore (NUS). Er beschäftigt sich mit Einzelemiterspektroskopie, Quantenkryptographie und der Erzeugung von nichtklassischen Lichtzuständen.



Gert Wrigge hat seine Dissertation auf dem Gebiet der Einzelmolekül-Spektroskopie an der ETH Zürich beendet. Zur Zeit ist er bei einem Finanzdienstleister im Bereich Nachhaltigkeit tätig, wo er insbesondere moderne Stromnetze und beteiligte Firmen untersucht.

## Anschriften

Dr. Ilja Gerhardt, Centre for Quantum Technologies, National University of Singapore, S15, #01-05, 3 Science Drive 2, Singapore 117543.

[ilja@quantumlah.org](mailto:ilja@quantumlah.org)

Dr. Gert Wrigge, ETH Zürich, Labor für Physikalische Chemie, HCI, F 212, CH-8093 Zürich.

[wrigge@phys.ethz.ch](mailto:wrigge@phys.ethz.ch)

# Phasenwechsel-Materialien als universale Speichermedien Schalten mit Licht und Strom

WOJCIECH WELNIC | MATTHIAS WUTTIG

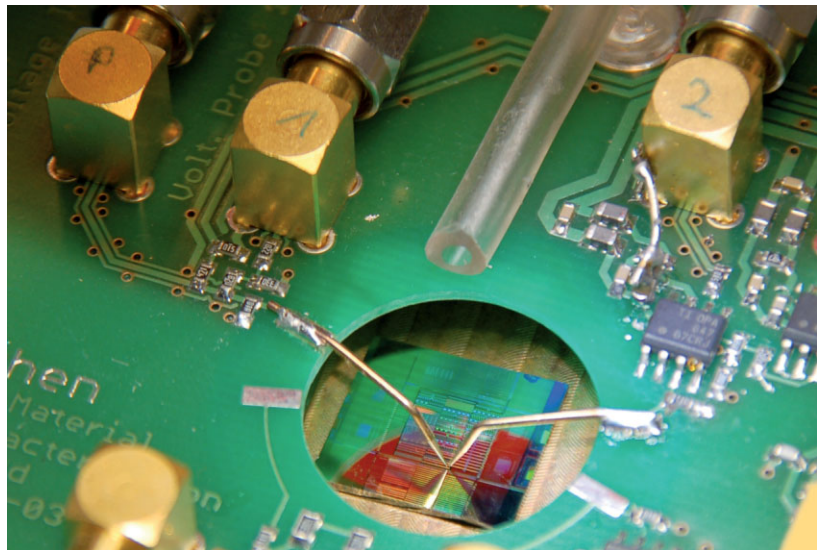
*Phasenwechsel-Materialien besitzen in der amorphen Phase signifikant andere optische und elektrische Eigenschaften als in der kristallinen. Sie lassen sich schnell zwischen beiden Phasen „umschalten“ und eignen sich als nichtflüchtige Datenspeicher. Als optische Speichermedien sind sie in wiederbeschreibbaren CDs, DVDs und Blu-Ray-Discs längst etabliert. Sie könnten nun auch elektronische Speichertechnologien revolutionieren.*

Die Speicherung großer Datenmengen ist in unserer heutigen Wissens- und Informationsgesellschaft alltäglich geworden. Je nach Anwendung kommen dabei ganz unterschiedliche Techniken zum Einsatz. Sie unterscheiden sich in der Speicherkapazität und -dichte, der Durchsatzrate, also der Schreib-, Lese- und Löscheschwindigkeit eines Bits, der Lebensdauer der Daten im Speicher oder dessen Kosten.

Phasenwechsel-Materialien besitzen als Technologie das Potenzial, aus einem Nischenprodukt zu einer der dominanten Speichermethoden der kommenden Generation zu werden. Bei ihnen handelt es sich in der Regel um Chalkogenide. Solche Verbindungen enthalten Schwefel, Selen oder Tellur, zum Beispiel  $(\text{GeTe})_x(\text{Sb}_2\text{Te}_3)_y$ , oder sind Legierungen aus Silber, Indium, Antimon und Tellur.

Überraschenderweise ändern sich ihre optischen und elektronischen Eigenschaften stark beim Übergang von der geordneten, kristallinen in die ungeordnete, amorphe Phase. Die optische Reflektivität liegt in der kristallinen Phase bis zu 30 % höher, während die elektrische Leitfähigkeit sogar um mehrere Größenordnungen ansteigt. Zudem ist die Phasenumwandlung reversibel und läuft auf einer Zeitskala von weniger als hundert Nanosekunden ab.

Dieses schnelle Hin- und Herschalten zwischen zwei Zuständen mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften lässt sich für die optische und elektronische Datenspeicherung nutzen. Die elektronische Variante verspricht, in Zukunft die schnellen, aber flüchtigen DRAMs (Dynamic Random Access Memory, Dynamischer Speicher mit wahlfreiem Zugriff) zu ersetzen. Diese tun etwa in den Arbeitsspeichern heutiger Computer Dienst mit der Folge, dass diese nach



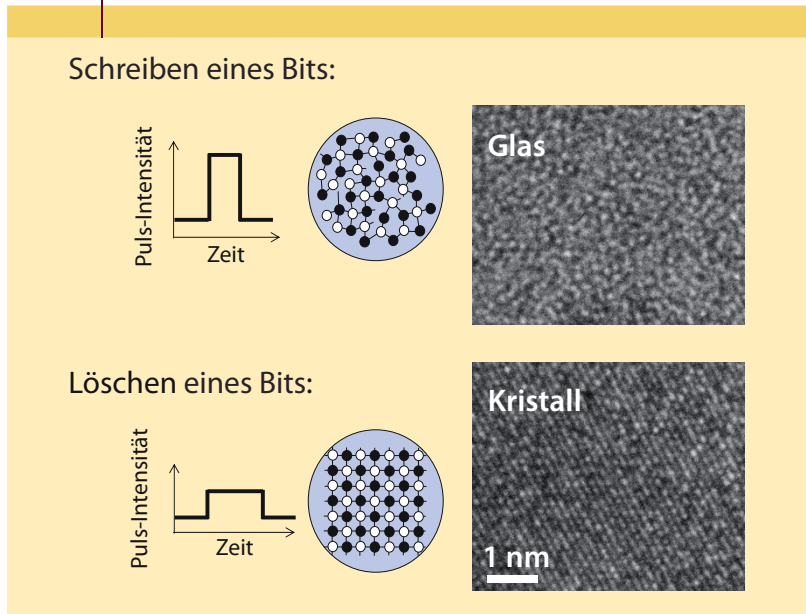
**Wafer mit Speicherzellen aus Phasenwechselmaterial an einem Messplatz unserer Arbeitsgruppe an der RWTH Aachen (Foto: Philipp Merkelbach, RWTH Aachen).**

dem Abschalten sämtliche Daten vergessen. Deshalb müssen sie nach dem Einschalten erst langwierig booten, also das Betriebssystem von der Festplatte hochladen. Große Chiphersteller wie Intel oder Samsung haben bereits erste Prototypen solcher PCM-RAM mit einigen hundert Megabit vorgestellt (PCM steht für Phase Change Material). Solche Speicherchips sind nichtflüchtig wie Flash-Speicher, aber wesentlich schneller als diese.

In der optischen Datenspeicherung sind Phasenwechsel-Materialien längst etabliert. Sie stecken in wiederbeschreibbaren Medien, also in CD-RW, DVD-RW und seit kurzem auch in Blu-Ray-RW (RW: rewriteable). Bei ihnen bewirkt ein Laserpuls das Schalten, indem er das Material lokal auf einem Bereich von einigen 100 nm Durchmesser aufschmilzt. Ein kurzer, intensiver Puls (etwa 10 ns) lässt das Material im Anschluss noch in der amorphen Phase einfrieren (Abbildung 1). Ist er etwas länger (30–100 ns) und weniger intensiv, so lässt er dem Material genug Zeit, um wieder in die geordnete kristalline Phase zu relaxieren. Das Lesen erfolgt mit einem Laserpuls geringerer Intensität: Die kristallinen und amorphen Bereiche reflektieren ihn wegen ihrer unterschiedlichen optischen Eigenschaften verschieden stark.

In Zukunft soll ein verwandtes Konzept die unterschiedlichen elektronischen Eigenschaften der beiden Pha-

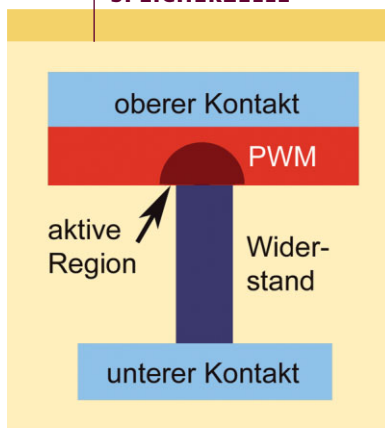
ABB. 1 | DATENSPEICHERUNG DURCH PHASENWECHSEL



Zum Schreiben eines Bits (oben) schmilzt ein intensiver Puls entweder aus Laserlicht oder aus elektrischem Strom das Material sehr kurz auf. Danach kühlt es so schnell wieder ab, dass es in der amorphen Unordnung erstarrt. Bei Phasenwechsel-Materialien steht dieses „Glas“ in einem starken optischen und elektrischen Kontrast zur kristallinen Umgebung, so dass ein schwacher optischer und elektrischer Puls das Bit sicher lesen kann. Beim Löschen (unten) sorgt ein weniger intensiver, längerer Puls als beim Schreiben für ausreichend Wärmeenergie und Zeit, damit die Atome wieder in die kristalline Phase relaxieren können (TEM-Aufnahmen: © M. Naitoh, Univ. Osaka. N. Yamada, Panasonic).

sen für elektronische Speicherzellen nutzen (Abbildung 2). Für das Umschalten zwischen den Phasen sorgt hier kein

ABB. 2 | PHASENWECHSEL-SPEICHERZELLE



Aufbau einer Phasenwechsel-Speicherzelle, rot: Phasenwechsel-Material (PWM). Abhängig vom kristallinen oder amorphen Zustand der aktiven Region ändert sich der Widerstand um mehrere Größenordnungen.

Laser, sondern ein Strompuls. Die Zelle funktioniert als Widerstand, der bei niedrigen Spannungen (Read-Bereich in Abbildung 3) ausgelesen wird. Je nach amorphem oder kristallinem Zustand der Speicherzelle unterscheidet sich ihr elektrischer Widerstand dabei um mehrere Größenordnungen. Für den Schaltprozess (Set- und Reset-Bereiche in Abbildung 3) erhöht man die Spannung, was die aktive Region (Abbildung 2) aufheizt und den Phasenwechsel auslöst.

Die Eigenschaftskombination so verschiedener physikalischer Eigenschaften, nämlich dem schnellen Übergang zwischen amorpher und kristalliner Phase und den großen Unterschieden in den optischen und elektronischen Eigenschaften, ist ungewöhnlich. Deshalb sind Phasenwechsel-Materialien nicht nur kommerziell, sondern auch wissenschaftlich hoch interessant. Hier stellen

wir die wichtigsten Eigenschaften dieser Materialklasse vor und diskutieren offene Fragen der aktuellen Forschung.

### Optische Eigenschaften

Die ersten wissenschaftlichen Veröffentlichungen zur reversiblen Phasenumwandlung von Chalkogeniden widmeten sich dem elektrischen Schalten mit einem Strompuls [1]. Interessanterweise stellte schon 1970 Gordon Moore, Mitbegründer der Firma Intel, einen ersten elektronischen Speicher auf der Basis von Phasenwechsel-Materialien vor. Da die damals bekannten Materialien aber vergleichsweise langsam kristallisierten und die Speicherzellen für ein Bit noch sehr groß waren, benötigte dieser Datenspeicher eine zu hohe Leistungsaufnahme und wurde nie kommerzialisiert. Nachdem in den 1980er Jahren optische Datenträger, allen voran die CD, den Markt für Speichermedien eroberten, konzentrierte sich das wissenschaftliche und technologische Interesse hauptsächlich auf das optische Schalten mit Laserpulsen.

Bei gewöhnlichen anorganischen Halbleitern wie Silicium oder GaAs unterscheiden sich zwar die optischen Eigenschaften der amorphen Phase von denen der kristallinen Phase – aber nur gering. Der Unterschied wird damit erklärt, dass der Verlust der langreichweitigen Ordnung der atomaren Gitterbausteine in der amorphen Phase sozusagen ein Ausschmieren der elektronischen Zustandsdichte verursacht. Bei kristallinen Halbleitern trennt ein verbotener Bereich, die Energiebandlücke, das energetisch höher liegende Leitungsband für frei fließende Elektronen vom tiefer liegenden Valenzband für gebundene Elektronen. In der amorphen Struktur erzeugen Defekte jedoch auch elektronische Zustände in der Bandlücke. Sie schieben also gewissermaßen Zwischensprossen in die Energieleiter. Diese tragen dann zu den optischen Übergängen des Materials bei, so dass zum Beispiel das optische Absorptionsspektrum von demjenigen der kristallinen Phase abweicht. Die Änderungen sind allerdings zu gering, um diese Materialien für die optische Datenspeicherung einzusetzen.

Anders verhält es sich bei den Phasenwechsel-Materialien. Die japanische Forschergruppe um Noburu Yamada bei Panasonic untersuchte Filme, die einige zehn Nanometer dünn waren, mit der Stöchiometrie  $(\text{GeTe})_x(\text{Sb}_2\text{Te}_3)_y$ . Sie fand eine starke Änderung der Reflektivität beim Phasenübergang von der kristallinen zur amorphen Phase [2]. Für die Amorphisierung und Rekristallisation sorgte ein roter Laser mit 830 nm Wellenlänge. Dabei sank die Reflektivität der amorphen Phase bei Verbindungen wie  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  um bis zu 30 %.

Wie sich zeigte, ist die amorphe Phase um 5–10 % weniger dicht als die kristalline. Deshalb nahm man an, dass starke Änderungen der atomaren Struktur für die großen Unterschiede in der Reflektivität – den optischen Kontrast – verantwortlich sind. Dieser Zusammenhang wurde in den vergangenen Jahren genauer untersucht, was schließlich zu einer Erklärung führte. Mit Hilfe einer speziellen Röntgen-Strukturaufklärungsmethode (EXAFS, Extended X-ray Ab-

sorption Fine Structure) fand man, dass die Kochsalzstruktur der kristallinen Phase (Abbildung 4) in der amorphen Phase nicht erhalten bleibt.

Bei der Amorphisierung von Phasenwechsel-Materialien geht nicht nur die langreichweitige Ordnung verloren. Im Gegensatz zu herkömmlichen Materialien ändert sich sogar die lokale Struktur. Die Nahordnung um die Germaniumatome wechselt von einer Koordination mit sechs nächsten Nachbarn hin zu einer mit lediglich vier Nachbaratomen. Die elektronische Struktur lässt sich mit Dichtefunktionaltheorie-Rechnungen (DFT, siehe „Dichtefunktionaltheorie“ auf S. 192) untersuchen. Diese konnten bestätigen, dass solch eine atomare Nahordnung energetisch günstig ist.

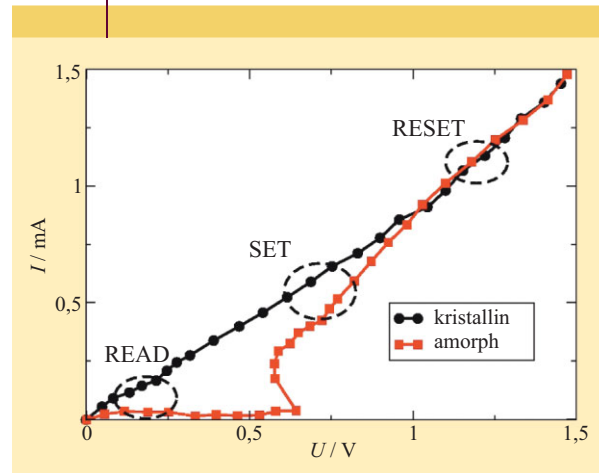
Weitere Experimente und Berechnungen lieferten schließlich ein differenziertes Bild der Nahordnung in amorphen Phasenwechsel-Materialien: Sowohl sechsfach als auch vierfach koordinierte Ge-Atome liegen vor, wobei die vierfach koordinierten Atome entweder  $90^\circ$ -Winkel (oktahedrische Koordination) wie in der Kochsalzstruktur oder  $109^\circ$ -Winkel (tetraedrische Koordination) wie in elementarem Germanium aufweisen. Unsere Rechnungen, die auf der zeitabhängigen DFT basierten, enthüllten schließlich den Zusammenhang zwischen der Struktur beider Phasen und ihren unterschiedlichen optischen Eigenschaften. Diese hängen tatsächlich stark mit der Änderung der Koordinationszahl zusammen.

Die optischen Eigenschaften eines Materials werden im Wesentlichen von zwei Faktoren bestimmt. Einer ist die elektronische Zustandsdichte, die angibt, wie viele Elektronen in einem bestimmten Bereich der Energiebänder vorliegen. Da das Material nur mit Laserlicht wechselwirken kann, wenn in ihm Elektronen für die zur Wellenlänge passenden energetischen Sprünge vorhanden sind, liefert die Zustandsdichte ein Maß für die Anzahl der möglichen optischen Anregungen. Der andere Faktor liegt in den Matrixelementen der Übergänge zwischen diesen Zuständen: Diese quantenmechanische Größe quantifiziert die Intensität eines Übergangs. Das Produkt beider Faktoren liefert schließlich die optische Absorption der Interbandübergänge. Diese Übergänge zwischen dem Leitungs- und Valenzband dominieren die optischen Eigenschaften anorganischer Materialien.

Unsere Rechnungen haben überraschenderweise gezeigt, dass nicht die Änderung der Zustandsdichte entscheidend ist, wie man es erwarten würde. Entscheidend sind die Unterschiede in der Intensität der Übergänge. Diese Intensität ist in der amorphen Phase deutlich geringer als in der kristallinen Phase, was auf eine Verschiebung in der Ladungsdichte zurückzuführen ist. Letzte wiederum wird von der Änderung der lokalen atomaren Struktur verursacht [3].

Eine weitere Besonderheit der Phasenwechsel-Materialien ist ihre hohe Defektkonzentration in der kristallinen Phase. So weist das Kochsalzgitter in der Verbindung  $\text{Ge}_1\text{Sb}_2\text{Te}_4$  auf dem von Ge- und Sb-Atomen besetzten Untergitter eine enorme Leerstellenkonzentration von 25 %

ABB. 3 | STROM-SPANNUNGS-KURVE

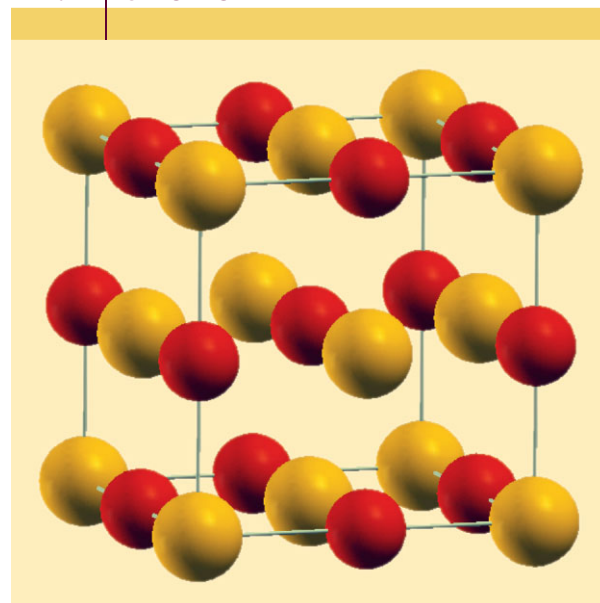


**Strom-Spannungs-Kurve einer Phasenwechsel-Speicherzelle. Set und Reset bezeichnen die Bereiche, in denen die Zelle zwischen den beiden Phasen umschaltet, Read bezeichnet Strom und Spannung des Leseimpulses (aus [12]).**

auf. Das ist selten, weil zur Erzeugung solcher Leerstellen chemische Bindungen aufbrechen müssen, was viel Energie kostet. Bei Phasenwechsel-Materialien ist dies allerdings offensichtlich anders.

