



Blick in die Wissenschaft | 23

Forschungsmagazin der Universität Regensburg

Die erzählten Grenzen

Geschichte von Unten –
Lebensgeschichtliche Interviews im
bayerisch-böhmischen Grenzraum

Von molekularen Mechanismen zu komplexen biologischen Systemen

Interdisziplinäre Forschungsschwerpunkte der
Regensburger Lebenswissenschaften

Dichternomaden und die Wissenschaft

Der tschechische Jude J. M. Langer

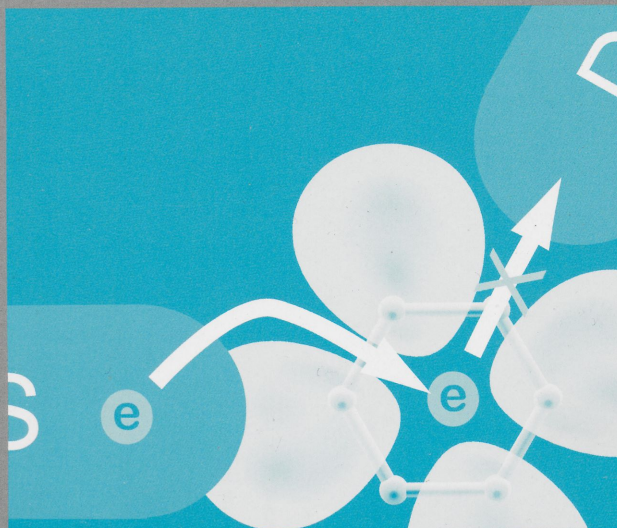
Spins, Moleküle und Supercomputer

Bausteine und Konzepte einer zukünftigen Elektronik

Chemische Synthese in einer Welt ohne Öl

Kohlenhydrate als Rohstoffquelle

Heft 23 | 20. Jahrgang 2011 | € 7,00 | ISSN 0942-928-X



229
AZ
28441
-23

UBR 069037611085



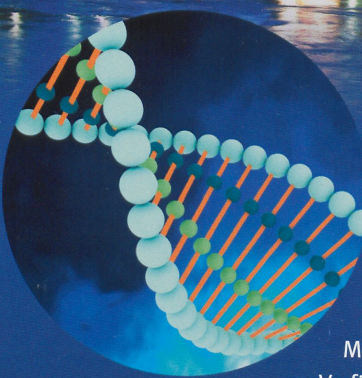
229/AZ 28441-23

www.bioregio-regensburg.de

BioPark Regensburg

Erfolgreiches Innovationszentrum an der Donau

UNESCO-Welterbe
Altstadt Regensburg:
www.regensburg.de



2009 feierte der BioPark Regensburg sein 10-jähriges Jubiläum. In dieser Zeit wurden 254 Mio. Euro in die Entwicklung der „Life Sciences“ investiert und 33 Firmen gegründet. Derzeit sind 22 Mieter mit 500 Mitarbeitern im nahezu ausgebuchten BioPark ansässig, darunter erfolgreiche Firmen wie Antisense Pharma GmbH, Genearth AG und AMGEN Research GmbH.

Ab Sept. 2011 wieder
hochwertige Labor-
und Büroräume direkt
auf dem Uni-Campus

Mit BioPark III werden ab September 2011 wieder 6.000 m² an hochwertiger Büro- und Laborfläche (S1/S2) zur Verfügung stehen. Eine Kindertagesstätte (KITA) im Haus wird die ausgezeichneten Standortfaktoren, wie direkte Autobahnanbindung (A3), sehr gute universitäre Infrastruktur und Einbindung in das Service und Firmennetzwerk der BioRegio Regensburg vor Ort bereichern.