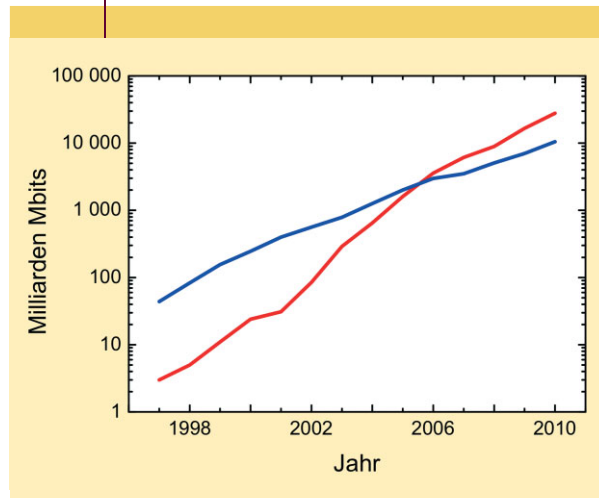
Wir konnten mit DFT-Rechnungen zeigen, warum Verbindungen aus Ge, Sb und Te mit hohen Defektkonzentrationen stabil sind. Nach den Regeln der Molekülorbital-Theorie müssen die Elektronen beim Auffüllen dieser Leerstellen sogenannte antibindende Zustände eingehen, was

ABB. 4 | STRUKTUR



**Die Kochsalzstruktur von GeTe. In ternären Phasenwechsel-Materialien wie  $\text{Ge}_1\text{Sb}_2\text{Te}_4$  ist eines der beiden Untergitter statistisch mit Ge, Sb und Leerstellen besetzt.**

ABB. 5 | MARKT FÜR NICHTFLÜCHTIGE SPEICHER



**Produktionszahlen für Datenspeicher auf der Basis von DRAM (blau) und nichtflüchtigen elektronischen Speichern (rot). Während die Zahl der produzierten Bits für beide Speicherprinzipien exponentiell gewachsen ist, zeigen nichtflüchtige Speicher die größere Wachstumsrate.**

energetisch ungünstig ist. Da jedoch die Energiedifferenzen zwischen Verbindungen mit unterschiedlichen Leerstellenkonzentrationen moderat sind, lässt sich das partielle Auffüllen der Leerstellen realisieren. Dies eröffnet eine Möglichkeit, die Materialzusammensetzung zu ändern und die physikalischen Eigenschaften an eine gewünschte Anwendung anzupassen [4].

In der Tat ändert sich der optische Kontrast mit der Defektkonzentration. Je weniger Leerstellen eine Legierung besitzt, desto stärker unterscheiden sich die optischen Eigenschaften von kristalliner und amorpher Phase. In der kristallinen Phase relaxieren die Atome in eine energetisch günstigere Struktur, die leicht von der Kochsalzstruktur abweicht, indem einige Bindungen kürzer und andere länger werden. Diese strukturellen Verzerrungen beeinflussen auch die Intensität der optischen Übergänge. Da sie in einem vollbesetzten Gitter kleiner ausfallen als bei zahlreichen Leerstellen, zeigen verschiedene Legierungen unterschiedliche optische Eigenschaften.

## DICHTEFUNKTIONALTHEORIE

Mit Hilfe der Dichtefunktionaltheorie (DFT) stellt man die Energie des elektronischen Systems eines Festkörpers in Abhängigkeit von der elektronischen Zustandsdichte dar. Damit lassen sich zahlreiche Eigenschaften wie Bandstruktur, Kompressionsmodul oder Schwingungsspektren für eine Vielzahl von Materialien berechnen. Ihre Grundlagen entwarf der österreichisch-

amerikanische Physiker Walter Kohn zusammen mit dem französischen Kollegen Pierre Hohenberg in den 1960er Jahren. Den erfolgreichen Einsatz in Chemie und Festkörperphysik initiierte 1965 eine bahnbrechende Arbeit von Lu Sham und Walter Kohn. 1998 erhielt Walter Kohn für diese Leistung den Nobelpreis in Chemie.

Diese Erkenntnisse ermöglichen es nun, die bisher empirische Materialsuche – also „Herumprobieren“ – stärker zu systematisieren. Das sollte zu einer schnelleren und effizienteren Entwicklung neuer Materialien für die optische Datenspeicherung führen. In der Tat konnten wir vor kurzem zeigen [5], dass alle Phasenwechsel-Materialien in der kristallinen Phase eine besondere Bindungsform nutzen. Bei dieser Resonanz- oder Mehrzentrenbindung sind die Elektronen zwischen mehreren Atomen lokalisiert. Mit dieser Erkenntnis konnten wir eine erste „Schatzkarte“ für Phasenwechsel-Materialien entwickeln, die bei ihrer systematischen Verbesserung hilft [6].

Ein solches genaues Verständnis der physikalischen Eigenschaften von Phasenwechsel-Materialien wird immer wichtiger, um sie an die rasante technische Entwicklung anzupassen. Der bedeutendste Fortschritt der vergangenen Jahre war die Verringerung der Laserwellenlänge. Bei CDs liegt sie noch im Infraroten bei 870 nm, bei DVDs im Roten bei 650 nm, während die neuen Blu-Ray-Disks blaue Laser mit einer Wellenlänge von 405 nm erfordern. Da die physikalische Mindestgröße der Bits mit der Wellenlänge skaliert, schrumpften sie, und die Speicherkapazität der Scheiben wuchs entsprechend.

Diese Entwicklung erforderte auch andere Phasenwechsel-Materialien. Während die Legierung  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  in wiederbeschreibbaren CDs und DVDs verwendet wird, weil sie einen hohen optischen Kontrast im roten und grünen Spektralbereich aufweist, benutzt man für die Blu-Ray-Technologie Verbindungen mit einem höheren Ge-Anteil wie  $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ . Diese bietet bei kürzeren Wellenlängen einen besseren optischen Kontrast.

In Zukunft wird man allerdings einen anderen Ansatz wählen müssen, um die Speicherdichte von optischen Datenträgern weiter zu steigern. Bewegt man sich nämlich zu noch kleineren Wellenlängen als bei Blu-Ray-Geräten, dann landet man im UV- und schließlich im Röntgen-Bereich. Dafür wird es allerdings wohl so bald keine Laserdioden geben.

## Elektronische Eigenschaften

Neben der optischen Datenspeicherung entwickelt sich der Bereich der elektronischen Datenspeicherung zu einem neuen Anwendungsfeld für Phasenwechsel-Materialien. Dieses Speichersegment wird durch zwei Speichertypen dominiert. Zum einen sind es die schon erwähnten, relativ schnellen DRAM-Speicher, die in einigen wenigen Nanosekunden gelesen, gelöscht oder geschrieben werden können. Deshalb stecken diese zum Beispiel in Arbeitsspeichern von Computern. Allerdings sind sie, wie schon angedeutet, flüchtig: Sie verlieren ihre Information nach Abschalten der Stromzufuhr.

Dieses Manko besitzen Flash-Speicher nicht, dafür sind sie wesentlich langsamer. Deshalb konnten sie sich nicht in Computern, aber bei USB-Speichersticks oder in der Unterhaltungselektronik, etwa als Speicherkarten für Digitalkameras, durchsetzen. Inzwischen hat der Flash den DRAM als meistverkaufter Speichertyp abgelöst (Abbildung 5).

Besonders interessant wäre also ein elektronischer Speicher, der die Geschwindigkeit eines DRAM-Speichers mit der Nichtflüchtigkeit eines Flash-Speichers verbinden könnte. Er könnte dann beide als universeller Speicher ablösen. Wären Phasenwechsel-Materialien dafür geeignet? Besonders kritisch ist dabei die Frage, welche Speichermaterialien am schnellsten sind. Diesen Aspekt diskutieren wir später ausführlich.

Für die elektronische Variante der Datenspeicherung nutzt man wie schon gesagt aus, dass Phasenwechsel-Materialien auch ihre elektronischen Eigenschaften signifikant ändern können: Im kristallinen Zustand ist ihr elektrischer Widerstand um mehrere Größenordnungen niedriger als im amorphen. Wichtig für eine Optimierung von Phasenwechsel-Materialien für die elektronische Datenspeicherung ist ein besseres Verständnis der Transporteigenschaften. Das gilt besonders für die Änderung des elektronischen Transports beim amorph-kristallinen Phasenübergang.

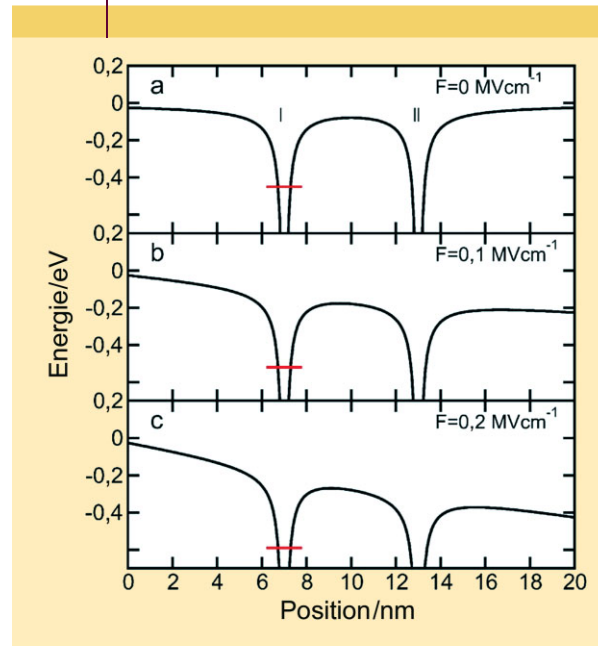
Während in der kristallinen Phase der elektrische Widerstand dem Ohmschen Gesetz folgt, ist sein Verhalten in der amorphen Phase noch nicht vollständig verstanden. Hier kommt es zu einem Schaltvorgang beim Überschreiten einer bestimmten Grenzspannung (Threshold Switching). Dieser Schwellenwert liegt interessanterweise sehr niedrig, was für die Anwendung in der Datenspeicherung besonders wichtig ist. Schließlich möchte man einen Speicher bei möglichst geringer Leistung betreiben. Das gilt besonders für mobile Geräte, deren Akkus nur wenige Volt Spannung liefern.

Abbildung 3 zeigt den Strom-Spannungs-Verlauf im Detail. In der amorphen Phase bleibt der Strom bei niedrigen Spannungen sehr gering. Oberhalb eines Schwellenwertes steigt er dann plötzlich stark an, es kommt also zu einem elektronischen Schalten in der amorphen Phase. Der hohe Strom erwärmt zudem das Speichermaterial, was schließlich zum Phasenübergang in den kristallinen Zustand führt.

Ein analytisches Modell für dieses Schaltverhalten wurde vor kurzem vorgestellt [7]. Es behandelt elektronische Zustände innerhalb der Bandlücke als Potentialsenken, die Elektronen einfangen. Ursache sind wieder strukturelle Defekte wie Leerstellen oder Fehlkoordinationen. Unterhalb der Schwellenspannung benötigt danach ein Elektron in einer Potentialsenke die Energie  $E_C - E_T$ , um zu einer benachbarten Potentialsenke zu hüpfen.  $E_C$  ist dabei die Energie der Leitungsbandkante und  $E_T$  die der Potentialmulde (Trap State). Das Anlegen einer elektrischen Spannung ändert die Form der Potentialschwelen zwischen den Senken und reduziert ihre Höhe (Abbildung 6). Sie verringert also die Aktivierungsenergie für den elektrischen Transport und erzeugt so freie Ladungsträger. Dieser elektrische Strom steigt nach dem Modell exponentiell mit der Spannung, was Experimente belegen.

Noch höhere Spannungen lösen dann einen Übergang in einen Nichtgleichgewichtszustand aus. Die Ladungsträger können nun auch energetisch höhere Zustände nahe an der Leitungsbandkante besetzen. Das steigert den Strom

ABB. 6 | ELEKTRONISCHER TRANSPORT



Potentialprofil für zwei Senken I und II. Die angelegte Feldstärke  $F$  steigt von a) nach c) (aus [7]).

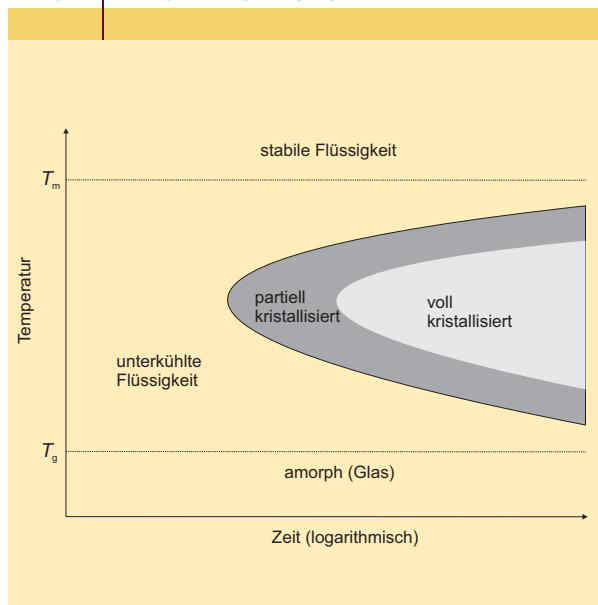
nochmals deutlich und senkt gleichzeitig das anliegende elektrische Feld und somit die Spannung. Genau dieser Spannungsverlauf des Modells entspricht den Messungen. Allerdings muss ein detailliertes Modell der strukturellen und elektronischen Zustände noch erarbeitet werden. Erst damit ließe sich – wie in der optischen Datenspeicherung – gezielt nach neuen Materialien mit den gewünschten Eigenschaften fahnden.

### Kinetik

Das Verständnis der Umwandlungskinetik von Phasenwechsel-Materialien spielt für die Anwendung eine überragende Rolle. Dies kann man sich leicht veranschaulichen, wenn man die Anforderungen an das Material aus der Perspektive der Umwandlungskinetik betrachtet. So soll ein amorpher Bereich des Phasenwechsel-Materials bei Umgebungstemperatur über mehr als zehn Jahre ( $3 \cdot 10^8$  Sekunden) stabil sein, da seine spontane Kristallisation einen Datenverlust bewirken würde. Andererseits soll er durch Erwärmen auf etwa 400 bis 500 °C in wenigen Nanosekunden kristallisieren. Diese Veränderung der Temperatur soll also die Kinetik der Kristallisation um 16 bis 17 Größenordnungen erhöhen.

Es ist offensichtlich, dass nur eine kleine Gruppe von Materialien eine solch extreme Änderung der Kristallisationskinetik ermöglicht. Um das zu verstehen, müssen wir uns die Kristallisationsprozesse ansehen, die bei Temperaturen zwischen der Schmelztemperatur und der Glasatemperatur stattfinden (Abbildung 7). Die Kristallisation einer flüssigen Phase ist thermodynamisch erlaubt, führt also zu einer Reduktion der Energie, sobald die Flüssigkeit unter die

ABB. 7 | KRISTALLISATIONSKINETIK



**Kristallisationskinetik von Phasenwechsel-Materialien. Unterhalb der Schmelztemperatur wächst der Antrieb zum Phasenübergang mit sinkender Temperatur, gleichzeitig sinkt die Beweglichkeit der Atome. Das Zusammenspiel dieser beiden gegenläufigen Trends führt zu dem ausgeprägten Maximum der Umwandlungskinetik bei mittleren Temperaturen um 500 °C. Bei Phasenwechsel-Materialien läuft der Phasenübergang im Nanosekunden-Bereich ab.**

Schmelztemperatur abgekühlt wird. Je tiefer die Temperatur der Flüssigkeit unter die Schmelztemperatur sinkt, umso stärker wird der Antrieb zum Kristallisieren. Gleichzeitig sinkt die atomare Beweglichkeit mit fallender Temperatur.

Dies führt dazu, dass bei Temperaturen knapp oberhalb der Glasübergangstemperatur (Abbildung 7) der Kristallisationsantrieb sehr stark ist. Die Beweglichkeit der Atome ist jedoch so gering, dass die Kristallisation extrem langsam abläuft. Auch knapp unterhalb der Schmelztemperatur ist die Kristallisation sehr langsam. In diesem Temperaturbereich ist zwar die atomare Beweglichkeit hoch, aber nun ist die Tendenz in Richtung Kristallisation sehr schwach. Die höchste Kristallisationsgeschwindigkeit wird daher bei Temperaturen beobachtet, die ungefähr in der Mitte zwischen der Temperatur des Glasübergangs  $T_g$  und der Schmelztemperatur  $T_M$  liegt. Hier lassen sowohl der Kristallisationsantrieb als auch die atomare Beweglichkeiten eine schnelle Kristallisation zu.

David Turnbull von der Harvard University zeigte 1969 [8], dass die reduzierte Glasübergangstemperatur

$$T_{rg} = T_g/T_M,$$

die typischerweise zwischen 0,4 und 0,85 liegt, umgekehrt proportional zur Kristallisationsgeschwindigkeit ist. Materialien wie  $\text{SiO}_2$ , die sich leicht in die Glasphase überführen

lassen und nur sehr langsam kristallisieren, haben reduzierte Glasübergangstemperaturen oberhalb von 0,7. Phasenwechsel-Materialien hingegen besitzen sehr niedrige reduzierte Glasübergangstemperaturen, die typischerweise zwischen 0,45 und 0,55 liegen [9]. Damit sind Phasenwechsel-Materialien offensichtlich schlechte Glasbildner, die besonders leicht kristallisieren. Diese Erkenntnis sollte helfen, neue Materialien zu finden, die sich in wenigen Nanosekunden rekristallisieren lassen.

### Zukünftige Entwicklungen

Phasenwechsel-Materialien haben sowohl in der optischen als auch in der elektronischen Datenspeicherung großes Anwendungspotenzial. Gerade im optischen Bereich steht man allerdings heute vor einem entscheidenden Umbruch, der ganz neue Ansätze erfordert. Eine weitere Verringerung der Laserwellenlänge ist technisch kaum noch möglich, so dass man Alternativen finden muss, um die Speicherdichte in Zukunft zu erhöhen.

Eine Möglichkeit besteht im Umschiffen der Beugungsgrenze, indem man optische Nahfeldeffekte ausnutzt. Ein Beispiel ist die Immersionslinse (Solid Immersion Lens, SIL) [10]. Sie schwebt nur 30 nm über dem optischen Speichermedium und steigert die numerische Apertur von 0,85 (Blu-Ray) auf 1,9. Dadurch erhöht sich die örtliche Auflösung des Laserstrahls, der so kleinere Bit-Strukturen schreiben und auslesen kann. Eine andere Technologie basiert auf dem Super-RENS-Effekt (Super-Resolution Near-Field Structure) [11]. Bei ihr bringt man eine Schicht mit ausgeprägten nichtlinearen optischen Eigenschaften, etwa Antimon, auf die Speicherschicht. Im Laserlicht wirkt sie ähnlich wie eine Immersionslinse und ermöglicht so das Schreiben und Lesen kleiner Strukturen unterhalb der Beugungsgrenze. Die Ursache dieses Effekts ist übrigens noch nicht vollständig verstanden.

Im Bereich der elektronischen Datenspeicherung kommt es heute zum einen darauf an, Phasenwechsel-Legierungen mit relativ niedriger Schwellenspannung zu finden. Dies reduziert den Energieverbrauch des Speichers: Phasenwechsel-Medien haben in diesem wichtigen Punkt zum Beispiel gegenüber der Flash-Technologie noch Aufholbedarf. Das andere wichtige Kriterium ist die Geschwindigkeit der Datenspeicher. Die Prozesse in Phasenwechsel-Materialien sind noch etwas langsamer als in DRAM-Speichern, die in wenigen Nanosekunden geschaltet werden können. Wir konnten allerdings kürzlich mit unserer Gruppe in Aachen an einem Material zeigen, dass man es elektronisch in weniger als zehn Nanosekunden schalten kann [13].