Informieren Sie sich unter www.bioregio-regensburg.de oder Tel. 0941 920 460

Mitglied von
CLUSTER
BIOTECHNOLOGIE
BAYERN



BIO PARK
REGENSBURG GMBH

Blick in die Wissenschaft**Forschungsmagazin
der Universität Regensburg**

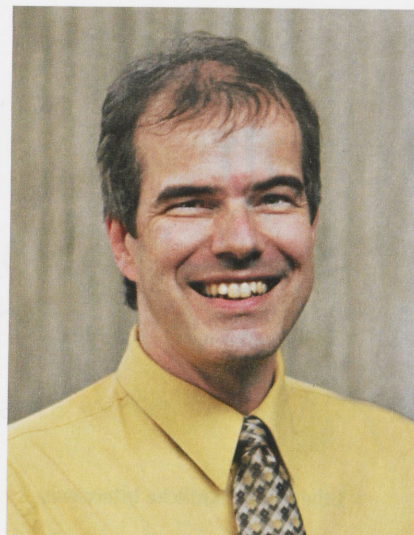
ISSN 0942-928-X, Heft 23/20. Jahrgang

HerausgeberProf. Dr. Thomas Strothotte
Rektor der Universität Regensburg
verantwortlich für den Inhalt**Redaktionsbeirat**Prof. Dr. med. Michael Landthaler
Prof. Dr. rer. pol. Susanne Leist
Prof. Dr. rer. nat. Christoph Meinel
Prof. Dr. phil. Ursula Regener
Prof. Dr. rer. nat. Klaus Richter
Prof. Dr. phil. Hans RottUniversität Regensburg, 93040 Regensburg
Telefon (09 41) 9 43-23 00
Telefax (09 41) 9 43-33 10**Verlag**Universitätsverlag Regensburg GmbH
Leibnizstraße 13, 93055 Regensburg
Telefon (09 41) 7 87 85-0
Telefax (09 41) 7 87 85-16
info@univerlag-regensburg.de
www.univerlag-regensburg.de
Geschäftsführer: Dr. Albrecht Weiland**Abonnementservice**Heidi Bernhardt
h.bernhardt@univerlag-regensburg.de**Anzeigenleitung**Jürgen Volk M.A.
j.volk@univerlag-regensburg.de**Anzeigenverwaltung**Astrid Hoffmann M.A.
a.hoffmann@univerlag-regensburg.de**Herstellung**Erhardi Druck GmbH, Regensburg
info@erhardi.de**Einzelpreis € 7,00****Jahresabonnement**bei zwei Ausgaben pro Jahr
€ 10,00 / ermäßigt € 9,00
für Schüler, Studenten und Akademiker
im Vorbereitungsdienst (inkl. 7% MwSt)
zzgl. Versandkostenpauschale € 1,64 je
Ausgabe. Bestellung beim VerlagFür Mitglieder des **Vereins der Ehemaligen
Studierenden der Universität Regensburg
e.V.** und des **Vereins der Freunde der Uni-
versität Regensburg e.V.** ist der Bezug des
Forschungsmagazins im Mitgliedsbeitrag
enthalten.**Satz:** Erhardi Druck GmbH, Regensburg**Liebe Leserinnen und Leser,**

das Forschungsmagazin der Universität Regensburg erscheint ab diesem Jahr gleich zweimal: Neben dem schon etablierten Herbstheft, in dem regelmäßig in Einzelbeiträgen das breite Spektrum an Forschungsaktivitäten auf dem Campus präsentiert wird, möchte Ihnen das Heft im Frühling bzw. Sommer interdisziplinäre Forschungsschwerpunkte der Universität etwas ausführlicher nahebringen. Die einzelnen Forschungsinitiativen sind mit dem Ziel entstanden, die universitätsweit dominierenden Fragestellungen und laufenden Projekte zu bündeln und auf diese Weise fakultäts- und fachübergreifende Verbundforschung zu fördern. Freilich können die verschiedenen Initiativen nicht selten an längere Traditionen und Entwicklungsprozesse anknüpfen.

So öffnet die geographische Lage Regensburgs im Südosten von Deutschland – schon historisch bedingt – in besonderem Maße ein Tor nach Süd- und Osteuropa. Konsequenterweise wurde an der Universität Regensburg seit vielen Jahren ein entsprechender Forschungsschwerpunkt etabliert, der auf vielfältige Weise und über zahlreiche internationale Kooperationen geistes-, kultur- und sozialwissenschaftliche Forschung zum östlichen und südöstlichen Europa ermöglicht. Lassen Sie sich in dem Beitrag „Erzählte Grenzen“ von Friederike Kind-Kovács und Markus Meinke, an dem auch Regensburger Studierende mitgewirkt haben, auf eine Reise in den lebensgeschichtlichen Raum des bayerisch-böhmischen Grenzgebiets mitnehmen. Den engen Zusammenhang zwischen Literatur und Wissenschaft führt Walter Koschmal in seinem Beitrag „Dichternomaden und die Wissenschaft: der tschechische Jude J. M. Langer“ aus.

Geprägt durch die Fakultäten für Medizin sowie für Biologie und Vorklinische Medizin nehmen die Lebenswissenschaften an der Universität Regensburg einen breiten Raum ein. Den weiten Bogen von einzelnen Molekülen hin zu komplexen biologischen Systemen spannt der Beitrag von neun Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus diesen Fakultäten. Lesen Sie über die faszinierenden Aspekte biomedizinischer Forschung, die große Fortschritte in der Bekämpfung schwerwiegender Krankheitsbilder des menschlichen Organismus wie Krebs oder chronisch-degenerativer Erkrankungen wie dem Glaukom ermöglichen.



Die Halbleiterelektronik hat in den letzten Jahrzehnten unser Leben revolutioniert. So sind beispielsweise Computer oder Handys aus unserer heutigen Zeit nicht mehr wegzudenken. Darüber hinaus haben Halbleiter das Potential für Anwendungen in einer ganzen Reihe anderer Felder. Der Beitrag „Spins, Moleküle und Supercomputer – Bausteine und Konzepte einer zukünftigen Elektronik“ spiegelt die erfolgreiche Grundlagenforschung im Fachgebiet Physik an der Universität Regensburg wider. Halbleitertechnologie basiert noch im Wesentlichen auf dem Element Silizium, doch werden zunehmend neue Materialien erforscht – etwa auf Kohlenstoffbasis – die zeigen, dass die Zukunft insbesondere in der Informationsverarbeitung gerade erst begonnen hat.

Doch sehen wir in der Zukunft auch großen Herausforderungen entgegen: Die rapide abnehmenden, nicht erneuerbaren Erdölreserven fordern neue Wege für die Energie- und Rohstoffherzeugung. Nachwachsende Rohstoffe als mögliche Lösung sind hier zu einem Zauberwort geworden, doch gilt es für deren Anwendung nicht nur zahlreiche technologische, sondern auch ethische und ökologische Probleme zu überwinden. In dem Beitrag „Chemische Synthese in einer Welt ohne Öl“ beschreibt die Fakultät für Chemie der Universität Regensburg einige unserer Aktivitäten auf diesem Gebiet.