Also müssen ähnlich schnelle Phasenwechsel-Materialien gefunden werden. Da diese nichtflüchtig sind, ließe sich mit Phasenwechsel-Materialien ein Universalspeicher verwirklichen, der sowohl die Festplatte als auch den Speicher im PC ersetzen könnte. Einen solchen Computer müsste man nicht mehr langwierig hochfahren, sondern man könnte ihn wie eine Lampe einschalten.

## Zusammenfassung

Phasenwechsel-Materialien besitzen in der amorphen Phase signifikant andere optische und elektrische Eigenschaften als in der kristallinen. Dieser starke Kontrast beider Phasen ermöglicht das sichere Lesen von digitaler Information, selbst wenn die Bits sehr dicht gepackt sind. Zudem lassen sich Phasenwechsel-Materialien durch kurzes, lokales Erhitzen per Laser- oder Strompuls in weniger als zehn Nanosekunden von einer Phase in die andere umschalten. Als nichtflüchtige elektronische Datenspeicher könnten sie in Zukunft die schnellen, aber vergesslichen DRAM-Chips heutiger Computer ersetzen. Als optische Speicher sind sie in wiederbeschreibbaren CDs, DVDs und Blu-Ray-Disks etabliert. Phasenwechsel-Materialien sind zudem für die Grundlagenforschung hoch interessant.

## Stichworte

Phasenwechsel-Material, Chalkogenid, Phasenwechsel-Speicher, kristallin, amorph, Phasenübergang, optischer Speicher, CD, DVD, Blu-Ray-Disk, elektronischer Speicher, DRAM, Flash, Immersionslinse, RENS-Effekt.

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei den Mitarbeitern der Phasenwechselgruppe des I. Physikalischen Institutes der RWTH Aachen für die Beiträge zu den hier präsentierten Ergebnissen.

## Literatur

- [1] S. R. Ovshinsky, Phys. Rev. Lett. **1968**, 21, 1450.
- [2] N. Yamada, MRS Bull. 21 **1996**, 9, 48.
- [3] W. Welnic et al., Phys. Rev. Lett. **2007**, 98, 236403.
- [4] M. Wuttig et al., Nature Materials **2007**, 6, 122.
- [5] K. Shportko et al., Nature Materials **2008**, 7, 653.
- [6] D. Lencer et al., Nature Materials **2008**, 7, 972.
- [7] D. Ielmini, Y. Zhang, J. Appl. Phys. **2007**, 102, 054517.
- [8] D. Turnbull, Contemp. Phys. **1969**, 10, 473.
- [9] J. Kalb et al., J. Mater. Res. **2007**, 22, 748.
- [10] B. D. Terris et al., Appl. Phys. Lett. **1994**, 65, 388.
- [11] T. Shima et al., Jpn. J. Appl. Phys. **2005**, 44, 3631.
- [12] A. Pirovano et al., IEEE Transactions **2004**, 51, 714.
- [13] G. Bruns et al., bei Appl. Phys. Lett. eingereicht.

## Die Autoren



Wojciech Welnic studierte Physik in Aachen und London und promovierte in 2006 an der RWTH Aachen. Danach war er zwei Jahre als Humboldt-Stipendiat an der Ecole Polytechnique in Paris sowie am ESRF in Grenoble. 2008 erhielt er für seine Arbeiten an Phasenwechsel-Materialien den Wissenschaftspreis des Landes Nordrhein-Westfalen. 2009 wechselte er in die Industrie.



Matthias Wuttig studierte Physik in Köln und promovierte 1988. Nach Forschungsaufenthalten in Berkeley, Tsukuba (Japan), Marseille und Murray Hill (Bell Labs) ist er seit 1997 ordentlicher Professor am Lehrstuhl für Physik neuer Materialien der RWTH Aachen. 2007 erhielt er den Stanford R. Ovshinsky Prize. Von der chinesischen Akademie der Wissenschaften wurde ihm 2009 eine Einstein-Professur verliehen.

## Anschrift

Prof. Dr. Matthias Wuttig, I. Physikalisches Institut (IA), RWTH Aachen, D-52056 Aachen.  
Wojtek.Welnic@googlemail.com,  
Wuttig@physik.rwth-aachen.de

# Krebstherapie mit Ionen in der klinischen Anwendung

## Tumore unter schwerem Beschuss

GERHARD KRAFT

*Im Heidelberger Klinikum geht die erste kombinierte Ionenstrahl-Anlage demnächst in Betrieb. Dort werden Krebstumore mit Kohlenstoff- und Protonenstrahlen behandelt. Nach einer mehr als zehnjährigen Entwicklungsphase gelang damit der Ionentherapie der Sprung von der Grundlagenforschung in die Kliniken.*

Bereits 1946 erkannte der spätere Direktor des Fermilab Robert Wilson an der Universität Berkeley die medizinischen Vorteile von Ionenstrahlen für die Tumorthherapie. Bei Messungen am Zyklotron fand er heraus, dass mit wachsender Eindringtiefe der Ionen die deponierte Dosis bis zu einem Maximum am Ende der Reichweite ansteigt. Diese invertierte Dosisverteilung ermöglicht es, Tumore tief im Körper mit einer hohen Dosis zu bestrahlen, ohne das Normalgewebe im Eingangsbereich stark zu schädigen [1].

Obwohl Wilson sofort die Ionenstrahlen für die Tumorthherapie vorschlug, wird erst jetzt – mehr als 60 Jahre später – der Durchbruch zu einer breiteren klinischen Anwendung erzielt: Mit Ionentherapien, vor allem Protonenanlagen der ersten Generation, wurden weltweit mehr als 50 000 Patienten behandelt. Jetzt entstehen neue Anlagen, meist kombinierte Kohlenstoff-Protonen-Anlagen mit erheblich besseren Eigenschaften. Voraussetzung für den Durchbruch waren neue Methoden der computergesteuerten Strahlrasterung und der Bestrahlungsplanung. Mittlerweile zeigen die klinischen Ergebnisse gerade bei strahlenresistenten Tumoren große Erfolge und das mit weniger Nebenwirkungen als bei konventioneller Bestrahlung (Abbildung 1).

gen bei der konventionell verwendeten Röntgenstrahlung Tumor- und Normalgewebe fast dieselbe Strahlenempfindlichkeit. Damit ist es unmöglich, bei einer gleichförmigen Bestrahlung alle Tumorzellen zu zerstören, ohne gleichzeitig das Normalgewebe zu schädigen. Deshalb sollte sich die Bestrahlung exakt auf das Zielvolumen konzentrieren und das Normalgewebe weitgehend aussparen oder nur mit einer niedrigen Dosis belasten.

Wichtiges Qualitätskriterium ist in dieser Hinsicht das Tiefendosisprofil. Wegen der statistischen Wechselwirkung der elektromagnetischen Strahlung mit dem Gewebe nimmt die deponierte Energie (Dosis) exponentiell mit der Eindringtiefe ab. Allerdings werden bei hohen Photonenenergien die im Gewebe erzeugten Elektronen nach vorne gestreut, und geben ihre Energie erst am Ende ihrer Reichweite ab. Dies führt zu einem anfänglichen Dosisanstieg, der bei hochenergetischen Photonen von einigen MeV (Röntgenstrahlen) das Dosismaximum einige Zentimeter unter die Körperoberfläche schiebt, gefolgt von einem exponentiellen Abfall für größere Tiefen (Abbildung 2) [2].

Im Gegensatz zu Photonen haben Ionen wie eingangs erwähnt ein invertiertes Dosisprofil, das heißt die Dosis steigt mit zunehmender Eindringtiefe und mit abnehmender Teilchenenergie oder Geschwindigkeit an. Wenn die Ionen langsamer werden, nimmt die Interaktionszeit mit den Elektronen der Atome im Gewebe zu, und es kann eine höhere Energie ausgetauscht werden. Erst am Ende der Teilchenreichweiten werden bei kleiner Ionenenergie zunehmend wieder Elektronen an das Ion gebunden und damit die Ionenladung verringert, bis bei einem neutralen Atom der Energieverlust auf sehr kleine Werte absinkt. Dies führt insgesamt zu der günstigen Tiefendosisverteilung der Ionen mit einem steilen Dosismaximum, dem so genannten Bragg-Maximum, am Ende der Reichweite.

In der modernen Röntgenstrahlentherapie wird mit einer ausgefeilten Technik aus verschiedenen Eingangskanälen auf das Zielvolumen „geschossen“. In dieser intensitätsmodulierten Strahlentherapie (Intensity Modulated Radiation Therapy, IMRT) setzt man bis zu zehn Eingangskanäle ein und passt Kontur und Intensität an jeden einzelnen Kanal an. Damit lassen sich heutzutage auch tief liegende Tumore mit hoher Präzision bestrahlen (Abbildung 3). Der Planungs- und Bestrahlungsaufwand ist aber erheb-

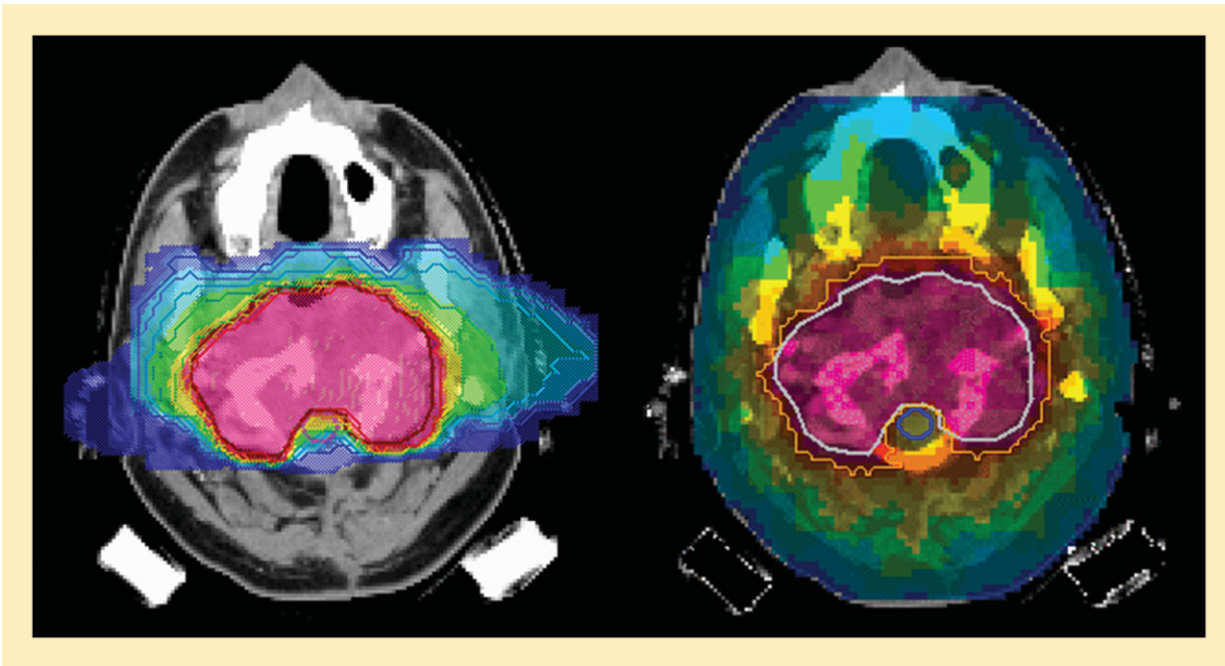
### INTERNET

Biophysik und Ionenstrahl-Therapie an der GSI  
[www.gsi.de/forschung/bio](http://www.gsi.de/forschung/bio)

Information der Particle Therapy Cooperative Group  
[ptcog.web.psi.ch](http://ptcog.web.psi.ch)

### Teilchenstrahlen und ihre biologische Wirkung

Mit einer genügend hohen Dosis ionisierender Strahlung kann man jedes biologische Gewebe zerstören (siehe „Definition der Dosis“, S. 199). Allerdings zei-



**Abb. 1** Vergleich von Kohlenstoffbestrahlung (links) und Photonenbestrahlung (rechts). Bei den Röntgenphotonen (intensitätsmodulierte Bestrahlung) werden neun Eingangskanäle benutzt, um die hohe Dosis gleichmäßig zu verteilen. Für Kohlenstoff ist bei nur zwei Eingangskanälen die Belastung des gesunden Gewebes sehr viel kleiner, wie die farbkodierte Dosis zeigt.

lich größer als in der konventionellen Strahlentherapie, und das Normalgewebe wird mit einer höheren Dosis belastet.

Mit Teilchenstrahlen dagegen ist das Tiefendosisproblem gelöst. Das invertierte Dosisprofil der Ionen garantiert bereits bei einer Bestrahlung aus einer einzigen Richtung eine höhere Dosis im Tumor als im Normalgewebe. Allerdings ist die Anpassung des Strahls an das Zielvolumen schwierig. Es wurde letztlich erst mit dem Rasterverfahren, das ich später genauer beschreibe, gelöst.

Ziel einer Therapie ist es, alle Zellen eines Tumors zu inaktivieren, da aus einer einzigen überlebenden Tumorzelle ein neuer Tumor entstehen kann. Im Allgemeinen handelt es sich um mehr als  $10^{10}$  Zellen. Der Prozess des gewünschten Untergangs von Tumorzellen ist eine komplexe biologische Reaktion. Sie beginnt mit dem Energieverlust des Primärteilchens hauptsächlich durch die Produktion von freien Elektronen im Gewebe. Diese zerstören chemische Bindungen und verursachen damit Schäden an biologischen Molekülen. Das wichtigste und größte Molekül ist die DNA, aufgeteilt in einzelne Chromosomen. Sie liegen in jeweils zwei Kopien pro Zelle vor und werden wegen ihrer Größe am häufigsten getroffen.

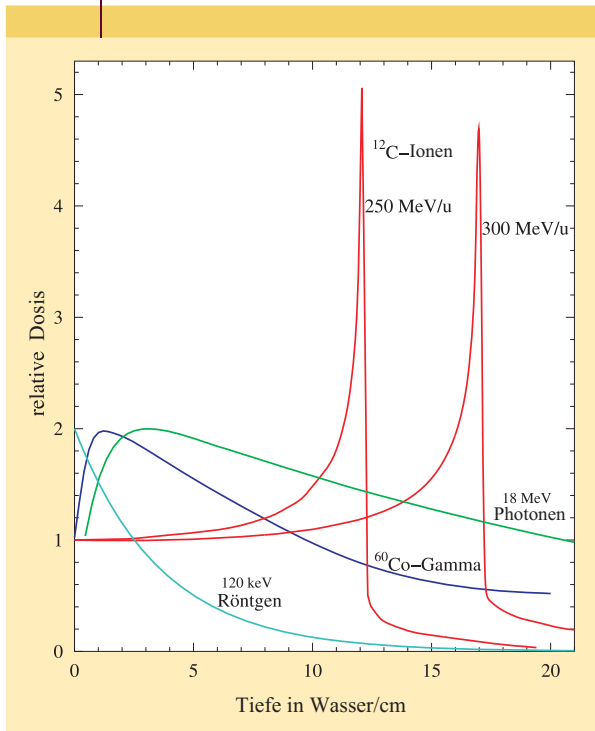
Nun verfügen die Zellen über ein ausgefeiltes DNA-Reparatursystem, das uns unsere genetische Integrität garantiert und lebensnotwendig ist. Es eliminiert DNA-Schäden, die bei der Replikation (Vervielfältigung) und durch äußere Einwirkung wie kosmische Strahlen oder chemische Stoffe entstehen. Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass DNA-Schäden irreparabel sind, hängt von der biologischen Reparaturkapazität *und* von der physikalischen Struktur der

Schäden und damit von der betroffenen Zellsorte sowie der Ionisationsdichte ab. Einfache Treffer von dünn ionisierender Strahlung führen zu einfachen, meist reparablen Schäden. Hohe lokale Ionisationsdichten haben mehrfache DNA-Schäden zur Folge, die die Zelle nicht mehr reparieren kann. Sie werden entweder durch eine generell höhere Photondosis produziert oder entstehen im Innern von Teilchenspuren.

Experimente mit einer Vielzahl unterschiedlicher Ionensorten haben gezeigt, dass Kohlenstoffionen mit hoher Energie meist reparable Schäden hervorrufen. Erst am Ende der Reichweite, im Bragg-Maximum, steigt die lokale Ionisationsdichte und damit auch der Anteil der nicht reparablen Schäden. Dies drückt sich im Verlauf der relativen biologischen Wirksamkeit RBW aus. Sie ist definiert als das Verhältnis der Dosis der Standard-Röntgenstrahlung zur Dosis der Ionenstrahlen, die den gleichen Effekt auslöst. Für Kohlenstoffionen fällt das RBW-Maximum in der Tiefenverteilung mit dem Dosismaximum zusammen (Abbildung 4). Damit wird die hohe Dosis am Ende der Teilchenreichweite durch den RBW-Anstieg in ihrer Wirksamkeit um das Zwei- bis Dreifache gesteigert.

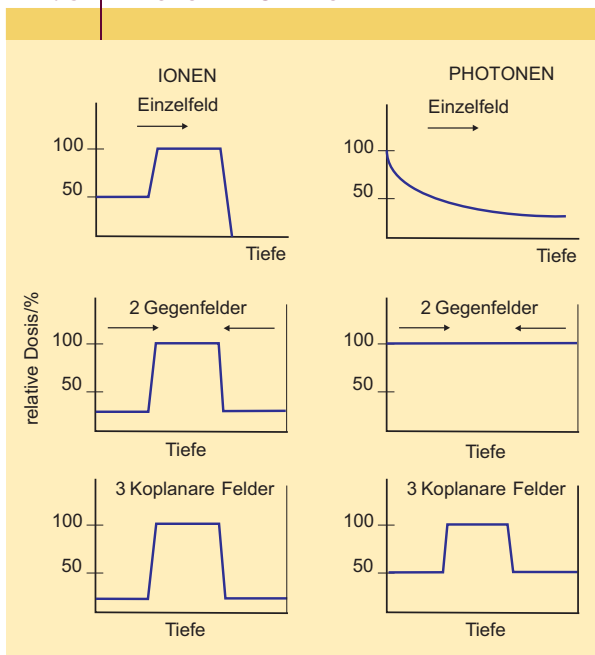
Für andere Ionen liegen RBW-Maximum und Dosismaximum auseinander: Für Protonen steigt die RBW erst auf dem letzten Millimeter der Reichweite hinter dem Bragg-Maximum an, wenn die Dosis bereits wieder abfällt. Deshalb ist die klinische Wirkung der Protonen kaum durch eine erhöhte biologische Wirksamkeit bestimmt. Sie wird global mit einer fünfzehnprozentigen Dosisüberhöhung berücksichtigt. Für die schwereren Ionen, wie das in Berkeley fa-

**ABB. 2 TIEFENDOSIS**



**Tiefendosis-Verteilungen von Photonen und Teilchenstrahlen. Für Photonen fällt die Dosis mit der Tiefe ab. Teilchenstrahlen haben dagegen am Ende der Reichweite ein Dosismaximum, das über den Tumor gelenkt werden kann.**

**ABB. 3 PHOTONEN UND IONEN**



**Schematischer Vergleich der Tiefendosis-Verteilung von Photonen (rechts) und Ionenstrahlen. Mit Ionen kann bereits bei einseitiger Bestrahlung eine deutliche Überhöhung der Dosis im Tumor erreicht werden.**

vorisierte Neon, liegt der Bereich erhöhter RBW vor dem Dosisanstieg zum Bragg-Maximum, während im Bragg-Maximum Sättigungseffekte die Wirksamkeit beschränken. Dies führt bereits im Normalgewebe vor dem Tumor zu erheblichen Nebenwirkungen und nur zu einer wenig erhöhten Wirksamkeit der Dosis im Zielvolumen. Allein für Kohlenstoff und eventuell die etwas schwereren Ionen wie Stickstoff und Sauerstoff fallen Dosisanstieg und maximale RBW zusammen und führen zu einer Potenzierung der biologischen Wirkung am Ende der Reichweite.