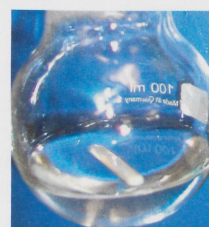
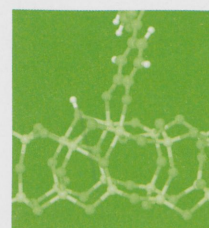
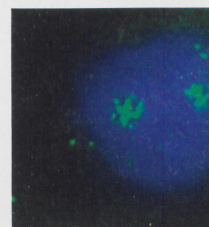
Ich wünsche Ihnen anregende Lesestunden! Über Fragen und Anregungen freuen wir uns, schreiben Sie uns eine e-Mail an pf@uni-regensburg.de.

Prof. Dr. Oliver Reiser
Prorektor für Forschung

G 77

Inhalt

- | | | |
|---|-----------|--|
| <p>Lebensgeschichtliche Interviews</p> | <p>3</p> | <p>Die erzählten Grenzen
 Geschichte von Unten –
 Lebensgeschichtliche Interviews im
 bayerisch-böhmischen Grenzraum
 <i>Sabina Blomann, Roxana Hila,
 Friederike Kind-Kovács, Julia Kling,
 Markus Meinke</i></p> |
| <p>Der tschechische Jude J. M. Langer</p> | <p>11</p> | <p>Dichternomaden und die Wissenschaft
 Der tschechische Jude J. M. Langer
 <i>Walter Koschmal</i></p> |
| <p>Interdisziplinäre
 Forschungsschwerpunkte</p> | <p>16</p> | <p>Von molekularen Mechanismen zu
 komplexen biologischen Systemen
 Interdisziplinäre Forschungsschwerpunkte
 der Regensburger Lebenswissenschaften
 <i>Anja Bosserhoff, Gernot Längst,
 Matthias Mack, Gunter Meister,
 Michael Rehli, Frank Schweda,
 Reinhard Sterner, Ernst R. Tamm,
 Bernhard H.F. Weber</i></p> |
| <p>Konzepte einer zukünftigen Elektronik</p> | <p>28</p> | <p>Spins, Moleküle und Supercomputer
 Bausteine und Konzepte
 einer zukünftigen Elektronik
 <i>Christoph Strunk, Dieter Weiss,
 Jascha Repp, Andreas Schäfer,
 Thomas Niehaus, Tilo Wettig</i></p> |
| <p>Kohlenhydrate als Rohstoffquelle</p> | <p>39</p> | <p>Chemische Synthese in einer Welt ohne Öl
 Kohlenhydrate als Rohstoffquelle
 <i>Burkhard König, Werner Kunz, Oliver Reiser</i></p> |



Die erzählten Grenzen

Geschichte von Unten – Lebensgeschichtliche Interviews im bayerisch-böhmischen Grenzraum

Sabina Blomann, Roxana Hila, Friederike Kind-Kovács, Julia Kling, Markus Meinke



1 An der bayerisch-böhmischen Grenze

„Erzählte Grenze“ war der Titel des Interviewprojektes, das im Sommersemester 2010 am Lehrstuhl für Geschichte Südost- und Osteuropas von Frau Dr. Friederike Kind-Kovács und Herrn Markus Meinke M.A. in Kooperation mit der Kulturgeographin Frau Dr. Veronika Hofinger der LAG Brückenland Bayern-Böhmen e.V. in Schönsee entwickelt und durchgeführt wurde. Im Rahmen mehrtägiger Exkursionen wurde eine Reihe lebensgeschichtlicher Interviews mit Bewohnern des bayerisch-böhmischen Grenzraums in der Oberpfälzer Grenzregion geführt. Die Vielschichtigkeit des individuellen und kollektiven Gedächtnisses in

Bezug auf die Grenze, deren Charakter im 20. Jahrhundert mehrfach tiefgreifende Veränderungen durchlief, war Gegenstand dieses Oral History-Projektes. Dabei sollten die lokalen Erinnerungen an den *Eisernen Vorhang* in Lebensgeschichten des bayerisch-böhmischen Grenzraums im Mittelpunkt stehen. Entgegen unserer ursprünglichen Annahme wurde die „Grenze“ oder der „Eiserne Vorhang“ jedoch nur in wenigen Interviews konkret thematisiert. Stattdessen dominierten Erzählungen über den Zweiten Weltkrieg, die Vertreibung der Sudetendeutschen und die historische Beschaffenheit des Grenzraumes die individuellen Erzählungen. Um die thematische Ausweitung unseres Untersuchungsfeldes widerzuspiegeln, wird der Begriff der „Grenze“ daher nicht nur zur Auseinandersetzung mit der geographischen Grenze, sondern auch zur Reflektion „mentaler Grenzen“ innerhalb der Region und zwischen verschiedenen Bevölkerungsgruppen herangezogen.

Durch den Zweiten Weltkrieg, die nachfolgende Vertreibung der Sudetendeutschen und schließlich das Ende des Kalten Krieges 1989 hat sich das bayrisch-böhmische Grenzgebiet mehrfach tiefgreifend gewandelt. Doch wie werden diese historischen Einschnitte im kollektiven Gedächtnis der Region erinnert? Welche Aspekte waren für die individuellen Lebensgeschichten prägend? Die zur Beantwortung dieser Fragen durchgeführten lebensgeschichtlichen Interviews folgten dem Prinzip der offenen, biographischen Gesprächsführung nach Gabriele Rosenthal und wurden mit der Frage nach der gesamten Lebensge-

schichte der Interviewten eingeleitet. Insgesamt wurden elf Interviews durchgeführt, die zwischen ein und drei Stunden dauerten und in anonymisierter Form analysiert wurden. Den Interviewpartnern stand die zeitliche und thematische Strukturierung ihrer Erzählungen offen, und die verschiedenen Gesprächspartner nutzten die Möglichkeit, relevante Aspekte der eigenen Lebensgeschichte im Rahmen einer kohärenten Lebenserzählung zu präsentieren. Als Interviewpartner wurden sowohl vertriebene Sudetendeutsche als auch einheimische Oberpfälzer ausgewählt.

Bevor im Folgenden einzelne Interviews vorgestellt werden, sollen zwei Kernaspekte hervorgehoben werden, die in den verschiedenen Interviews behandelt wurden. Die Interviews zeigen, dass die Lebensgeschichten von Bewohnern dieses Grenzraumes in besonderem Maße durch Narrationen über die traumatischen Erfahrungen des Zweiten Weltkriegs sowie über die Auswirkungen der wirtschaftlichen Randlage der Region auf ihr Leben geprägt sind. Dies wurde besonders in Erzählungen zu individuellen Erlebnissen im Krieg und zu den direkten Kriegsfolgen deutlich. Im Mittelpunkt dieser Erzählungen stehen zum einen der Umgang mit der Frage nach der eigenen Schuld in der Zeit des Nationalsozialismus, zum anderen das individuelle Erleben der wirtschaftlichen Benachteiligung der Region und ihrer Menschen. Interessant war dabei die Feststellung, dass diese Erzählmuster – trotz der größtenteils sehr unterschiedlichen Lebensentwürfe und Erfahrungen der Interviewpartner – sowohl bei sudetendeutschen als auch bei bayerischen Bewohnern des Grenzraumes zu finden sind.

Lebensgeschichtliche Interviewführung

Die mündlich überlieferte Geschichte, die „Oral History“, gehört zu den wichtigsten Methoden der Quellenproduktion in der Zeitgeschichtsforschung. Während sich diese Methode lange Zeit ausschließlich auf die mündliche Überlieferung gesellschaftlicher Schlüsselfiguren fokussierte, kam es seit den 1970er Jahren zu einer Ausweitung der zu befragenden Zielgruppen. Ziel war es nicht mehr allein, die Geschichte der herrschenden Klassen aufzuzeichnen, sondern vermehrt auch gesellschaftlichen Randgruppen eine Stimme zu verleihen. Darüber hinaus ging es nicht nur mehr um die Befragung zu zentralen historischen Ereignissen, sondern insbesondere um subjektive Alltagserfahrungen ganz „normaler“ Bürger. Eine Möglichkeit, subjektive Erfahrungen abzurufen, eröffnete die Methode der biographisch-narrativen bzw. lebensgeschichtlichen Interviewführung, die von Fritz Schütze und Gabriele Rosenthal etabliert wurde. Im Gegensatz zu standardisierten Leitfadenterviews stellt die lebensgeschichtliche Interviewführung eine Technik der offenen Gesprächsführung dar, in der dem/der Gesprächspartner/in die Strukturierung der eigenen Lebenserzählung freigestellt wird. Zentrale Annahme dieser Methode ist es, dass im freien Erzählen subjektive Bedeutungsstrukturen präsentiert werden können. Diese wiederum sind gesellschaftlich geprägt und eröffnen Einblicke in die konkreten Auswirkungen von Geschichte auf das individuelle Alltagsleben der Menschen.