Allerdings setzt eine Bestrahlung mit Kohlenstoffionen eine biologisch optimierte Planung voraus. Es war deshalb eine der wesentlichen Aufgaben der Biophysik-Experimente am Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt (GSI), mit biologischen Proben unterschiedlicher Reparaturfähigkeit die Abhängigkeiten der Zellinaktivierung von Ionensorte und Energie systematisch zu untersuchen. Anschließend wurden die gemessenen Abhängigkeiten in ein Modell umgesetzt. Mit diesem Modell werden in der Bestrahlungsplanung die lokalen RBW-Werte aufgrund der klinischen Daten berechnet [4].

### Technische Entwicklung der Ionentherapie

Bei Beginn der Teilchentherapie in Berkeley wurden in Anlehnung an die konventionelle Röntgentherapie passive Strahlformungsverfahren benutzt. Kollimatoren, Streufohlen und Kompensatormaterialien modulierten den Strahl seitlich und in der Tiefe. Mit diesen passiven Methoden war vor fünfzig Jahren die Qualität der Bestrahlung besser als bei den damaligen Röntgentherapien. Aber nach der Entwicklung der intensitätsmodulierten Strahlentherapie, IMRT, wurden die passiven Teilchenverfahren unbefriedigend, weil etwa ein Drittel des Hochdosisbereiches im Normalgewebe blieb.

Bezeichnenderweise vollzog sich dann der Paradigmenwechsel von passiver zu aktiver Strahlapplikation, sprich dem Rasterverfahren, nicht an den etablierten Teilchentherapie-Zentren, sondern in den Laboratorien von zwei Neueinsteigern. Vor etwa zehn Jahren entwickelten wir an der GSI und am Paul-Scherrer-Institut (PSI) in Villigen, Schweiz, ein Rasterverfahren, das eine extrem konforme Bestrahlung des Zielvolumens ermöglicht [3] (s. Physik in unserer Zeit, 1998, 29 (4), 152).

Das Rasterprinzip zur Strahlformung war schon früher diskutiert worden, aber in den etablierten Teilchentherapie-Zentren wurde es als aufwendig und technisch nicht beherrschbar angesehen. Die Vorstellung, mit einem feinen, aber hochintensiven Strahl wie mit einem chirurgischen Messer im Blindflug die Patienten zu operieren, galt als zu risikoreich. Ein Wechsel in dieser Vorstellung war erst gegen Ende der 1980iger Jahre möglich, als die bildgebenden Verfahren das Zielvolumen genauer spezifizieren konnten und die Rechnerleistungen ausreichten, den Strahl punktweise zu steuern. Schließlich wurde auch noch ein Verfahren zur Strahlkontrolle im Patienten ent-

wickelt (siehe „Zusatzmaterial zu den Heften“ auf [www.phiu.de](http://www.phiu.de)).

Im Rasterscan-Verfahren wird das Zielvolumen in Schichten gleicher Teilchenreichweiten zerlegt. Man spricht von Isoenergieschichten. Diese werden mit einem rasterförmigen Muster von Bildpunkten (Pixel) belegt und seriell mit einem feinen Strahl abgearbeitet. Zahl und Ort der Ionen wird für jedes Pixel so berechnet, dass sich insgesamt die gewünschte Verteilung im Zielvolumen ergibt (Abbildung 5).

Für eine Tumorgroße von einigen hundert Kubikzentimetern werden 20 000 bis 50 000 Bildpunkte in 30 bis 60 Schichten je nach Tumorgeometrie innerhalb von drei bis fünf Minuten bestrahlt. Die Strahlenergie wird von Puls zu Puls vom Beschleuniger variiert. Außer dem Austrittsfenster und den Messkammern befindet sich keine Materie im Strahl. Damit sind die Aufstreuung und die Produktion von Neutronen und somit auch das Risiko von Sekundärtumoren gering.

Das Rasterscan-System erfordert also eine multiple Anpassung in Energie, Fokus und Intensität. Da ein Teil dieser Optionen wie Intensitäts- und Energievariation am besten im Beschleuniger verwirklicht werden, wird dieser ein integrierter Teil der Strahlapplikation. Diese Anforderung können mit einem Synchrotron erfüllt werden (mehr zu der erforderlichen Technik erfahren Sie im Zusatzmaterial auf [www.phiu.de](http://www.phiu.de)).

Das Rasterverfahren erlaubt erstmals eine dreidimensionale Anpassung des bestrahlten Volumens an das Zielvolumen mit einer sehr guten Auflösung von drei bis vier Millimetern. Nur durch diese hohe Konformität konnte die Dosis im Zielvolumen gesteigert und gleichzeitig das Normalgewebe geschont werden.

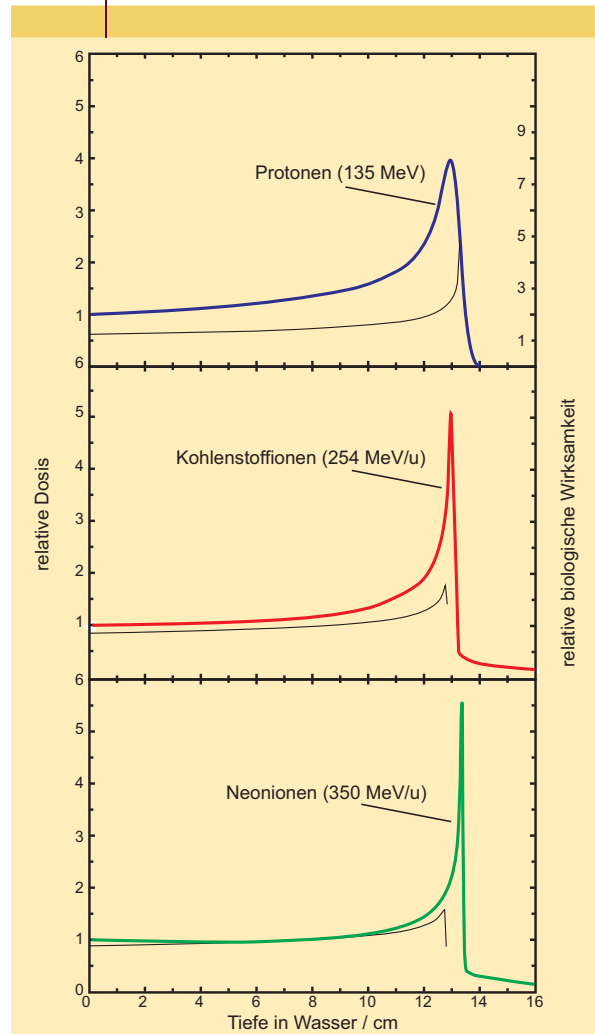
Erst heute, mehr als zehn Jahre nach der Einführung von Scantechniken, wird das Rasterverfahren auch von anderen Zentren benutzt. Obwohl seine Überlegenheit anerkannt ist, schreckten viele neue Zentren, vor allem in den USA, wegen seiner Komplexität davor zurück.

### Patientenbestrahlungen und klinische Ergebnisse

In einer engen Zusammenarbeit zwischen der GSI und dem Forschungszentrum Dresden wurde in der Zeit von 1993 bis 1997 die Therapie aufgebaut. Gleichzeitig lösten wir in enger Kooperation mit der Heidelberger Radiologie und dem Deutschen Krebsforschungszentrum viele medizinische Fragen der Diagnose, Bestrahlungsplanung und vieles mehr. Ab Dezember 1997 war es dann möglich, die ersten Patienten zu behandeln. Hierfür stellte die GSI pro Jahr jeweils drei Strahlzeiten von je einem Monat zur Verfügung, in denen bis zu 15 Patienten pro Block behandelt wurden. Im Normalfall erhielt jeder Patient an 20 aufeinander folgenden Tagen eine Bestrahlung von jeweils etwa 3 Gy (Abbildung 6), die jeweils drei bis sechs Minuten dauerte.

In einer ausschließlich für die Patientenbehandlung gebauten Therapieanlage mit mehreren Bestrahlungsräumen

ABB. 4 DOSIS UND RBW



**Dosis (linke Skala, farbige Kurven) und Relative biologische Wirksamkeit RBW (rechte Skala, schwarze Kurven) als Funktion der Tiefe. Für Protonen liegt das Maximum der RBW auf dem abfallenden Teil der Dosis Kurve, für Neon vor dem Maximum der Dosis. Nur für Kohlenstoff fallen RBW und Dosisverlauf zusammen. Bei Neonionen ist das RBW-Maximum zum Eingang verschoben, und das Dosismaximum liegt bereits im Sättigungsbereich der biologischen Wirkung.**

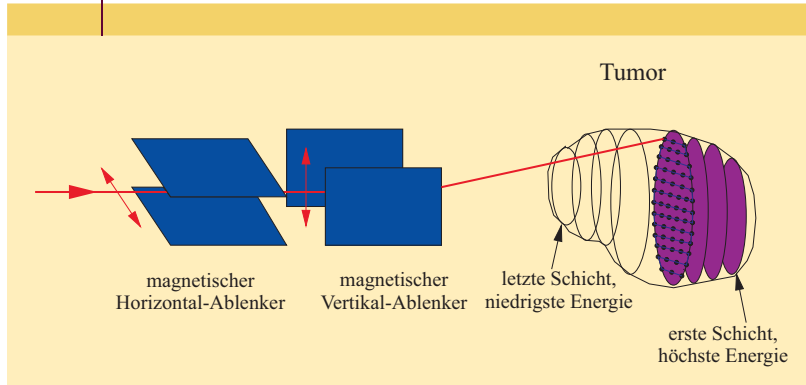
### DEFINITION DER DOSIS

In der Strahlentherapie wird die Energie, die in einem Körper pro Masseneinheit deponiert wird, als Dosis bezeichnet. Die Einheit der Dosis ist das Gray: 1 Gy = 1 Joule/kg. Die tägliche Dosis einer konventionellen Therapie liegt bei 2 bis 3 Gy, die Gesamtdosis bei 60 bis 70 Gy, verteilt über circa 30 Fraktionen in sechs Wochen.

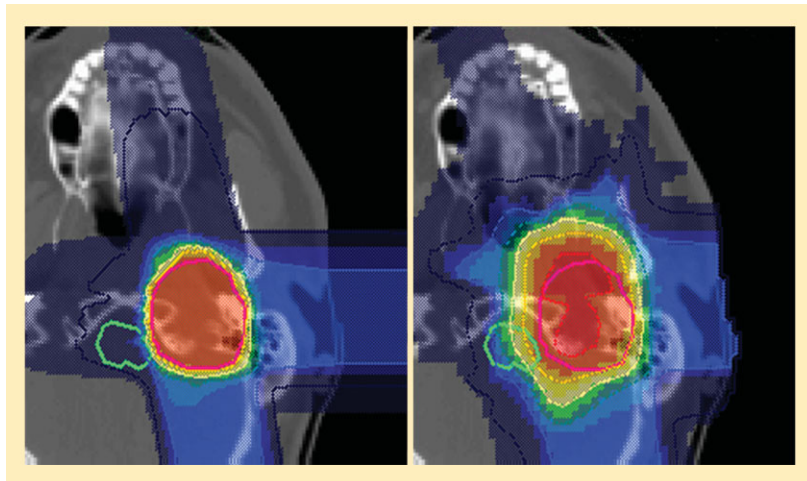
Absolut gesehen sind dies sehr kleine Energiemengen. Sie führen im Zielvolumen zu einer sehr geringen Energie-

erhöhung von einigen tausendstel Grad, liegen also weit unterhalb der Temperaturschwankung im Tageszyklus. Die Wirkung ionisierender Strahlung ist deshalb kein Temperatureffekt. Die Ionisation kann direkt an chemischen Bindungen angreifen und zu gravierenden biochemischen und damit biologischen Schäden führen. Dies gilt vor allem für Schäden an der DNA, die die gesamte genetische Information enthält.

ABB. 5 | RASTERTECHNIK



**Prinzip des Rasterscan-Verfahrens. Der feine Strahl mit wenigen Millimetern Durchmesser wird mit zwei schnellen Magneten senkrecht und waagrecht über jede Scheibe des Tumors geführt.**



**Abb. 6 Vergleich von Bestrahlungsplänen mit Kohlenstoffionen (links) und mit Protonen (rechts). Der Kohlenstoff-Bestrahlungsplan hat einen steileren Randabfall. Damit kann die Dosis näher an den Hirnstamm (grüne Struktur links vom Zielvolumen) gerückt werden. Außerdem wurde der Protonenplan mit passiven Strahlformungsmethoden erstellt, die eine geringere Anpassung an das Zielvolumen ergeben.**

lassen sich diese Abläufe optimieren und die Zeiten verkürzen. Damit reduzieren sich die Kosten von 30 000 € für eine komplette Behandlung an der GSI auf unter 20 000 €. Die Kosten einer Ionenbehandlung sind damit vergleichbar mit den mittleren Kosten eines chirurgischen Eingriffs in der onkologischen Praxis.

Bis jetzt wurden etwa 4000 Patienten mit Kohlenstoffionen bestrahlt, davon 440 mit der Rastermethode (Intensitätsmodulierte Partikel Therapie, IMPT) bei der GSI und der größte Teil in Japan am National Institute for Radiological Science NIRS, in Chiba, sowie in Hyogo mit passiver Strahlapplikation. Die klinischen Ergebnisse aller Kohlenstofftherapien sind in [5] ausführlich beschrieben.

Obwohl die beiden Laboratorien verschiedene Methoden anwandten, unterscheiden sich die Daten der Tumorkontrolle bei vergleichbarer Dosis kaum – wohl aber die der

Nebenwirkung und damit in der maximal möglichen Tumordosis. Von erfolgreicher Tumorkontrolle spricht man, wenn es fünf Jahre lang keine Anzeichen eines Wiederauflebens oder Neuwachstums desselben Tumors gibt.

In allen Fällen konnten in der Kohlenstofftherapie die Werte der besten konventionellen Therapie erreicht, in den meisten Fällen aber übertroffen werden. Ein gutes Beispiel bietet die Tumor-Kontrollwahrscheinlichkeit als Funktion der Dosis für Chondrosarkome, einem relativ seltenen Tumor im Schädelbasisbereich. Bei konventioneller Therapie liegt für diesen Tumor die Kontrollrate bei 20 bis 30 %. Mit Protonen und mit IMRT lässt sich dieser Wert auf mehr als 50 % steigern. Mit der Kohlenstoffbestrahlung bei der GSI konnte dann durch Erhöhung der Dosis die Fünfjahres-Tumorkontrolle auf 100 % gebracht werden. Diese Dosiseskulation ist nur wegen der reduzierten Nebenwirkungen durch das Rasterscan-Verfahren möglich (Abbildung 7).

In Zukunft wird man diese Strategie der Dosiseskulation weiter ausbauen, um eine totale Tumorkontrolle zu erreichen. Eine andere Erfolg versprechende Strategie sind „Boost“-Bestrahlungen, bei denen Röntgenbestrahlung mit Kohlenstofftherapie kombiniert wird. Bei einigen Tumoren muss man davon ausgehen, dass es neben dem eigentlichen Tumorherd auch viele, über das angrenzende Gewebe verstreute Krebszellen gibt. Dann ist es sinnvoll, eine großflächige Röntgenbestrahlung mit einer auf den begrenzten Tumor gezielten Kohlenstoffbestrahlung zu kombinieren. In Versuchen bei Speicheldrüsen-Krebs ließ sich in einem Vergleich mit reiner Kohlenstoffbestrahlung die Tumorkontrolle von 30 % auf 80 % steigern. Dieses Verfahren sollte auch bei anderen, biologisch ähnlichen Tumoren erfolgreich sein.

### Der derzeit größte Technologietransfer

In München ging jetzt das Rinecker Protonen Therapie Zentrum RPTC erfolgreich in Betrieb, eine weitere Protonenanlage soll bald in Essen folgen. In Pavia, Marburg und Kiel entstehen drei weitere kombinierte Kohlenstoff-Protonenanlagen, weitere Zentren sind in Vorbereitung.

Jede dieser Anlagen benötigt eine Investitionssumme zwischen 100 und 200 Millionen €. Die meisten werden nicht über staatliche Subventionen, sondern ganz oder teilweise über Kredite finanziert. Die Kliniken erwarten, dass sie diese Darlehen in angemessener Zeit und mit Profit zurückzahlen können. Damit ist der Ionen-therapie der Sprung von der technischen Grundlagenforschung in die Kliniken gelungen.

Die neuen Zentren in Heidelberg und Pavia werden noch von den nationalen Forschungseinrichtungen GSI und INFN gebaut. Die Bestrahlungsplanung hat Siemens aus dem GSI-Produkt entwickelt und – als Voraussetzung für eine breite klinische Anwendung – auch zertifiziert. Die Anlagen in Marburg und Kiel werden von Siemens als Generalunternehmer verantwortet. Die Protonenanlage RPTC in München hat die deutsche Firma Accel errichtet, die mittlerweile von der US-Firma Varian übernommen wurde. Auch Siemens hat die Komplexität der Teilchentherapie unter-

schätzt, weswegen sich die Inbetriebnahme der Heidelberger Anlage sehr lange verzögerte.

Dies zeigt, dass offensichtlich der Transfer von der Forschungsanlage zum industriellen Produkt schwierig ist, selbst wenn ein Demonstrationsprojekt über mehr als zehn Jahre erfolgreich betrieben wurde und die technischen Details durch Patente abgesichert sind. Der personelle Austausch zwischen Forschung und Industrie ist immer noch zu wenig ausgebaut. Die Regel der Industrie, nur junge „unverbildete“ Mitarbeiter zu übernehmen, verzichtet ganz auf den Knowhow-Transfer in und durch Köpfe. So ist es zu hinterfragen, ob die derzeitige Forschungspolitik, die mit dem Rohstoff Wissen argumentiert, sinnvoll ist, wenn es nicht gelingt, die Forschungsprodukte von höherer Komplexität in der heimischen Wirtschaft unterzubringen. Auch andere Produkte heimischer Forschung und Entwicklung wurden nicht in Deutschland, sondern in Fernost vermarktet.

Eine andere gefährliche Entwicklung scheint mir die plötzliche Liebe der wissenschaftlichen Community zur Ionentherapie zu sein: Während der Entwicklungszeit hat man diese, in allen Prozeduren neuartige Therapie abgelehnt oder bestenfalls ignoriert. Das war sicher für unser Projekt die einzige Überlebenschance, da eine Begutachtung durch die damaligen „Experten“ zum sicheren Ende der Ionentherapie geführt hätte. Jetzt hat sich die Beurteilung umgekehrt: Die Ionentherapie ist derzeit der größte Technologietransfer aus der Forschung in die Industrie.

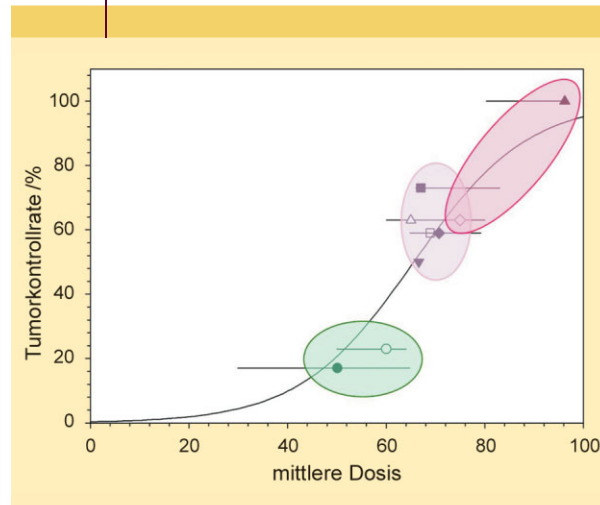
Sie wird leider auch gerne benutzt, um Entwicklungen und Computercodes zu rechtfertigen. Jeder Entwickler eines Monte-Carlo-Programms zur Wechselwirkung von Ionen mit Materie sieht die Bestrahlungsplanung als Spielwiese für seine aufwendigen Programme, obwohl diese jedes Krankenkassenbudget sprengen würden. Ähnliches gilt für die Molekularbiologen, die von einem tieferen molekularen Verständnis eine grundlegende Verbesserung der Therapie erwarten. Dabei ist längst evident, dass ein komplexes System wie ein Zellgewebe Eigenschaften besitzt, die nicht molekular determiniert sind. Dieses Auftreten von neuen, nicht vorhersehbaren Gesetzmäßigkeiten wird inzwischen auch in der Physik diskutiert [6]. Schließlich fühlt sich selbst das CERN als Ursprung dieser dort als Hadronentherapie bezeichneten Methode und möchte sie auch dadurch verbessern, dass man die Supraleitung nahe zum Patienten bringt.