2 Interviewprojekt im Zentrum Bavaria Bohemia in Schönsee, Sommersemester 2010

Opfergeschichten im Spannungsfeld zwischen Schuld und Unschuld

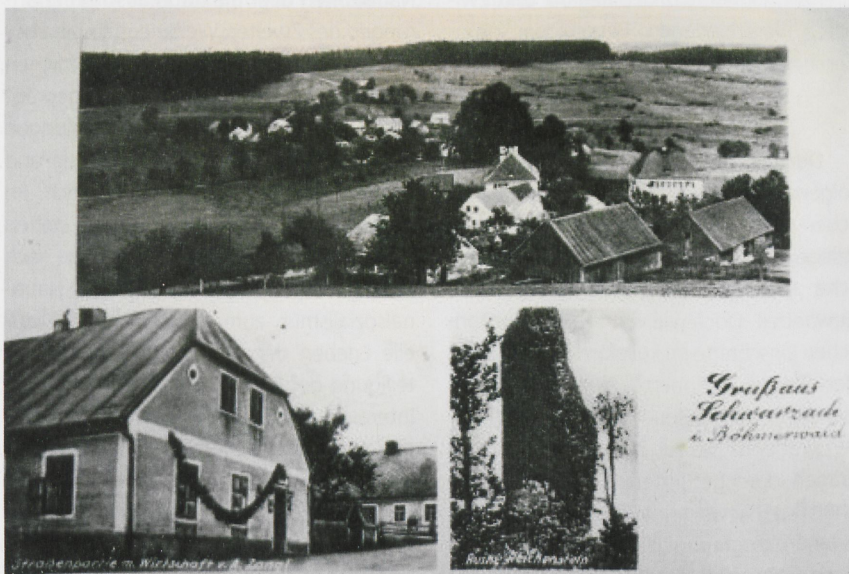
In ausgewählten Interviewsequenzen wird der individuelle Umgang mit der den Deutschen auferlegten Kollektivschuld am Zweiten Weltkrieg und am Holocaust geschildert. Die Frage nach der Schuld der Deutschen wird dabei narrativ häufig mit der Frage nach der Schuld der Tschechen an den späteren Vertreibungen verweben. In

den Erzählungen von Oberpfälzern und Vertriebenen geht es stets darum, persönliche Erlebnisse und Überzeugungen insbesondere im Hinblick auf die eigene und die fremde Schuld zu reflektieren. Dabei werden Rechtfertigungsstrategien präsentiert, mithilfe derer sich einzelne Interviewpartner – im Spannungsfeld von Täter- und Opferschaft – als Opfer des Krieges und der regionalspezifischen Kriegsfolgen positionieren.

Im Interview mit Rudolf, einem 1920 geborenen Oberpfälzer, wird eben diese Prob-

lematik deutlich. Zu Anfang des Interviews erzählt er von seiner jugendlichen Faszination für den Nationalsozialismus, die er wie folgt beschreibt: „Und dann kam der Hitler zur Macht, 33, und wir als Jugend waren diesem Programm nicht abgetan, wir waren begeistert von dieser neuen Zeit, die da heranbrach.“ Die Begeisterung für den Nationalsozialismus kann als prägend für seine Jugendzeit betrachtet werden. Durch das Personalpronomen „wir“ betont Rudolf seine Zugehörigkeit zu einer gesamten Generation und umgeht damit die Frage nach seiner individuellen Schuld. Dennoch erwähnt er dabei auch die erfolglosen Versuche mancher Lehrer, ihn und seine Mitschüler vor der Gefahr der NS-Ideologie zu warnen. Auch wenn diese Warnung, „bei [ihnen damals] keine Wirkungen erzeugte“, da „die alten Leute [...] nicht mit der neuen Zeit [gegangen seien]“, kommt er retrospektiv zu der Schlussfolgerung, dass die Lehrer damals eigentlich doch recht gehabt hätten. Diese gegenwärtige Erkenntnis resultiert aus der Neuinterpretation der eigenen Erfahrungen im Kontext heutiger gesellschaftlicher Konventionen. Dem jugendlichen Enthusiasmus für den Nationalsozialismus stellt er eine Erzählung über seine individuellen Erfahrungen in der russischen Kriegsgefangenschaft gegenüber:

„Ich habe ja noch eine fast 4-jährige russische Gefangenschaft hinter mir. In die-



3 Historische Grüßkarte aus Schwarzbach im Böhmerwald

sem Gebiet mussten wir – mehr oder weniger – in dieser Zeit KZ-Dienst [leisten], wie im KZ. ‚Hunger ist der beste Koch‘ mit anderen Worten, da bist du zu allem bereit.“

Die Erzählung über seine Kriegsgefangenschaft dominiert Rudolfs Lebensgeschichte. Diese Selbstpräsentation als Opfer ermöglicht ihm die gleichzeitige Thematisierung seiner eigenen, frühen Faszination für den Nationalsozialismus. Die Erfahrung der russischen Kriegsgefangenschaft dient dazu, die Problematik seiner persönlichen Begeisterung für die NS-Ideologie zu umgehen. Die nationalsozialistische Praxis der Massenvernichtung und die eigene sowjetische Kriegsgefangenschaft werden in dieser Erzählung auf eine Ebene gestellt. Dieser Ideologievergleich erlaubt es Rudolf, seine NS-Vergangenheit durch seine Opferrolle auszugleichen und sich von seiner jugendlichen Mitschuld zu distanzieren.

Die Opferdarstellung ist eine zentrale Erzählstrategie, die sich auch in den Lebensgeschichten von Vertriebenen wiederfindet. Die Vertreibungsgeschichte ist die bedeutendste oder sogar die einzige Erzählung in den Lebensgeschichten mehrerer sudetendeutscher Interviewpartner. In diesem Kontext wird erstmalig die geographische Grenze zwischen Bayern und Böhmen erwähnt. Die Grenze, die im Zuge der Vertreibung physisch überquert wurde, präsentiert sich hier gleichermaßen als eine „Grenzlinie des Verlusts“, wie Katharina Eisch es formuliert. Der Verlust ist dabei nicht allein materieller Art, sondern er verweist ebenfalls auf „ein[en] tiefe[n] Bruch kultur- und lebensgeschichtlicher Kontinuität“, der unüberwindbare traumatische Erfahrungen auslösen kann. Diese Annahme bestätigen die Lebensgeschichten zweier vertriebener Sudetendeutscher auf beispielhafte Weise. Die 1927 im Sudetenland geborene Luise und der 1933 ebenfalls dort geborene Max schildern ihre Vertreibungsgeschichten auf unterschiedliche Art. Luise fokussiert ihre gesamte Lebenserzählung fast ausschließlich auf den Tag ihrer Vertreibung und berichtet, emotional immer noch sehr bewegt, vom traumatischen Einzug der Tschechen in ihr Dorf:

„Da sind die Tschechen gekommen. Und die haben es uns bitter und sauer gemacht. Und da war mein Vater und dann, als die Tschechen gekommen sind, sind sie durch die Ortschaft durch, haben dauernd so eine Rute geschwungen und haben gesagt: ‚Kennt ihr KZ?‘ Wir haben das nicht gekannt. Und dann sind sie zu uns ins



5 Das Dorf Böhmischeschwarzach im Jahr 1950

Haus hinein und haben den Vater geschlagen, da wir angeblich Waffen und Munition hatten.“

Das Ausmaß der Ereignisse wird durch die Gewalt am Vater der Gesprächspartnerin verdeutlicht. Die Tschechen sorgten – in ihren Worten – für einen bitteren und sauren Geschmack, der ihr auch heute noch gegenwärtig ist. Durch die geäußerte Unkenntnis von der Existenz jeglicher Konzentrationslager distanziert sie sich von der zugewiesenen Kollektivschuld am Holocaust. Vor diesem Hintergrund empfindet Luise ihre Vertreibung auch heute noch als gänzlich unrechtmäßige Handlung.

Auch Max erinnert sich noch genau an den „Odsun“, die Abschiebung, während der die Sudetendeutschen nach der Sammlung in einem Lager in Viehwaggons nach Deutschland transportiert wurden. Auffällig in seiner Erzählung ist die Parallelität, die er zwischen der Praxis seiner Vertreibung und der Deportation der Juden im Zweiten Weltkrieg herstellt. Die Viehwaggons, in

denen „immer 48 Personen [...] in jedem Waggon gewesen [sind] mit dem Gepäck“, werden zu einem Symbol für die zeitweilige Opferrolle der Sudetendeutschen. Auch die weißen Binden, die die Sudetendeutschen nach dem Krieg tragen mussten, von denen sie sich aber während der Transporte befreiten, bestärken dieses Bild:

„Böhmisches Kubitzten war der letzte tschechisch bewohnte Ort, und nach Böhmisches Kubitzten ist dann der Bahndamm schneeweiß gewesen vor lauterer weißen Binden. Die ganzen Transporte, die da durch sind, alle haben da ihre weißen Binden raus[geworfen].“

Diese Markierung, die an den Judenstern erinnert, ist aus tschechischer Perspektive ein Symbol für die Zuweisung von Schuld und aus sudetendeutscher Perspektive eines für die Bestätigung der eigenen Opferrolle. Das Wegwerfen der weißen Binden wirkt in dieser Erzählung wie eine Befreiung von der den Sudetendeutschen zugewiesenen Schuld. Indem Erfahrungen

Das Sudetenland / Die Sudetendeutschen

Als „Sudetenland“ wurden die mehrheitlich deutsch besiedelten Grenzregionen der ehemaligen Tschechoslowakei bezeichnet. Obschon sich der Begriff ursprünglich von dem Gebirgszug der Sudeten, einem Grenzgebirge zu Sachsen und Schlesiens herleitete, fand er vor allem nach dem Ende des Ersten Weltkriegs rasch allgemeine Verwendung und bürgerte sich auch als Sammelbegriff für die deutsche Bevölkerung in den böhmischen Ländern, die sogenannten „Sudetendeutschen“ ein. Diese wiederum waren in mehreren Kolonisationswellen seit dem 12. Jahrhundert in die Gebiete Böhmens, Mährens und Schlesiens eingewandert und hatten sich mit der dort ansässigen Bevölkerung vermischt. Die über Jahrhunderte bestehende Nachbarschaft zerbrach erst durch die wachsende Verbreitung nationalistischer Tendenzen in den 1920er und 1930er Jahren. Der Anschluss der sudetendeutschen Gebiete an das Deutsche Reich am 1. Oktober 1938, die Errichtung des Reichsprotectorats Böhmen und Mähren am 15. März 1939 und die mit der nationalsozialistischen Besatzung verbundenen Gewalttaten besiegelten schließlich das Ende des gemeinsamen Zusammenlebens und schufen die Grundlage für die Aussiedlung der „Sudetendeutschen“ nach dem Ende des Zweiten Weltkriegs.