Sehr positiv dagegen ist das große Interesse der Ärzteschaft in klinischen Studien, die Ionentherapie auf weitere Tumorarten auszudehnen. Dies erfordert ebenfalls erhebliche strahlenbiologische und klinische Forschung. An der Marburger Anlage hat deshalb der Betreiber Rhoen-Klinikum einen Lehrstuhl Strahlenbiologie gestiftet, der jetzt besetzt werden soll.

### Technische Weiterentwicklungen

Bei den technischen Entwicklungen ist die Ausdehnung der Bestrahlung auf bewegte Zielvolumina vorrangig, die durch Atmung oder Herzschlag beeinflusst werden. Das Raster-

ABB. 7 TUMORKONTROLLE



Fünf-Jahres-Tumorkontrollraten bei Röntgen- und Protonentherapie (grün und hell violett). Die Kohlenstofftherapie der GSI (dunkel violett) zeigt mit 100 % Tumorkontrolle die besten Werte [5].



Abb. 8 Bestrahlungsraum am Heidelberger Ionentherapie-Zentrum. Der untere Roboter trägt den Patiententisch, der obere ein Kamerasystem zur Verifikation der Positioniergenauigkeit.

verfahren ist mit 10 m/s sehr viel schneller als die Atembewegung mit 3 cm/s. Deshalb kann man das Rastersystem selbst zur Korrektur verwenden. Simulationen mit bewegten Volumina sind sehr Erfolg versprechend, und eine Gruppe von Wissenschaftlern der GSI, am Heidelberger Klinikum und bei Siemens arbeitet an dem Übergang zur klinischen Anwendung der Bewegungskorrekturen.

Neben der Tumortherapie sind auch Anwendungen in anderen Geweben vorstellbar. Die Ionentherapie mit dem Rasterverfahren kann eine hohe lokale Dosis sehr gezielt an jeden Punkt im Patienten bringen. Deshalb sollten auch Anwendungen möglich sein, bei denen nicht bösartiges Gewebe bestrahlt wird. Denkbar wäre die Behandlung von Blutungen im Gehirn. Auch wird diskutiert, in das schlagende Herz zu strahlen, etwa um Herzkammerflimmern zu behandeln.

Schließlich hat der Wunsch nach einfacheren und kompakteren Beschleunigern die Entwicklung auf neue Wege gebracht. Mit Laser getriebene Beschleuniger und Beschleuniger mit hoch isolierenden Wänden sind zurzeit Konzentrationspunkte intensiver Forschung und Entwicklung.

So hat eine Entwicklung, die an den Beschleunigern ihren Ausgang nahm, auch wieder eine Rückkopplung auf den ursprünglichen Beginn gefunden [7].

### Zusammenfassung

*Die Schwerionen-Tumortherapie erreicht eine Millimeterpräzision überall im menschlichen Körper und eine erhebliche biologische Wirkungssteigerung im Tumor verglichen mit der Belastung des Normalgewebes. Damit ist es vor allem möglich, bisher strahlenresistente Tumoren erfolgreich zu therapieren. Auf Grund der sehr guten Erfolge des Pilotprojektes an der GSI sind allein in Deutschland drei klinische Therapiezentren im Aufbau, an denen mehrere tausend Patienten pro Jahr behandelt werden sollen. Damit ist der Ionentherapie der Sprung von der technischen Grundlagenforschung in die Kliniken gelungen.*

### Stichworte

Ionenstrahltherapie, Krebstherapie, Protonentherapie, Rastescan-Verfahren, relative biologische Wirksamkeit, Bragg-Maximum, Dosis.

### Der Autor



Gerhard Kraft studierte Physik in Heidelberg und promovierte in Köln mit Schwerpunkt Kernphysik. Ab 1973 arbeitete er bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung GSI. Nach einem Aufenthalt in der Biomed Division des LBL Berkeley gründete er an der GSI die Biophysik mit dem Ziel Entwicklung der Tumortherapie. Er wurde mit einigen Preisen geehrt, darunter dem Erwin-Schroedinger-Preis (1999) und dem Otto-Hahn-Preis (2000).

### Anschrift

Prof. Dr. Dr. h. c. Gerhard Kraft, GSI Helmholtz-zentrum für Schwerionenforschung GmbH, Planckstraße 1, D-64291 Darmstadt. G.Kraft@gsi.de.

### Literatur

- [1] R. R. Wilson, Radiology **1946**, 47, 487.
- [2] C. A. Tobias et al. Science **1971**, 174, 1131.
- [3] G. Kraft, Progr. Part. Nucl. Phys. Suppl. **2000**, 45, 473.
- [4] M. Krämer, W. K. Weyrather, M. Scholz, Technol. Cancer Res. Treat. **2003**, 2(5), 427.
- [5] D. Schulz-Ertner, H. Tsujii, J. Clin. Oncol. **2007**, 25(8), 953.
- [6] R. B. Laughlin, A Different Universe, Perseus Book Group, New York 2005.
- [7] G. Kraft G., S. D. Kraft, New J. Phys. **2009**, 11, 025001.

# Mineralische Bindemittelsysteme als Hochleistungsmaterialien

## Brückenschlag mit Physik

NIKOLAUS NESTLE | MICHAEL KUTSCHERA | LUC NICOLEAU | MICHAEL LEITL | MICHAEL BRÄU

*Die Materialforschung hat in den letzten Jahren aus Beton und Gips Hochleistungswerkstoffe gemacht, die kühne architektonische Konstruktionen ermöglichen. Moderne physikalische Abbildungsverfahren liefern der Forschung wichtige Einblicke in die Materialeigenschaften.*

Schon seit Urzeiten gehört das Dach über dem Kopf zu den Grundbedürfnissen des Menschen. Mit wachsenden Städten und Siedlungen entstand ein Bedarf an konstruktiven Baumaterialien mit speziellen Eigenschaften, die Holz und Stein allein nicht abdecken können. Dies war die Geburtsstunde von mineralischen Bindemittelsystemen. Als Erfinder dieser Form von Bauchemie gelten die Manufakturen der Römer, obwohl es vereinzelt schon frühere Anwendungen gab. Sie fanden auch die erste Rezeptur für einen technisch einsetzbaren Zement, das Opus Cementitium (Abbildung 1). Als Rohstoff brauchte es jedoch spezielle vulkanische Mineralien, sogenannte Puzzolane. Diese waren nur an wenigen Orten in geeigneter Qualität und Menge verfügbar.

Deshalb ist das Jahr 1824 ein weiterer wichtiger Meilenstein der Bauchemie: Joseph Aspdin, ein Maurermeister in Leeds (England), reichte ein Patent mit dem Titel „An Improvement in the Mode of Producing an Artificial Stone“ ein. Er erfand auch die Bezeichnung „Portlandzement“. Heute ist das die technische Bezeichnung für den hauptsächlich eingesetzten Zement, den es in vielen Qualitäten und Sorten gibt. Aspdins Erfindung machte zum ersten Mal einen mit Wasser aushärtenden, also hydraulischen, Binder in nahezu unbegrenzter Menge zugänglich, der erstaunlich gute mechanische Eigenschaften hat.

Heutige mineralische Baustoffe wie Transportbeton, Werk trockenmörtel, Gipsputze und viele mehr haben jedoch mit dem Material aus dem 19. und 20. Jahrhundert wenig zu tun. Gegen Ende des 20. Jahrhunderts setzte ein wahrer Innovationsschub ein, der den Bausektor und die Architektur selbst veränderte. Entscheidend hierfür waren eine verbesserte Zusammensetzung der Rohmaterialien, speziell hergestellte chemische Additive und ein vertieftes Verständnis der ablaufenden chemischen Reaktionen.



**Abb. 1** Die Gewölbedecke dieses Ganges der Trierer Kaiserthermen ist mit römischem Opus Cementitium ausgeführt (Foto: Th. Zühmer, Rheinisches Landesmuseum Trier).

Dieser Fortschritt vereinfachte die Anwendung. Heutige Betonsorten sind leicht fließend und brauchen trotzdem nicht mehr nachträglich verdichtet zu werden. Andere Mischungen erlauben das Anbringen von Fliesen an der Wand, ohne dass diese abrutschen. Auf der anderen Seite stehen bessere Materialeigenschaften hinsichtlich Belastbarkeit und Dauerhaftigkeit. Gut erkennbar ist das an den wesentlich schlankeren Beton-Tragsäulen in modernen Bauten im Vergleich mit Gebäuden aus den 1950er Jahren. Spektakuläre Bauprojekte wie der über 700 m hohe Burj Dubai (Abbildung 2) wären ohne die Fortentwicklung mineralischer Binder zu echten Hochleistungsmaterialien überhaupt nicht realisierbar. Im Folgenden wollen wir einige Einblicke in die wissenschaftlichen Herausforderungen geben, vor denen die Entwickler mineralischer High-Tech-Bindermaterialien heute stehen.

### Gips

Bereits die Ägypter haben Gips gebrannt, heute ist er als Bindemittel aus der Bauindustrie nicht mehr wegzudenken. Unter Gips versteht man Calciumsulfat-Dihydrat (DH)  $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ . In der Natur kommt DH als Mineral Selenit in großen Lagerstätten vor, aber auch zum Beispiel als Alabaster oder Wüstenrose. Heute produzieren zudem die Rauchgasentschwefelungs-Anlagen (REA) von Kraftwerken große Mengen von „REA-Gips“ mit mehr als 98 % Reinheit.



**Abb. 2** Spektakuläre Hochhäuser wie der über 700 m hohe *Burj Dubai* wurden erst durch die Entwicklung mineralischer Binder zu echten Hochleistungsmaterialien realisierbar (Foto: BASF).

Erhitzt man DH über 100° C, so entsteht gebrannter Gips  $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$ , der in der Bauchemie Halbhydrat (HH) genannt wird. In verschiedenen Brennverfahren lassen sich unterschiedliche Qualitäten von HH herstellen. Sie finden in diversen Produkten von Putzen über Gipskartonplatten bis zu Spachtelmassen Anwendung. Bei höheren Brenntemperaturen entsteht schließlich wasserfreies  $\text{CaSO}_4$ , sogenannter totgebrannter Gips oder Anhydrit (AH). AH kommt auch in großen natürlichen Lagerstätten vor.

Gips ist nur schlecht in Wasser löslich. Von reinem DH lösen sich

bei Raumtemperatur nur etwa zwei Gramm in einem Liter Wasser. HH löst sich dagegen wesentlich besser in Wasser. Kurzzeitig können so Übersättigungen erreicht werden, die circa acht Gramm DH pro Liter entsprechen. Diese Übersättigung bewirkt eine schnelle Keimbildung und rasches Kristallwachstum von DH in wässrigen Pasten von HH. Für Festigkeit sorgt die filzartige Verwachsung der nadelförmig auskristallisierenden DH-Kristalle (Abbildung 3). Bei der Bildung der DH-Kristalle wird ein Teil des Wassers aus den Poren der Gipspaste chemisch gebunden, was ihre Fließ-eigenschaften zusätzlich beeinflusst. Die Kristallisation von DH und das Auflösen von AH und HH sind exotherm, weshalb Gipsbaustoffe beim Härten warm werden.

Das Abbinden lässt sich über lösliche anorganische Salze beschleunigen oder verzögern, denn diese beeinflussen das Löslichkeitsprodukt des  $\text{CaSO}_4$ . Auch die Art und Anzahl von Keimen, die zum Kristallwachstum des DH zur Verfügung stehen, sind wesentliche Stellgrößen, um den Kristallisationsprozess zu steuern. So ist der wichtigste Beschleuniger für gipsbasierte Baustoffe fein gemahlenes DH. Die so eingebrachten Keime können die Abbindezeit von 15 bis 30 Minuten auf unter eine Minute verkürzen. Wichtige Einflussfaktoren auf das Abbindeverhalten sind auch Phasenzusammensetzung, Partikelgröße und Oberfläche der Ausgangsstoffe und das Verhältnis von Wasser zu Feststoff, mit dem die Paste angemischt wird. Abhängig von der Menge an Wasser, das zur Verfügung steht, können sich dichtere oder eher poröse Gefüge ausbilden. Das Wasser, das nicht für die Bildung von DH verbraucht wird, muss nach Ende der Hydratation aus dem Baustoff getrocknet werden. Durch Zusatzmittel, die die Fließfähigkeit der Paste erhöhen, kann man die Menge an überschüssigem Wasser verringern und somit Gipsbinder mit höherer Festigkeit realisieren.

Der für die Herstellung von gipsbasierten Baustoffen notwendige Energieaufwand ist vergleichsweise gering: Anhydrit kann direkt in der Natur abgebaut werden, Gips aus Rauchgasentschwefelung oder aus natürlichen Vorkommen muss nur bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen gebrannt werden. Im Gegensatz zur Zementherstellung setzt das kein zuvor carbonatisch gebundenes  $\text{CO}_2$  frei. Ein Nachteil ist die Empfindlichkeit dieser Baustoffe gegen Feuchtigkeit, da die Löslichkeit des DH vergleichsweise hoch ist. In den USA, wo sehr viel mit gipsbasierten Baustoffen gebaut wird, ist deshalb ein größerer Teil der nach Hurrikans zu verzeichnenden Gebäudeschäden nicht auf die mechanische Zerstörungskraft des Sturms, sondern auf Wasserschäden zurückzuführen.

### Portland- und Tonerdezemente

Portlandzement ist das technisch hergestellte Material mit der größten Produktionsmenge überhaupt. 2006 wurden laut Statistik des US Geological Survey weltweit 2,55 Milliarden Tonnen Zement produziert – also fast 400 kg pro Kopf der Weltbevölkerung! Heute ist er *der* Zement schlechthin. Seine wesentliche Eigenschaft ist die Hydraulizität, das ist die Fähigkeit, unter Wasser zu erstarren.

#### INTERNET

Dreidimensionale röntgentomographische Bilddaten der Mikrostruktur von Zement  
[visiblecement.nist.gov](http://visiblecement.nist.gov)

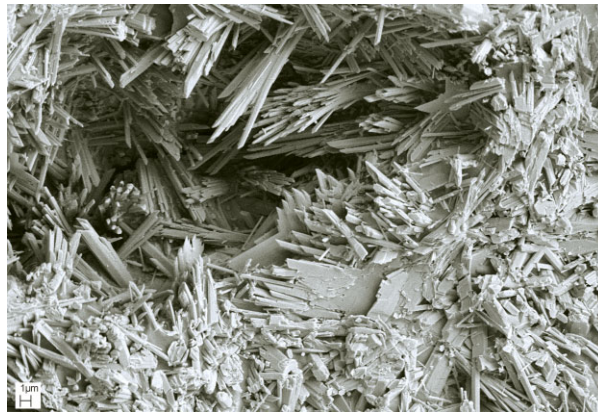
Zement ist zwar als Bindematerial in der Betonherstellung weit verbreitet. Doch der gesamte Wirkungsmechanismus hinsichtlich Erstarrung, Erhärtung und allgemein der Kohäsion, also das Zusammenhaften der Partikel im erstarrten und erstarrten Zement, ist noch nicht völlig verstanden. Zement ist hauptsächlich eine Mischung von Calciumsilikaten, die als Sinterprodukte beim Brennen von Kalkstein und Ton entstehen. Der nach dem Brennprozess entstehende Zementklinker wird gemahlen und eine kleine Menge von Calciumsulfaten hinzu gegeben. Beim Anmischen mit Wasser löst sich das Zementmehl teilweise auf. Die Erstarrung der Mischung erfolgt durch die Bildung von Calcium-Silikat-Hydraten (C-S-H-Phasen). Gewichtsmäßig machen sie auch den Hauptanteil des abgebundenen Zementsteins aus.

Neben den auf Calciumsilikaten basierenden Portlandzementen werden seit Anfang des 20. Jahrhunderts auch Tonerdezemente verwendet. Diese sind primär aus verschiedenen Calciumaluminaten aufgebaut (Aluminatzement). Tonerdezemente werden heute vor allem als Gemische mit Portlandzement im Bereich des Innenausbau als Fliesenkleber, Fugenmörtel, Reparaturmörtel oder Selbstverlaufmassen für Böden eingesetzt. Das für die jeweiligen Anwendungen benötigte Erstarrungsverhalten kann unter Einsatz weiterer Additive gut eingestellt werden. Der hierfür notwendige Aufwand zur optimalen Anpassung der verschiedenen Komponenten in der Mischung („Formulierung“) ist allerdings relativ hoch. Dies ist ebenso wie der Preis der Tonerdezemente ein Grund für die im Vergleich zu Portlandzement höheren Kosten dieser Binder. In Deutschland dürfen Tonerdezemente seit 1962 nicht mehr in tragenden Bauteilen verwendet werden, weil bei ihnen die für die Festigkeit wesentliche Mikrostruktur der gebildeten Hydrationsprodukte stark von äußeren Bedingungen abhängt. Da eisenarme Tonerdezementvarianten im Gegensatz zum Portlandzement sehr hohe Temperaturen aushalten, werden sie als Feuerfestmassen zum Beispiel in Hochöfen eingesetzt.

### Chemie und Mikrostruktur

In allen hier diskutierten mineralischen Bindern ist das Wasser gleichzeitig Reaktionspartner und Reaktionsmedium. Während der Hydrationsreaktionen kommt es neben der chemischen Bindung von Wasser zu dramatischen Veränderungen der Grenzfläche zwischen den mineralischen Phasen und dem noch verbliebenen Wasser. Es liegt also ein unregelmäßiges, zeitlich veränderliches, flüssigkeitsgefülltes System von Poren vor, deren Größen unterhalb von Nanometern beginnen und einige 100  $\mu\text{m}$  erreichen. Außerdem ändert sich auch das Inventar der in der Wasserphase gelösten Substanzen.

Wie die Porenstruktur entsteht und wie sich dabei die physikalischen und chemischen Eigenschaften ändern, ist entscheidend für den Prozess des Abbindens und die späteren Materialeigenschaften. Deshalb wollen wir so genau wie möglich wissen, was dabei auf der mikroskopischen



**Abb. 3** Aufnahme mit einem Cryo-Rasterelektronenmikroskop von einer abgebundenen Mischung aus Halbhydrat und Wasser. Die Dihydrat-Nadeln sind stark ineinander verwachsen.

Skala geschieht. Die komplizierte Porenstruktur und die Doppelrolle des Wassers als Reaktionspartner und Reaktionsmedium erschweren jedoch die Anwendung vieler Verfahren zur Analyse der Chemie und Struktur, die bei anderen anorganischen Materialien mit Mikro- und Nanostruktur erfolgreich funktionieren.

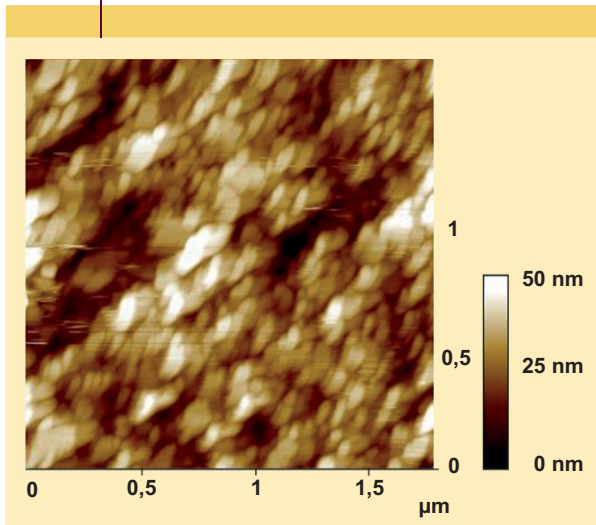
Dies gilt besonders für zerstörungsfreie Untersuchungen, deren Verfahren während der Messung nicht die Wassersättigung der Poren verändern dürfen. Das schließt zum Beispiel die klassische Elektronenmikroskopie im Hochvakuum als Untersuchungsmethode aus. Ein weiteres Problem ist, dass sich die an Grenzflächen ausgebildeten Porenstrukturen eventuell deutlich von denen im Inneren des Materials unterscheiden. Deshalb sind zum Beispiel optische Methoden nur schlecht anwendbar, denn das Licht dringt nicht tief ins Innere dieser Materialien ein. Alle derzeit zur Verfügung stehenden Methoden zur weitgehend zerstörungsfreien, direkten Abbildung der Porenstrukturveränderungen in hydratisierenden Baustoffen, die wir nun vorstellen, sind deshalb Kompromisse.

### Elektronenmikroskopie

Tatsächlich kann man die Porenstruktur zu einem bestimmten Zeitpunkt der Reaktion ohne trocknungsbedingte Veränderungen mit Elektronenmikroskopen oder fokussierten Ionenstrahlen (Focused Ion Beam, FIB) abbilden. Dabei erreicht man eine Auflösung von einigen Nanometern [1]. Man friert dazu die Proben ein, bricht oder schneidet sie auf und untersucht diese Flächen *in situ* (Cryo-Elektronenmikroskopie). Allerdings ist diese Methode nicht zerstörungsfrei.

Eine Beobachtung der Oberfläche einer feuchten Bindermischung über einen längeren Zeitraum hinweg mit einer Auflösung von etwa zehn Nanometern ermöglicht dagegen die Environmental Scanning Electron Microscopy (ESEM) [2]. Dabei befindet sich die Probe nicht im Vakuum, sondern in einer Kammer mit reduziertem Druck, bei dem

**ABB. 4 | C-S-H-WACHSTUM**



**Rasterkraftmikroskopische Aufnahme von C-S-H-Partikeln auf einer Tricalciumsilikat-Oberfläche in einer Calciumhydroxidlösung. Die Partikel sind etwa 60 nm groß. Das C-S-H-Wachstum führt zu einer erkennbaren Oberflächenrauigkeit (dunkle Bereiche): Die Porosität im Verbund der Hydratpartikel wächst (Bild: E. Lesniewska, U. Dijon).**

Wasser noch flüssig bleibt. Kritisch ist hier zum einen der Kompromiss zwischen der freien Weglänge der Elektronen, die zum Gasdruck umgekehrt proportional ist (einige Millimeter bei 1 kPa und 20 keV-Elektronen) und einem für flüssiges Wasser noch ausreichenden Druck (minimal 0,61 kPa). Auf der anderen Seite steht die Tatsache, dass nur Strukturen unmittelbar an der Oberfläche der Bindermischung visualisiert werden können.

Wie bei der klassischen Rasterelektronenmikroskopie können wir die rein topographische Strukturinformation mit einer Analyse der dortigen Elemente verbinden. Diese Information gewinnen wir aus den Röntgen-Emissionslinien der vom Elektronenstrahl ionisierten Atome (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDX).

### Rasterkraftmikroskopie

Die Rasterkraftmikroskopie (Atomic Force Microscopy, AFM) bietet weitere Möglichkeiten zur Untersuchung der Oberflächen von hydratisierenden Bindern. Man kann damit zum Beispiel die Nukleation und das Wachstum der ersten kolloidalen C-S-H-Partikel auf Zementklinker-Modelloberflächen verfolgen. Dabei scheinen diese ersten C-S-H-Phasen nicht über eine Größe von einigen zehn Nanometern wachsen zu können [3]. Danach aggregieren diese Primärpartikel zu größeren Partikeln, was für ein weiteres Wachstum der festen Phase sorgt (Abbildung 4) und so im Nanometerbereich einen hierarchischen Aufbau der Porenstruktur bedingt.

Benutzt man das AFM zusätzlich zur Messung attraktiver oder repulsiver Kräfte, so kann man die Ursache der Kohäsion zwischen zwei C-S-H-Partikeln untersuchen. Es zeigt

sich, dass die Hydratphasen in diesem Material von sehr stark attraktiven, elektrostatischen Kräften zwischen zwei Oberflächen zusammengehalten werden – obwohl beide eine negative Ladung besitzen.

Dieser Mechanismus scheint auf den ersten Blick im Widerspruch zu physikalischen Gesetzmäßigkeiten zu stehen, ist aber experimentell gesichert [4]. Monte-Carlo-Simulationen erlauben einen Einblick in seine physikalischen Ursachen [5]: Bei den für abbindende Zemente typischen hohen pH-Werten, führen die Si-OH-Gruppen des C-S-H zu einer sehr hohen, negativen Ladungsdichte an der Oberfläche, die vornehmlich durch  $\text{Ca}^{2+}$ -Gegenionen ausgeglichen wird. Lokale Konzentrationsschwankungen und paarweise Wechselwirkungen der zweiwertigen Kationen sorgen für Potentialfluktuationen nahe den Partikeloberflächen und damit für eine Potentialabsenkung.

Monte-Carlo-Simulationen können diese Wechselwirkung einzelner Ionen gut beschreiben. Sie liefern das folgende Bild: Eingeschränkt zwischen zwei negativ geladenen Oberflächen von benachbarten C-S-H-Partikeln üben die zugehörigen  $\text{Ca}^{2+}$ -Gegenionen einerseits wie Gaspartikel untereinander einen abstoßenden Druck aus. Zusätzlich wirken zwischen den Ionen auch anziehende Korrelationskräfte. Diese entstehen durch lokale Fluktuationen in der Ladungsdichte der  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen über den Spalt zwischen den Partikeln hinweg. Diese anziehenden Kräfte wachsen mit sinkendem Abstand und zunehmender Konzentration der Ca-Ionen. Ein Rasterkraftmikroskop kann diesen Effekt messen (Abbildung 5). Unter den typischen chemischen Bedingungen der Porenlösung im Zement mit hohen pH-Werten und Ionenstärken sind die Ionenkorrelationskräfte besonders ausgeprägt.

Ein großer Nachteil der Ionenkorrelationskräfte ist ihre geringe Reichweite. Diese ist auch für die geringe Biegezugfestigkeit zementärer Materialien verantwortlich. Man kann jedoch Stärke und Reichweite dieser Ionenkorrelationskräfte vergrößern, indem man die gegenseitige Ausrichtung der C-S-H-Partikel während des Wachstums verbessert. Dies ist derzeit eines der spannendsten Themen im Bereich der Zementforschung. Langfristig könnte man so die Festigkeit und die Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken steigern.

### Röntgen-Tomographie

Die Röntgen-Mikrotomographie ermöglicht eine dreidimensionale und weitgehend zerstörungsfreie Visualisierung der Porengeometrie von Baustoffen. Dieses Verfahren nutzt das brillante Röntgenlicht eines Synchrotrons, um die inneren Strukturen der Probe dreidimensional abzubilden.

Ein Beispiel für einen tomographischen Datensatz mit einer räumlichen Auflösung von  $(0,95 \mu\text{m})^3$  von der Europäischen Synchrotron-Anlage ESRF in Grenoble findet man im Internet (siehe „Internet“ auf S. 204). Da wir an Prozessen auf der Nanometerskala interessiert sind, ist die räumliche Auflösung also aus unserer Sicht leider zu gering. Sie ist in erster Linie dadurch limitiert, dass die Tomogram-

me generell aus Projektionen der Probe unter verschiedenen Raumrichtungen zurückgerechnet werden müssen.

Die Auflösung ergibt sich dabei durch das Verhältnis der äußeren Abmessungen der Probe zur Anzahl der unter unterschiedlichen Winkeln aufgenommenen Projektionen. Sie kann nicht beliebig gesteigert werden, weil die pro Projektion verfügbare Messzeit wegen Stabilitätsproblemen begrenzt ist. Beherrschbar sind maximal einige tausend Projektionen, was bei einer millimetergroßen Probe eine Auflösung von bestenfalls einigen 100 nm ermöglicht.

### Dynamische NMR

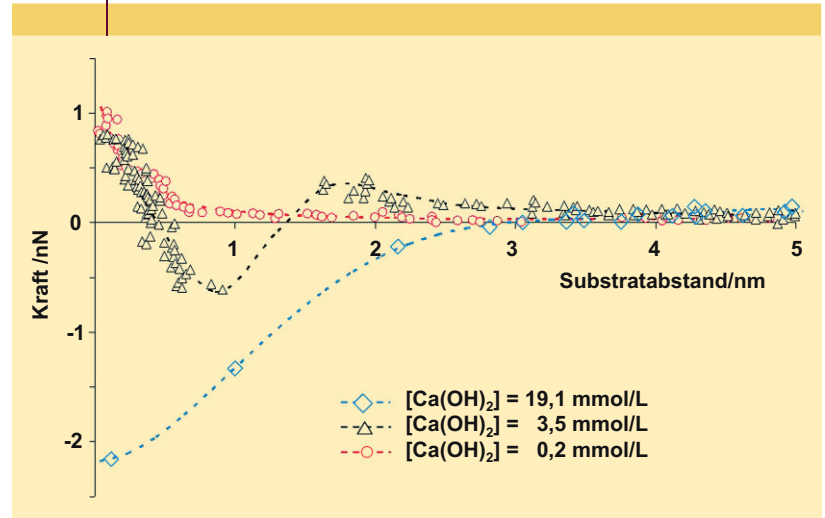
Einen komplementären Ansatz zur Untersuchung der Porenstruktur bietet die Time-Domain-NMR-Spektroskopie. Bei dieser Methode werden die Relaxationszeiten der Kernspinnmagnetisierung der Protonen in der Probe bestimmt, nachdem sie durch einen Hochfrequenzpuls zur Larmor-Präzession im Magnetfeld angeregt wurden [6]. Die Kernspin-Relaxationszeiten liefern vor allem Informationen über das Verhältnis von Oberflächen zu Volumina im Porensystem.

Weitere Informationen zur Porenstruktur können aus dem sogenannten Selbstdiffusionskoeffizienten des Wassers in den Poren gewonnen werden, der ebenfalls mit NMR-Methoden messbar ist. In Zement sind dabei Diffusionszeiten von wenigen bis einigen zehn Millisekunden der Messung zugänglich. Aus der Abhängigkeit des gemessenen (mittleren) Diffusionskoeffizienten von der Diffusionszeit können wir Rückschlüsse auf die Existenz von Diffusionsbarrieren im Porensystem auf dieser Längenskala ziehen [6]. Die Diffusionsbewegung der Wassermoleküle besitzt auf der Zeitskala des NMR-Experiments eine Reichweite, die deutlich die typischen Längenskalen des Porensystems übertrifft. Daher bewirkt die Diffusion eine räumliche Mittelung der gemessenen NMR-Eigenschaften über die jeweiligen Diffusionslängen, die in einem frisch angemischtem Baustoff bei etwa 10  $\mu\text{m}$  liegen.

Beim Abbinden gehen Wassermoleküle aus der flüssigen Phase in eine feste Bindung in den Hydratphasen über. Das macht sich durch eine starke Verringerung der sogenannten transversalen Relaxationszeiten [7] der Protonen bemerkbar. Diesen Effekt zeigen die Messkurven in Abbildung 6, die an einer Gipsprobe direkt nach Anmischen und nach vollständiger Hydratisierung aufgenommen wurden: Der sehr schnell relaxierende Signalanteil der fest gebundenen Protonen (links im Diagramm) nimmt infolge des Einbaus von Wasser in Hydratphasen stark zu.

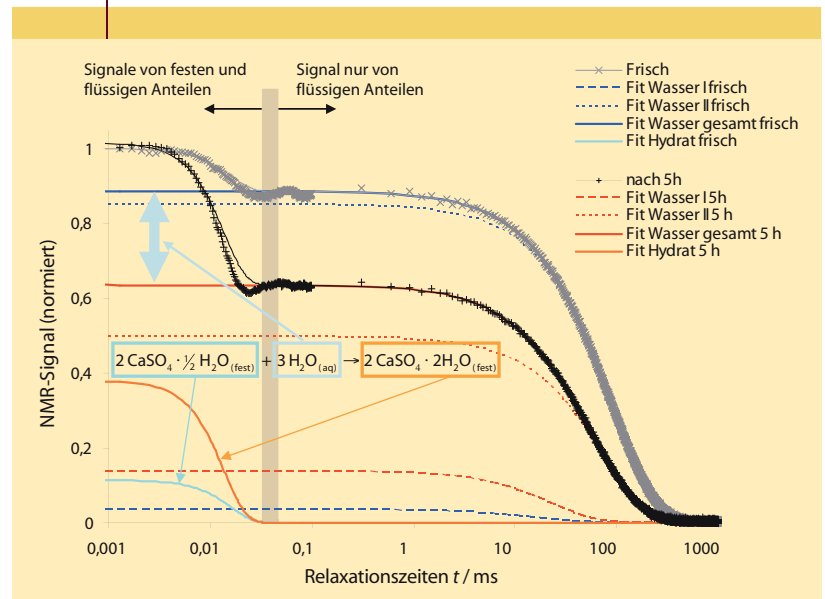
Die Kurven in Abbildung 6 zeigen einen zweiten, markanten Effekt: Die Relaxationszeit des in den Poren verbliebenen Wassers sinkt. Ursache ist das zunehmende Verhältnis zwischen Oberfläche und Volumen des Porensystems. Einfach gesagt haben die Wassermoleküle im Schnitt öfters Kontakt mit der Porenoberfläche. Da die Relaxation der Kernspins an der Oberfläche schneller erfolgt als im Volumen, führt dies zu einer kürzeren Relaxationszeit. Außerdem wird das Porensystem deutlich heterogener. Das

ABB. 5 KRAFT-ABSTANDS-KURVEN



**Kraft-Abstands-Kurven zwischen der Oberfläche eines C-S-H-Partikels und einer C-S-H-Spitze des Mikroskops bei unterschiedlicher Calciumhydroxid-Konzentration. Je höher diese ist, desto stärker wachsen die attraktiven Kräfte und ihr Wirkungsbereich. Negative Werte korrespondieren mit anziehenden, positive mit abstoßenden Kräften** (Bild: C. Plassard, Universität Dijon).

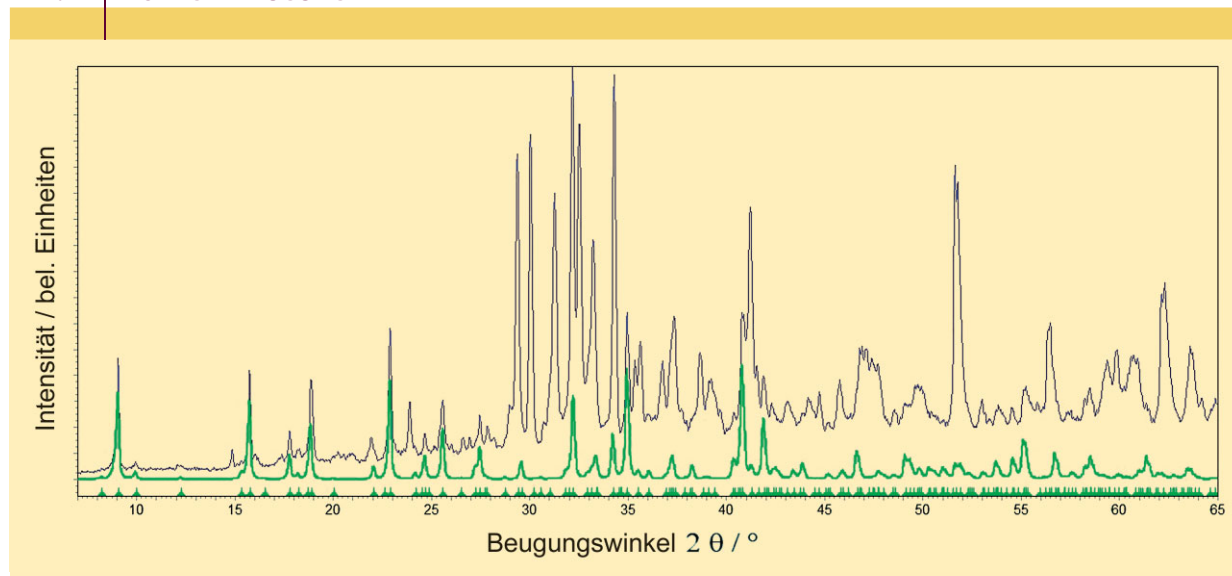
ABB. 6 KERNSPINRESONANZ AN GIPS



**TD-NMR-Magnetisierungsabfallkurven einer Gipsprobe direkt nach dem Anrühren (Fits blau und türkis) und etwa fünf Stunden später nach Ende der Hydrationsreaktionen (Fits rot und orange). In dieser Zeit hat der Signalanteil des flüssigen Wassers (blaue und rote Linie) deutlich abgenommen. Das Signal des flüssigen Wassers zerfällt in mehrere Komponenten mit unterschiedlichen Relaxationszeiten (gestrichelte Linien). Der Anteil der schnell relaxierenden Komponente ist nach fünf Stunden wesentlich höher als in der frischen Probe, da zusätzliche feine Porenstrukturen entstanden sind.**

macht sich in den gezeigten Kurven durch zwei getrennte Komponenten in der Relaxationszeit der flüssigen Wasseranteile bemerkbar, während die Relaxation in der frischen Probe näherungsweise exponentiell erfolgt (gestrichelte Linien).

**ABB. 7 | RÖNTGENBEUGUNG**



**Röntgenpulver-Diffraktogramm eines partiell hydratisierten Gemisches aus Portlandzement, Tonerdezement und AH ( $\text{CaSO}_4$ ) (blau). Grün hervorgehoben sind die Anteile, die dem Hydratationsprodukt Ettringit zugeordnet werden können.**

### Röntgen-Diffraktometrie

Während bei den bisher diskutierten Methoden die Struktur des Porensystems im Vordergrund stand, ist für das Verhalten eines Baustoffs natürlich auch der Aufbau der festen Phasen von entscheidender Bedeutung. Dieser kann sowohl bei den Ausgangsstoffen als auch bei den Hydratationsprodukten ziemlich komplex sein.

Tonerdezemente zum Beispiel bestehen neben der Hauptkomponente Monocalciumaluminat  $\text{CaAl}_2\text{O}_4$  aus vielen verschiedenen Aluminatphasen. Die Phasenausbildung der Calciumaluminathydrate können wir sogar in Röntgen-Beugungsexperimenten verfolgen. Darin unterscheiden sie sich von den Haupthydratationsprodukten der Portlandzemente, die wegen ihrer Struktur – ähnlich amorphen Substanzen – kein verwertbares Signal ergeben.

Stehen zusätzlich zu Calcium- und Aluminiumionen noch ausreichend Sulfationen zur Verfügung, so lässt sich mit den Röntgen-Verfahren ein deutlich anderer Reaktionsverlauf beobachten: Es bildet sich das Mineral Ettringit  $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26 \text{H}_2\text{O}$ . Durch umfangreiche mineralogische Forschungsarbeiten sind die verschiedenen Phasen in den meisten Baustoffen bereits bekannt. Das nutzt man bei der Untersuchung mit Röntgen-Pulver-Diffraktometrie (XRD, X-Ray Diffraction) aus.

Das Pulver stellt ein polykristallines Vielphasengemisch dar. Zur Identifizierung der einzelnen Phasen verwenden wir die spezifischen Röntgen-Reflexe nach der Bragg-Gleichung

$$n \cdot \lambda = 2d \cdot \sin \theta,$$

wobei  $n$  eine natürliche Zahl ist,  $\lambda$  die Wellenlänge der monochromatischen Röntgenstrahlung,  $d$  der Abstand zwi-

schen zwei parallelen Netzebenen im Kristallgitter der betrachteten Phase und  $\theta$  der Beugungswinkel.