Odsun – Die Abschiebung

Bereits während des Zweiten Weltkriegs fiel die Entscheidung, die deutschstämmige Bevölkerung nach Beendigung der nationalsozialistischen Besatzung aus der Tschechoslowakei auszusiedeln. Die im Londoner Exil befindliche tschechoslowakische Regierung um Edvard Beneš begriff die Beseitigung des „deutschen Problems“ als einzig mögliche Reaktion auf die Erfahrungen des Krieges. Obgleich die Alliierten in ihrem Potsdamer Abkommen vom Juli 1945 eine Aussiedlung in „humaner und ordnungsgemäßer Weise“ forderten, kam es schon ab Mai 1945 zu sogenannten „wildem Vertreibungen“, die oftmals durch gewaltsame Ausschreitungen begleitet wurden. Erst ab Januar 1946 verlief die Abschiebung, die nach Bayern über die Bahnübergänge Wiesau, Furth im Wald und Hof erfolgte, in geregelteren Bahnen. Dennoch durften die in der Heimat enteigneten Deutschen für gewöhnlich nur 40 Kilogramm Gepäck pro Kopf mit sich führen, wurden durch weiße Armbinden mit aufgedrucktem „N“ als Deutsche (Němec) gekennzeichnet und nicht selten in Güterwaggons transportiert. Bis zum offiziellen Abschluss der Transporte 1947 erfolgte der Transfer von ca. drei Millionen Menschen nach Westdeutschland, in die Sowjetische Besatzungszone (SBZ) und nach Österreich. Lediglich rund 200.000 Deutsche durften in der Tschechoslowakei verbleiben.

von Vertreibung, wie in diesem Falle, oder von Kriegsgefangenschaft, wie im Interview mit Rudolf, in den Vordergrund gerückt werden, ist es den Interviewten möglich, sich mit Fragen der eigenen und fremden Schuld auseinanderzusetzen. Erst mit Hilfe von Gegenerzählungen können problematische Lebensphasen in die eigene, erzählte Lebensgeschichte sinnhaft eingebettet werden.

Der Grenzraum und die wirtschaftliche Randlage

Neben den Erfahrungen der unmittelbaren Nachkriegszeit dominieren insbesondere Erzählungen über die wirtschaftliche Benachteiligung der Region die Lebensgeschichten der Gesprächspartner. Armut, Arbeitslosigkeit und der Mangel an längerfristigen Perspektiven sind in diesem Zusammenhang immer wiederkehrende Motive. Narrationen über die wirtschaftliche Benachteiligung der Region finden sich sowohl bei Oberpfälzern als auch bei ehemaligen Bewohnern des Sudetenlandes. Wer Arbeit oder einen Ausbildungsplatz suchte, habe – nach Aussagen verschiedener Gesprächspartner – die Region in der Regel verlassen müssen. Nach dem Krieg verschlechterte sich die Situation noch weiter, ganze Familien mussten durch Tätigkeiten wie „Hopfen- und Schwarzbeerenzupfen“ ernährt werden. Auch der Schmuggel spielte immer eine zentrale Rolle im wirtschaftlichen Ge-

füge des Grenzraums, besonders während der Zwischenkriegszeit, als das Sudetenland zur Ersten Tschechoslowakischen Republik gehörte. Das sogenannte „Paschen“, wie man das Schmuggeln über die Grenze in der Region nennt, von Gütern wie Salz, Pfeifentabak, Rum und Vieh war ein selbstverständlicher Teil des Lebens an der Grenze und verband beide Seiten miteinander.

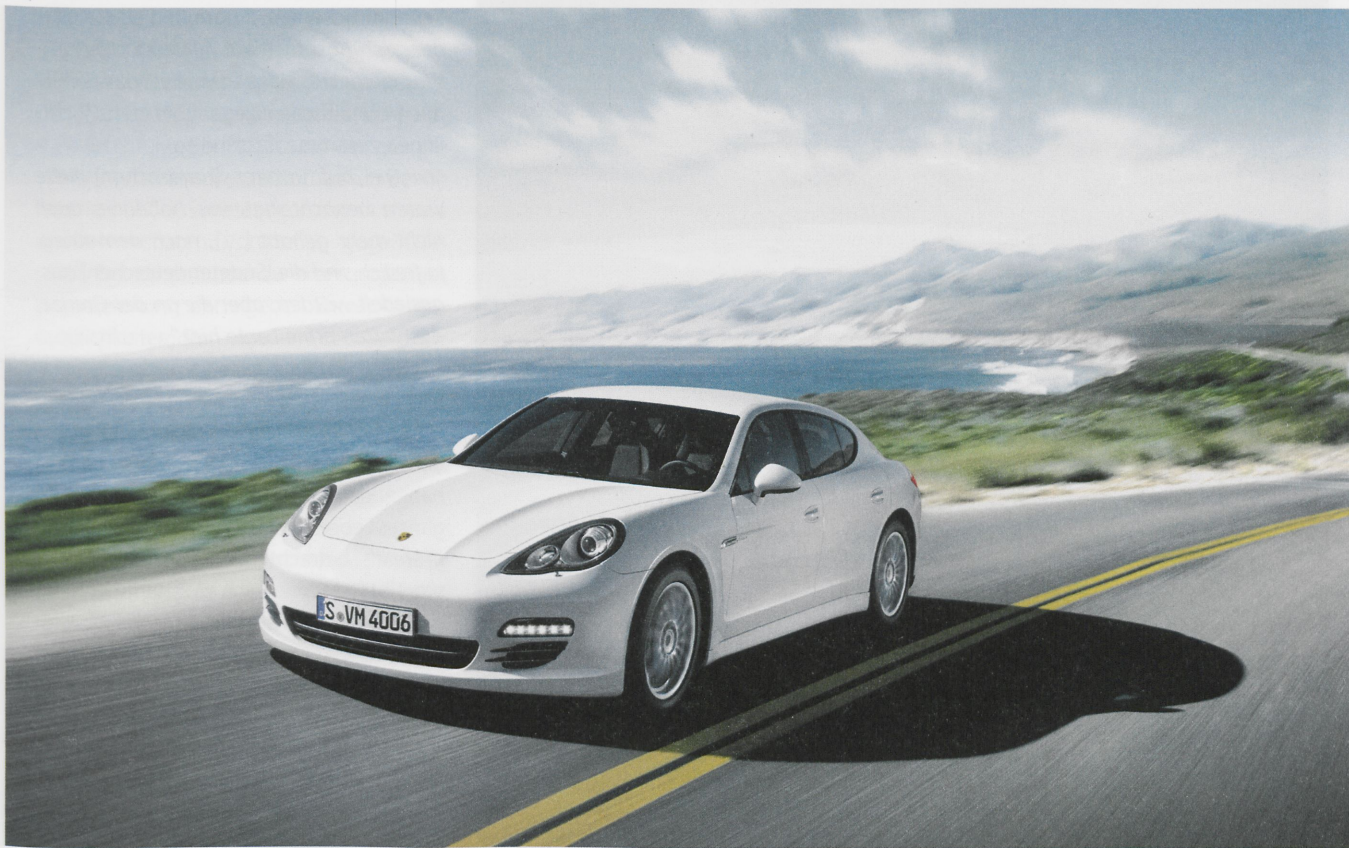
In den Interviews zeigte sich, dass nicht nur der Alltag von den wirtschaftlichen Gegebenheiten der Grenzregion bestimmt war. Ihre Auswirkungen lassen sich auch in der Selbstwahrnehmung der Menschen an der Grenze feststellen. Viele derjenigen,