Aus dem Gemisch müssen wir nun die Anteile der einzelnen Phasen geschickt herausrechnen, um ihre zeitliche Entwicklung beim Abbinden zu verfolgen. Das erreichen wir mit der sogenannten Rietveld-Methode. Dabei verwenden wir die Kristallstrukturdaten der vermuteten Verbindungen, berücksichtigen weitere physikalische Größen, zum Beispiel ihre Röntgen-Absorptionskoeffizienten und charakteristischen Dichten, und errechnen so ein theoretisches Diffraktogramm. Danach passen wir die Anteile und Kristallitgrößen der einzelnen Komponenten an das experimentelle Diffraktogramm an.

Die Rietveld-Methode hat sich in der Materialforschung bewährt. In der Bauchemie gelang ihr Durchbruch erst in Kombination mit weiteren mathematischen Verfahren, die die Anzahl der zu berücksichtigenden Parameter und damit dem Rechenaufwand drastisch reduzierte [8]. Abbildung 7 zeigt ein Beispiel für eine Rietveld-Verfeinerung an einem partiell hydratisierten Gemisch aus Portland-, Tonerdezement und AH.

### Neue Architektur

Neue Messtechnik und bessere Materialsimulationen ermöglichen die systematische Weiterentwicklung von mineralischen Bindern zu maßgeschneiderten Hochleistungsmaterialien. Neben der Optimierung von Festigkeit, Dauerhaftigkeit und Verarbeitbarkeit stehen wir vor weiteren Herausforderungen. Dazu gehört das Verhalten im Brandfall oder die Beständigkeit unter extremen Klimabedingungen wie zum Beispiel hohem Salzeintrag.

Außerdem steht die Baustoffforschung in enger Wechselwirkung mit der Architektur und Gestaltung: Baustoffe

mit optimierten Eigenschaften ermöglichen neue gestalterische Elemente. Deren Weiterentwicklung führt dann wiederum zu neuen Anforderungen an zukünftige Baustoffe. Diese könnten dann auch völlig neue Funktionen im Gebäude übernehmen, zum Beispiel durch einen aktiven Beitrag zum Gebäudeklima oder selbstreinigende Oberflächen.

### Zusammenfassung

Projekte wie Brücken über Meeresarme oder viele hundert Meter hohe Wolkenkratzer benötigen optimierte Baustoffe mit maßgeschneiderten Eigenschaften. Diese werden nicht zuletzt durch intensive physikalische Forschung an mineralischen Bindern erreicht. Der Artikel stellt einige bildgebende und spektroskopische Messtechniken vor, die tiefe Einblicke in ihre Materialeigenschaften ermöglichen. Zu den so gewonnenen neuen Erkenntnissen zählt die Rolle von Ionen-Korrelationskräften zwischen elektrisch gleich geladenen Oberflächen von Calcium-Silikat-Partikeln. Diese sind entscheidend für die Festigkeit des verbreiteten Portlandzements.

### Stichworte

Gips, Beton, Zement, Bauchemie, Ionen-Korrelationskraft, Elektronenmikroskop, Rasterkraftmikroskop, NMR, Röntgen-Tomographie, Röntgen-Diffraktometrie.

### Literatur

- [1] A. Zingg et al., *Cem. Concr. Res.* **2008**, 38, 522.
- [2] C. Röbster et al., *Cem. Concr. Res.* **2008**, 38, 897.
- [3] S. Gauffinet et al., *C.R. Acad. Sci. Ser. IIa: Sci. Tere Planètes* **1998**, 327, 231.
- [4] C. Plassard et al. *Langmuir* **2005**, 21, 7263.
- [5] B. Jönsson et al., *Langmuir* **2004**, 20, 6702.
- [6] N. Nestle, P. Galvosas, J. Kärger, *Cem. Concr. Res.* **2007**, 37, 398.
- [7] B. Blümich et al., *Physik in unserer Zeit* **2005**, 36(5), 236.
- [8] A. Kern, A. Coelho, *Powder diffraction* **1998**, 144.

### Die Autoren



Von links nach rechts: Nikolaus Nestle, Michael Leitl, Michael Kutschera, Luc Nicoleau, Michael Bräu.

Nikolaus Nestle studierte Physik an der Uni Ulm und promovierte dort 1995. 2002 Habilitation in Leipzig, danach Juniorprofessor an der TU Darmstadt. Seit April 2006 Laborleiter für Niedrigfeld-NMR und einseitige NMR in der Forschungsplattform Polymere der BASF SE Ludwigshafen.

Michael Kutschera, Studium der Physik und Promotion an der Universität Erlangen-Nürnberg. Seit 2007 Aufbau einer Arbeitsgruppe in der BASF Construction Chemicals (CC) GmbH Trostberg, Forschungsschwerpunkt anorganische Bindemittel (Mörtel, Gips) und Nanotechnologie.

Luc Nicoleau, Studium der Physikalischen Chemie und Promotion an der Universität Dijon in Burgund, Frankreich. Seit 2006 bei BASF CC GmbH Trostberg.

Michael Leitl, Studium der Chemie und 2007 Promotion an der Universität Regensburg. Seitdem bei der BASF CC GmbH Trostberg.

Michael Bräu, Studium der Chemie und 2007 Promotion an der Universität Regensburg. Seitdem bei der BASF CC GmbH Trostberg.

### Anschrift

Dr. habil. Nikolaus Nestle, BASF SE Ludwigshafen, Polymerphysik, 67056 Ludwigshafen. nikolaus.nestle@basf.com

## PHYSIK GESTERN UND HEUTE

## Spuren im Staub

*Georg Christoph Lichtenberg ist den meisten Menschen heute wegen seiner Aphorismen bekannt. Zu seinen Lebzeiten war er dagegen in seiner Rolle als Professor für Experimentalphysik an der Universität Göttingen berühmt. Dieser Ruhm gründete sich ganz wesentlich auf seine sehr populären Experimentalvorlesungen. Aber ihm gelang zumindest eine Entdeckung, die seinen Namen auch heute noch in Physiklehrbüchern vorkommen lässt: die Lichtenbergschen Staubfiguren.*



**Abb. 1** Nachgebildete Lichtenberg-Figuren, links bei positiver, rechts bei negativer Elektrizität (Foto: Museum Natur und Mensch Oldenburg).

In den 1770er Jahren machte der italienische Naturforscher Alessandro Volta ein Gerät in der Elektrizitätsforschung populär, das als Elektrophor bezeichnet wurde. Vereinfacht gesagt handelt es sich um einen als Nichtleiter dienenden Harzkuchen, der sich auf einer geerdeten metallischen Oberfläche befindet. Das Harz wird zunächst durch Reibung elektrisiert. Setzt man nun einen mit Schnüren isolierten Metallteller auf den Kuchen und erdet ihn kurzzeitig, so kann nach dem Abheben ein Funke aus dem Teller gezogen werden. Dieser Effekt lässt sich sehr oft wiederholen, da sich der Teller nur durch Influenz auflädt: Der Harzkuchen wird also nicht entladen.

Volta's Gerät kann als sehr frühe Influenz-Elektrisierungsmaschine aufgefasst werden und wurde im letzten Viertel des 18. Jahrhunderts schnell populär. Einerseits war es weniger störanfällig und zudem preiswerter als die verbreiteten Reibungselektrisierungsmaschinen, andererseits ließen sich damit sehr große Funken produzieren.

Einer der Forscher, der sich intensiv mit diesem Gerät beschäftigte, war Georg Friedrich Lichtenberg. Er war insbesondere für seine spektakulären Experimentalvorlesungen bekannt, zu denen auch viele Studierende anderer Fakultäten kamen. Für seine Demonstrationen fertigte Lichtenberg eine Reihe von Elektrophoren mit Durchmessern von bis zu zwei Metern an.

Für ein möglichst gutes experimentelles Ergebnis musste die Oberfläche des Harzkuchens sehr glatt sein und wurde deshalb abgeschliffen. Ein ungewolltes Nebenergebnis dieses Prozesses war das Einstauben des gesamten Raumes. Im Staub auf dem Elektrophor bemerkte Lichtenberg Bereiche, die besondere Muster aufwiesen

Lichtenberg konnte schnell zeigen, dass sich diese Staubfiguren an Stellen bildeten, wo eine Entladung in den Harzkuchen stattfand. Dabei traten zwei verschiedene Formen auf. Je nachdem, ob positive oder negative Elektrizität entladen

worden war, gab es eine stern- oder eine ringförmige Struktur (Abbildung 1). Dies sahen einige Forscher als Beleg dafür an, dass es zwei elektrische Fluida gäbe und nicht nur eines – insofern sollte dieser Versuch eine Entscheidung in einer der anhaltenden Kontroversen der Elektrizitätsforschung des 18. Jahrhunderts liefern.

Lichtenberg schloss sich dieser Interpretation aber nicht an, sondern schlug vor, die mathematischen Symbole + und – einzuführen, aber offen zu lassen, ob damit verschiedene Fluida gemeint seien oder Überfluss beziehungsweise Mangel eines Fluidums. Unklar blieb aber, wie die Figuren überhaupt entstanden.

Die heutige Erklärung geht von der Annahme von wenig beweglichen positiven Ionen aus. Bei einer positiven Figur werden die negativen Ladungen gut zur Anode geführt, dadurch entstehen Ladungskanäle, die weit ausgebreitet sind und durch den Staub sichtbar gemacht werden. Bei der negativen Figur werden dagegen die Elektronen schlecht geführt, da sie sich in alle Richtungen ausbreiten. Damit wird die entsprechende Figur deutlich kleiner.

Der Reiz, den die Staubfiguren zu Lichtenbergs Zeiten ausübten, führt dazu, dass entsprechende Objekte auch heute noch in etwas modifizierter Form, beispielsweise als Kunststoffkörper mit dreidimensionalen Entladungsfiguren, hergestellt werden. Daneben gibt es aber auch eine technische Anwendung des zugrunde liegenden Effekts: Bei Kopierern und Laserdruckern wird der Toner auf Entladungsstellen gestreut und anschließend fixiert.

### Literatur und Internet

G. C. Lichtenberg, Über eine neue Methode, die Natur und die Bewegung der elektrischen Materie zu erforschen, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig 1956; Nachdruck als Ostwald's Klassiker 246. [www.lichtenberg-gesellschaft.net/leben/L\\_wirk\\_phys.html](http://www.lichtenberg-gesellschaft.net/leben/L_wirk_phys.html) 205.243.100.155/frames/lichtenbergs.html [www.rzuser.uni-heidelberg.de/~gj7/lichtenberg.pdf](http://www.rzuser.uni-heidelberg.de/~gj7/lichtenberg.pdf)

Peter Heering, Uni Oldenburg

## IM BLICKWINKEL

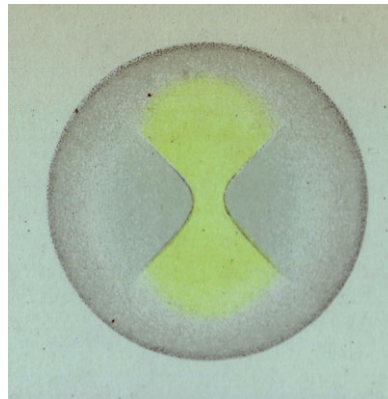
## Das Sehen der Polarisation

*Wenn der Blick in den blauen Himmel ein gelbes Büschel sichtbar werden lässt, so muss es kein Augenfehler oder Einbildung sein. Es kann sich um ein Phänomen handeln, in dem das Polarisationssehen des Menschen zum Ausdruck kommt.*

*Manchmal, wenn ich allein im Salon bin ... lasse ich unwillkürlich das Buch sinken; ich schaue durch die offene Balkontür auf die lockigen, herabhängenden Zweige der hohen Birke, auf die sich schon der Abendschatten senkt, und auf den blauen Himmel, an dem, wenn man scharf hinsieht, sich plötzlich ein winziger, gelblicher Punkt zeigt und wieder verschwindet [1].* Wenn man das Phänomen nicht kennt, wird man diese Worte des Schriftstellers Leo Tolstoi vielleicht als dichterische Überempfindlichkeit deuten. Denn nur wenige Leser werden diesen gelblichen Fleck gesehen haben und nicht ahnen, dass sich dahinter eine physikalisch-physiologische Kuriosität verbirgt. Sie beweist, dass das menschliche Auge die Polarisation des Lichtes wahrnehmen kann.

Spätestens seit Karl von Frischs Untersuchungen zum Verhalten von Bienen ist bekannt, dass Tiere polarisiertes Licht wahrnehmen können. Inzwischen ist diese Polarisations sensitivität auch bei zahlreichen anderen Tierarten nachgewiesen. In vielen Fällen werden Polarisationsmuster des blauen Himmels zur Orientierung ausgenutzt. Dem Menschen wird hingegen meist die Fähigkeit zum „Polarisationssehen“ abgesprochen. Dabei können wir ohne Hilfsmittel zumindest feststellen, dass das Himmelslicht polarisiert ist.

Dazu betrachtet man am besten eine Himmelsregion im rechten Winkel zum Sonnenstand. Dort ist das Licht am stärksten polarisiert. Die Polarisation zeigt sich – wenn sie sich denn zeigt – in einer Figur, die in etwa der in Abbildung 1 dargestellten entspricht. Zuerst entdeckt hat sie Wilhelm Karl Haidinger im Jahre 1844 [3]. Auffallend ist das büschel-



**Abb. 1** Haidinger-Büschel, wie man es sieht, wenn die Polarisationssebene des Lichts vertikal ist (aus [2]).

tige gelbliche Muster in der Mitte, das zu beiden Seiten durch eher bläulich schimmernde Bereiche begrenzt wird.

Den meisten Menschen wird es nicht gelingen, ein solches Haidinger-Büschel auf Anhieb am Himmel zu sehen. Es empfiehlt sich daher, zur Vorübung eine weiße Wand durch eine linear polarisierende Folie oder ein Polarisationsfilter hindurch zu betrachten und die Folie um 90° zu drehen. Nach jedem Dreh gelingt es in den meisten Fällen das gelbe Büschel zu sehen.

Nachdem man weiß, was man zu erwarten hat, insbesondere im Hinblick auf Färbung und Unscheinbarkeit des Phänomens, gelingt es dann vielen Menschen, die Figur auch mit unbewaffnetem Auge am blauen Himmel zu entdecken. Wenn man es erst einmal gesehen hat, sieht man es immer wieder. Leichtes Hin- und Herbewegen des Kopfes kann die Wahrnehmung des Büschels vor dem blauen Hintergrund zudem erleichtern. Die Bewegung ist wichtig, weil sich das Büschel nur kurze

Zeit fixieren lässt und die Wahrnehmung immer wieder neu angeregt werden muss. Es ist ähnlich wie beim Simultankontrastsehen, bei dem das Fixieren einer farbigen Fläche, wie der untergehenden Sonne, kurzfristig den Eindruck der Komplementärfarbe hervorrufen kann.

Aber auch Menschen, die den Blick auf den Bildschirm ihres Computers dem Blick zum Himmel vorziehen, müssen nicht auf das Erlebnis verzichten, ihre Polarisations sensitivität zu entdecken. Mit leicht wiegendem Kopf können sie das Haidinger-Büschel auch auf dem Flachbildschirm erscheinen lassen, dessen Licht polarisiert ist. Am besten funktioniert es bei einer weißen Fläche und ansonsten völliger Dunkelheit.

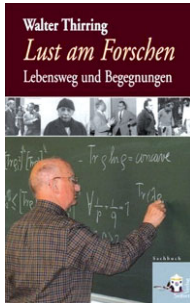
Verantwortlich für das Erscheinen eines Haidinger-Büschels ist die Struktur der Fovea. Das ist die im Zentrum des gelben Flecks im menschlichen Auge gelegene Sehgrube. Bei ihr treffen radial verlaufende Nervenfasern zusammen, die zusammen mit der gelben Pigmentierung der Netzhaut wie ein radialsymmetrischer Polarisationsfilter wirken. Dabei sind die Pigmentmoleküle so orientiert, dass sie den Blauanteil des polarisierten Lichts in einer Vorzugsrichtung schwächen. Dies hat zur Folge, dass ein gelbliches Büschel sichtbar wird. Die dazu senkrecht auftretende schwache Blaufärbung wird als Simultankontrast erklärt.

### Literatur

- [1] L. Tolstoj, Kindheit, Knabenalter, Jünglingsjahre, Insel-Verlag, Frankfurt/M. 1963.
- [2] H. v. Helmholtz, Handbuch der Physiologischen Optik, Hamburg und Leipzig 1911.
- [3] W. v. Haidinger, Über das direkte Erkennen des polarisierten Lichts, Poggendorfs Annalen **1844**, 63, 29.

*H. Joachim Schlichting, Uni Münster*

## BÜCHER



**Lust am Forschen – Lebensweg und Begegnungen,**  
Walter Thirring,  
287 S., Abb.,  
Seifert Verlag,  
Wien 2008, geb.  
24,90 €. ISBN: 978-3-902406-58-3

Der 1927 geborene Walter Thirring war von 1968 bis 1971 Direktor der Theorieabteilung des CERN und als solcher maßgeblich an der Weiterentwicklung dieser Großforschungseinrichtung beteiligt. Sein Leben war in gewissem Sinne typisch für die Generation derer, die in ihren Jugendjahren den Krieg erlebten und sich hinterher dem Aufbau einer „besseren Welt“ widmeten. Und so wurde der junge Physiker zur treibenden Kraft einer Erneuerung der theoretischen Physik in der Alpenrepublik.

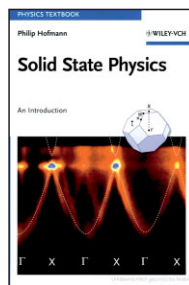
In seinen frühen Karrierejahren begegnete er einer Reihe bedeutender Persönlichkeiten wie Einstein oder Pauli. Aber wichtiger noch als diese Handreichungen an eine vergangene Epoche war sein Wirken auf zukünftige Physikergenerationen, das er von Wien aus entfaltete. Etliche seiner Schüler taten sich mit wichtigen Beiträgen zur modernen Physik hervor, so der kürzlich verstorbene Julius Wess, der maßgeblich an der Entwicklung der Supersymmetrie beteiligt war.

Doch Thirring war nicht ausschließlich der Physik verfallen. Immer wieder klingt in seiner Autobiografie seine musikalische Leidenschaft an. Seine Fähigkeiten als Orgelspieler stellte er mehrfach auch für seine Fachkollegen unter Beweis. Er hat sogar eigene Werke komponiert. Eine Auswahl gespielter Werke liegt auf einer CD bei.

Am Ende des Buches stellt sich (und uns) der Autor die Frage, was denn das Forschen gebracht habe. Dies ist, zumal in einer Zeit, in der

wissenschaftliche Ergebnisse nur allzu oft unter dem Blickwinkel des wirtschaftlichen Spin-offs gesehen werden, ein heikles Thema. Doch für Thirring war das offenbar zu keiner Zeit die Triebfeder seines Forscherdrangs. Vielmehr hält er es mit Newton, der von sich behauptete, er hätte wie ein Knabe nur ein paar schöne Muscheln gefunden, während das unendliche Meer des Unerforschten noch vor ihm liege. Und so findet ein informatives, bisweilen unterhaltendes und anregendes, aber niemals langweiliges Buch seinen würdigen Abschluss.

*Manfred Jacobi, Brüssel*



**Solid State Physics – An Introduction.**  
P. Hofmann, 224 S.,  
Wiley-VCH, Berlin  
2008, brosch.,  
49,- €. ISBN: 978-3-527-40861-0.

Beim ersten Betrachten des schmalen Werkes drängt sich unwillkürlich die Frage auf, ob es nicht etwas zu klein geraten ist für ein Lehrbuch über die gesamte Festkörperphysik. Aber dem Autor ist eine gute didaktische Darstellung gelungen. Sie eignet sich insbesondere für Studierende der Nanotechnologie, die die Festkörperphysik nicht in gleicher Tiefe erlernen müssen wie Physikdiplom-Studenten. Auch als Einführung für ein Bachelor-Studium ist das Buch gut geeignet. Für diesen Zweck bewährt sich zudem die ungewöhnliche Reihenfolge der Kapitel.

Das Buch beginnt mit einem Kapitel über die chemische Bindung und leitet dann zu den Kristallstrukturen über. Hier führt der Autor den Leser via Röntgenmessungen in das Konzept des reziproken Raumes ein. Das dritte Kapitel diskutiert die mechanischen Eigenschaften (plastische Deformationen) und erläutert Kristallfehlstellen wie Punktdefekte und Versetzungen. Es folgen die thermischen Eigenschaften des

Kristallgitters und die Definition der Phononen sowie eine klassische Beschreibung der elektronischen Eigenschaften von Metallen. Es folgt die quantenmechanische Beschreibung von Metallen und des Bandstrukturmodells. In zwei separaten Kapiteln behandelt Hofmann dann Halbleiter, Magnetismus, Dielektrika und Supraleiter. Jedes Kapitel endet mit einem Abschnitt „discussion and problems“, in dem weiterführende Fragen aufgeworfen werden und Aufgaben zur Bearbeitung und Vertiefung gestellt werden.

Den Abschluss des Buches bildet eine sehr interessante Diskussion über endliche Festkörper und Nanostrukturen. Diese würde man sich ausführlicher wünschen. So ist die Abhängigkeit von magnetischen und elektronischen Eigenschaften von der eigentlichen Probengröße speziell für eine Einführung in die Grundlagen der Nanotechnologie wichtig. Dieses Thema könnte den Anfang eines weiteren Buches bilden.

*Michael R. Koblischka, Saarbrücken*

## FORTBILDUNG

**Kerschensteiner Kolleg**

Im Rahmen des Kerschensteiner Kollegs finden im Deutschen Museum wieder Fortbildungskurse für Lehrkräfte statt.

- 1) **Erzählen im naturwissenschaftlichen Unterricht: Astronomie** vom 14.–17.10.2009 für Sekundarstufe 1 und 2. Von der Geschichte des Universums über die Weltraumfahrt und fremdes Leben im All bis hin zu Science Fiction ist Astronomie besonders geeignet für Erzählstrategien im Unterricht.
- 2) **Immer nur eine Lösung? Mathematik, Denken und Fantasie** vom 21.–24.10.2009 für Sekundarstufe 1. Wie kann man SchülerInnen mit Mathematik ansprechen? Die Fortbildung stellt aktuelle Methoden aus Mathematikdidaktik, Pädagogischer Psychologie und Museumspädagogik vor.

Kosten 240 € bzw. 260 € (Kursgebühr/3 Übernachtungen/Frühstück/Museumseintritt). Weitere Information [www.deutsches-museum.de/informativ/fortbildung/fuer-lehrkraefte](http://www.deutsches-museum.de/informativ/fortbildung/fuer-lehrkraefte).

HISTORISCHES RÄTSEL

Im Alleingang mit der Theorie

Sein Vater will nur auf Französisch mit seinen Kindern sprechen, damit sie die Sprache lernen. „Da ich mich aber auf Französisch nicht ausdrücken konnte, war es besser, stumm zu bleiben“, erinnert sich der Gesuchte. „So wurde ich zu einem sehr frühen Zeitpunkt sehr schweigsam.“ Tatsächlich entwickelt er sich zu einem schweigsamen, aber sehr erfolgreichen Physiker.

Sein Vater erwartet von dem Sohn, dass dieser Ingenieur wird. Zwar studiert der Sohn in Bristol Elektrotechnik, aber weil er keine Stelle findet, promoviert er noch in Mathematik. Danach geht er als Forschungsstudent nach Cambridge. Bei Auslandsaufenthalten in Kopenhagen und Göttingen kommt er mit der noch jungen Quantenphysik in Berührung, die von nun an zu seinem Forschungsgebiet wird.

Seine wissenschaftliche Vorgehensweise verläuft unter der Prämisse: Im Alleingang mit der Theorie. „Eine Theorie von mathematischer Schönheit ist mit größter Wahrscheinlichkeit richtiger als eine hässliche, die auf ein paar experimentelle Daten passt“, findet er. Widerspricht eine neue Theorie seinen Vorstellungen, so lehnt er sie rundweg ab. Beispiel Neutrinos: Als Pauli sie beim Beta-Zerfall entdeckt zu haben glaubt und Fermi die passende Theorie dazu formuliert, da platzt dem Gesuchten der Kragen. „Hässlich“ findet er diese Theorie, die Experimenten hinterherläuft. Das Neutrino sei ein „neues, unbeobachtbares, extra von den Forschern erfundenes Teilchen“, und er selbst wolle lieber die Energieerhaltung aufgeben, als an solche Dinger zu glauben.

Nach einem Treffen mit Heisenberg entwickelt er eine neue Beschreibung der Quantenmechanik, welche die Heisenberg- und die Schrödinger-Darstellung zusammenführt. Dazu definiert er zwei Variablentypen. Der eine beschreibt klassische Zustandsgrößen, der andere Größen wie den quantenmechanischen Impuls oder die Energie.

Damit hilft er, Elektrodynamik und Quantenmechanik zur Quantenelektrodynamik zu vereinen. Anschließend arbeitet er auch noch die Relativitätstheorie ein, was in eine nach ihm benannte Gleichung mündet. Quasi nebenbei fordert er damit auch die Existenz des Positrons. Als dieses schon ein Jahr später nachgewiesen wird, ist der Triumph perfekt. Man beruft ihn auf den Lucasian Chair of Mathematics in Cambridge, den einst Newton inne hatte, kurz darauf ehrt man ihn mit dem Physik-Nobelpreis.

Er ist ohne Zweifel einer der bedeutendsten Quantentheoretiker seiner Zeit. Doch immer wieder tritt er auch mit umstrittenen Theorien auf den Plan. So vermutet er, dass der

Wert der Gravitationskonstante mit dem Weltalter variiert und glaubt, dass die dimensionslose Konstante  $10^{39}$  eine universelle Bedeutung besitzt. Belege hierfür gibt es nicht.

Andreas Loos, Berlin

Wer war der geniale Theoretiker? Schreiben Sie die Lösung auf eine Postkarte (keine Briefe oder Email) und schicken Sie diese an: Physik in unserer Zeit, Wiley-VCH, Boschstraße 12, 69469 Weinheim, Einsendeschluss ist der 15.8.2009. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Wir verlosen drei Exemplare des Buches Die Wissenschaft bei James Bond von L. H. Gresh und R. Weinberg.

Auflösung aus Heft 3/09

Der astigmatische Astronom war George Biddell Airy (27. Juli 1801 bis 2. Januar 1892).

Gewinner aus Heft 2/09

E. Melchior, Dachau,  
Ch. Plies, Tübingen,  
H. Umbrecht, Crailsheim.



TREFFPUNKT TV



11.7., 21.00, 21.45 Uhr, Arte: Wettlauf zum Mond. Dokumentation über den Beginn der Raumfahrt (Teil 1 und 2). Whlg. 12.7., 14.00 und 14.45 Uhr, 14.7. und 15.7. je 05.00 Uhr, 18.7. 9.45 und 10.35 Uhr.

15.7., 19.00 Uhr, Arte: Zwei Frauen – Ein Ziel. Dokumentation über zwei Forscherinnen, die beide an Mond-Erkundungsprojekten arbeiten.

16.7., 8.10 Uhr, Arte: X:enius – Der lange Weg zum Mond

16.7., 19.00 Uhr, Arte: Chinas Mann im All.

18.7., 21.00, 21.45 Uhr, Arte: Wettlauf zum Mond, Teil 3 und 4, Whlg. 21.7. und 22.7. je 05.00.

19.7., 00.20 Uhr, ZDF: Lange Nacht mit Harald Lesch. Zwischenstation Mond – Auf dem Weg ins All.

20.7., 09.00 Uhr, Phoenix: Thema Weltraumforschung  
9.00 Uhr: Die ersten Raumfahrer  
9.45 Uhr: Neue Augen für das Universum  
10.15 Uhr: Die Erde – einsam im All?  
11.00 Uhr: Katastrophen der Raumfahrt  
11.45 Uhr: Mission zum Urknall

20.7. Arte: Die Lange Mondnacht  
21.00 Uhr: Im Schatten des Mondes. Die Erfahrungen der Apollo-Astronauten.  
22.40 Uhr: 2019, auf zu Mond und Mars! Über die Ausbildung zukünftiger Astronauten.  
23.30 Uhr: 1969. Live vom Mond. Historische Aufnahmen von der ersten Mondlandung.  
23.55 Uhr: Die Reise zum Mond, Stummfilm, Frankreich 1902.  
00.10 Uhr: Mond zu verkaufen! Die „Vermarktung“ des Mondes.

00.55 Uhr: Apollo 11 – Abenteuer live! Originalfilme von 1969 zur ersten Mondlandung.

21.7., 21.00 Uhr, WDR: Quarks & Co: Asteroiden, Kometen, Meteorite – die Gefahr aus dem All?

23.7., 21.00 Uhr, Arte: Die andere Seite des Mondes, Film von Robert Lepage.

25.7., 21.50 Uhr, Arte: Und sie bewegt sich doch! Dokumentation über das Kopernikanische Weltsystem.

28.7., 8.10 Uhr, Arte: Gezeiten – Kraft aus dem Meer? Das Magazin X:enius erklärt das Gezeitenkraftwerk Rance in der Bretagne und die Ursache der Gezeiten.

30.7., 21.00 Uhr, 3sat: scobel – mehr wissen über: Nanotechnologie.

2.8., 16.00 Uhr, 3sat: hitec – Das Meer als Stromquelle.

## MOL-GASTRONOMIE



## Gestärkte Saucen

Die klassische Art, Saucen mit Kartoffel-, Mais- oder Weizenstärke zu binden, ist nach wie vor sehr effektiv. Schon die Zugabe einer kleinen Menge davon ergibt nach dem Erwärmen auf etwa 70 °C eine wunderbar eingedickte Sauce – dank der molekularen Struktur von Stärkemolekülen. Vor allem das hochverzweigte Amylopektin erweist sich dabei als Saucenbinder besonders relevant.

Stärke besteht im Allgemeinen aus den Makromolekülen Amylose und Amylopektin, die in ihrem räumlichen Aufbau grundverschieden sind. Zwar sind deren Grundbausteine Zuckermoleküle, aber Amylose ist ein lineares Kettenmolekül (Abbildung oben), das sich im natürlichen Zustand zu einer Helix windet, während sich Amylopektin als ein hochmolekulares, stark verzweigtes Molekül gestaltet (Abbildung unten).

Im Stärkekorn liegen Amylopektine in einer hoch geordneten Phase vor, das heißt, dessen Arme liegen parallel und bilden Kristalle, wobei sich immer zwei davon sogar zu einer Doppelhelix verschrauben. Beide Molekülsorten tragen zur Verdickungswirkung bei, allerdings mit vollkommen verschiedenen physikalischen Mechanismen. In heiße Flüssigkeiten gegeben, verändern sich die Molekülstrukturen. Die

geordneten Helixstrukturen der Amylose lösen sich auf, und die Moleküle werden zu langen Fäden. Ebenso schmelzen die geordneten Bereiche des Amylopektins. Dann können Wassermoleküle in die ursprünglich kompakten Strukturen eindringen, sie quellen und vervielfachen dabei ihr ursprüngliches Volumen. Allein diese Gestaltsänderungen und die Volumenzunahme sorgen für die Saucenverdickung.

Dies ist einfach zu verstehen, denn lineare Moleküle besitzen genügend Freiheitsgrade, um sich zu durchdringen und untereinander zu verschlaufen. Um dies genauer zu verstehen nehmen wir der Einfachheit halber für die Gestalt der linearen Amylosemoleküle ein Irrflugmodell an, so dass deren Ausdehnung  $R$  mit deren Kettenmasse  $M$  (die proportional zur Länge ist), wie  $R \propto M^{1/2}$  skaliert. Die Belegungsdichte, die

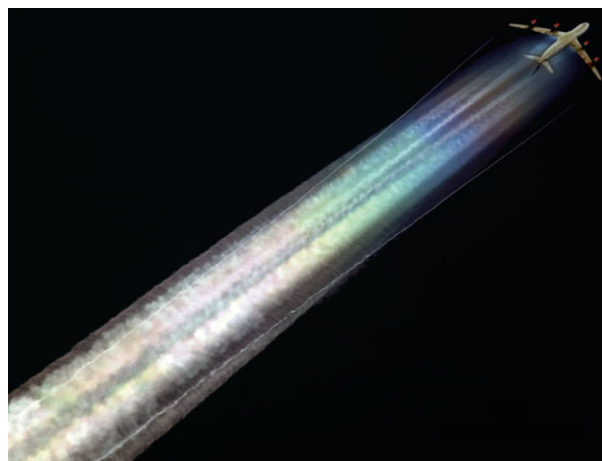
dieses Molekül definiert, ist durch  $\rho = M/R^3$  gegeben. Da die Dichte wegen  $\rho \propto 1/R$  selbst für große Moleküle sehr klein ist, können sie sich leicht durchdringen und besitzen dabei immer noch viele Freiheitsgrade für thermische Bewegungen. Mit linearen Molekülen kann nur bei hohen Konzentrationen eine Verdickungswirkung erzielt werden.

Verzweigte Amylopektine weisen indes eine Struktur von höherer dimensionaler Konnektivität auf. Dessen Ausdruck für  $R$  muss daher zu  $R \propto M^{(2-D)/(2D)}$  verallgemeinert werden, wobei  $D$  die spektrale Dimension bezeichnet. Im Falle linearer Kettenmoleküle ist diese  $D = 1$ , im Falle der hochverzweigten Amylopektine ist  $D \approx 4/3$ . Ihr Platzbedarf ist viel größer, die Moleküle können sich ab einer bestimmten Konnektivität nicht mehr durchdringen. Daher gelingt es bereits mit einer relativ kleinen Anzahl viel Raum auszufüllen und die Verdickungswirkung ist effektiver, als mit linearen Molekülen. Köche kennen das: Bereits kleine Mengen an amylopektinreicher Stärke entfalten eine große Wirkung.

Thomas Vilgis,  
MPI für Polymerforschung, Mainz



Lineare (oben) und verzweigte Molekülformen (unten) zeigen eine unterschiedliche Verdickungswirkung.



## PHYSIK IM BILD

### Farbige Kondensstreifen

Ursache für Kondensstreifen ist der rasante Druckabfall über den Tragflächen eines Flugzeugs. Dadurch sinkt die Temperatur der Luft innerhalb weniger Hundertstel Sekunden, und es entstehen bei ausreichender Luftfeuchtigkeit winzige Eispartikel. Wissenschaftler vom Institut für Physik der Atmosphäre des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt ist es gelungen, den Bildungsmechanismus der Kondensstreifen in einem Modell schlüssig zu erklären. Dies ist ein wichtiger Schritt zu einem besseren Verständnis der Klimawirkung von Kondensstreifen. Die im Foto erkennbaren Farben entstehen auf folgende Weise: Gleich hinter dem Flugzeug sind die Eispartikel noch relativ klein und reflektieren vor allem blaues Licht. Mit zunehmender Entfernung vom Flugzeug wachsen die Teilchen und reflektieren nun zunehmend langwelliges Licht ([www.dlr.de/desktopdefault.aspx/tabid-5105/8598\\_read-16715](http://www.dlr.de/desktopdefault.aspx/tabid-5105/8598_read-16715)).

## RÜCKBLICK

**Heft 2/2009****Es muss ein Umdenken erfolgen**

Editorial

**Die dunkle Seite des Kosmos**

Astrophysik

**Schwarze Löcher im Labor**

Quantenphysik

**Achterbahn fahren im Physikunterricht**

Physikdidaktik

**Neutronenhalos in neuem Licht**

Kernphysik

**Klassische Magnetkreisel**

Spielwiese

**Heft 3/2009****Der flachste Kohlenstoff**

Editorial

**Quanten-Hall-Effekt in Graphen**

Multiferroika

Spezial: Festkörperphysik

**Racetrack-Speicher – Magnetband reloaded?**

Spezial: Festkörperphysik

**Einblicke mit Schallwellen**

Medizinphysik

**Die Magnetkanone**

Spielwiese

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen und dgl. in dieser Zeitschrift berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Namen ohne weiteres von jedermann benutzt werden dürfen. Vielmehr handelt es sich häufig um gesetzlich geschützte eingetragene Warenzeichen, auch wenn sie nicht eigens als solche gekennzeichnet sind. – **Alle Rechte vorbehalten**, insbesondere die der Übersetzung in fremde Sprachen. Kein Teil dieser Zeitschrift darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikrofilm oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Nur für den persönlichen und sonstigen eigenen Gebrauch dürfen von einzelnen Beiträgen oder Teilen von ihnen einzelne Vervielfältigungsstücke hergestellt werden. Der Inhalt dieses Heftes wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber, Redaktion und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

**PHIUZ 5/2009 erscheint Mitte September****Physik in unserer Zeit**finden Sie im Internet unter  
<http://www.phiuz.de>

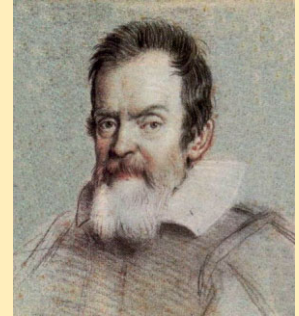
Bequemer Zugriff auf Physik in unserer Zeit vom Schreibtisch aus: Wiley InterScience bietet Vollpreis-Abonnenten Zugang zu den Volltexten sowie zu Inhaltsverzeichnissen und Abstracts von über 300 anderen Zeitschriften aus dem Wiley-Programm. Sichern Sie Ihren Zugriff – wenden Sie sich an Ihre Bibliothek!



## IM NÄCHSTEN HEFT

**Mythos Galilei**

Am 21. August 1609 führte Galileo Galilei den Ratsherren der Stadt Venedig erstmals sein Fernrohr vor. Anfänglich war das neue Instrument vor allem für das Militär und die Seefahrt von großer Bedeutung. Doch schon bald wurde es auch an den Himmel gerichtet. Galilei war nicht der einzige Entdecker ganz erstaunlicher Dinge am Firmament, die es eigentlich gar nicht geben durfte. Was waren diese Entdeckungen, und was hatte das mit dem heliozentrischen Weltsystem zu tun?

**Einmal Mars und zurück**

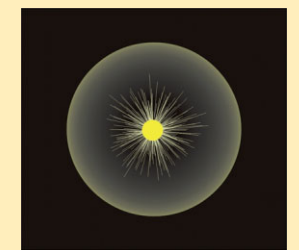
Eine der größten offenen Fragen der Wissenschaft ist die nach der Existenz von Leben außerhalb der Erde. Dabei konzentriert sich das Interesse auf unseren Nachbarplaneten Mars. Wissenschaftler in aller Welt wünschen sich deswegen, Marsgestein in ihren Labors untersuchen zu können. Doch eine Mars Sample Return-Mission erfordert erhebliche technische und finanzielle Anstrengungen.

**Anschmiegsame Elektronik**

Herkömmliche Elektronik ist starr und zweidimensional, die Welt um uns herum aber nicht. Die noch junge Makroelektronik hat möglichst großflächige elektronische Schaltungen zum Ziel, die flexibel, roll- und biegsam, ja sogar dehnbar sind. Ein geschicktes Design soll diese mechanischen Eigenschaften mit der elektronischen Funktionalität vereinbaren.

**Ein Regenbogen in der Nacht**

Kleine helle Lichtquellen scheinen vor einem dunklen Hintergrund häufig von einer hellen, strahlenförmigen Corona sowie einem farbigen Halo umgeben zu sein. Die Suche nach einer Erklärung für diese Effekte illustriert einige der typischen Fragestellungen, die dabei helfen können, verschiedene physikalische Phänomene zu verstehen.

**Tückisches Einlochen**

Golf beginnt mit starkem Abschlag und endet mit feinfühligem Einlochen. Es regieren die Gesetze der (Bio-) Mechanik und Aerodynamik inklusive Reibung – und der Akustik.

**UniKat-Flensburg**

Vor etwa zwei Jahren entstand in Flensburg ein Boot mit Flettner-Antrieb. Die praktischen Erfahrungen damit relativieren die euphorischen Erwartungen an die Leistung des Rotorsegels. Gleichwohl zeigen sie, dass ein Flettner-Rotor funktioniert und extrem bedienerfreundlich ist.