die noch vor dem Zweiten Weltkrieg in der Region geboren wurden, projizieren die dortigen Bedingungen direkt auf das eigene Leben und betonen die eingeschränkten Möglichkeiten, die ihnen zuteil wurden, wobei die schwierigen Lebensumstände von der Mehrheit eher passiv hingenommen werden, als ob sie untrennbar mit ihrer Region verbunden seien. Bei einigen Interviewten, vor allem von bayerischer Seite, ließen sich dabei Narrationen ausmachen, die den Grad der eigenen Benachteiligung wie auch den der Region jeweils im Vergleich zu wirtschaftlich besser gestellten Gesellschaftsgruppen bzw. Regionen beschrieben.

Eine häufig genannte Gegenüberstellung findet zwischen der bayerischen und der böhmischen Grenzregion, dem damaligen Sudetenland, statt. Von vielen Einheimischen auf bayerischer Seite wird erinnert, dass das Sudetenland immer „ein blühendes Land“ gewesen sei. Auch während des Krieges sei die Versorgung auf der sudetendeutschen Seite der Grenze immer besser gewesen. So beschreibt der gebürtige Oberpfälzer Hans, Jahrgang 1932, wie er und seine Mitschüler vom Lehrer über die Grenze geschickt wurden, um auf der böhmischen Seite Schulhefte zu kaufen. Auch unmittelbar nach dem Krieg wurden von vielen Familien auf bayerischer Seite Brot und andere Güter über Schleichwege aus der Tschechoslowakei geholt. Indirekt werden die wirtschaftliche Lage auf der bayerischen Seite und die daraus resultierenden eigenen Möglichkeiten als wesentlich schlechter eingeschätzt.



7 „Klöppelspitzenindustrie“ – Aufnahme aus Schwarzach



**Weil Sportlichkeit und Diesel
keine Gegensätze sind.**

Der neue Panamera Diesel.

**Ab sofort in unserem
Porsche Zentrum Regensburg.
Wir freuen uns auf Sie.**



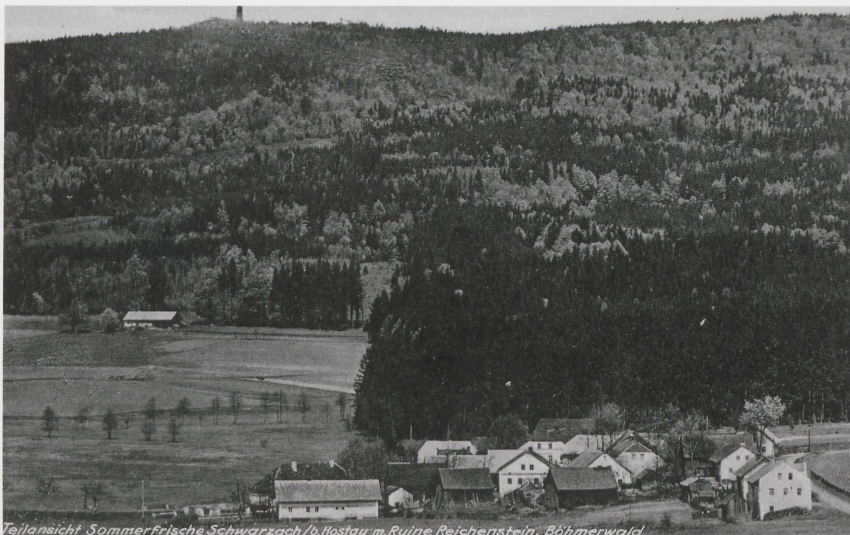
PORSCHE

Porsche Zentrum Regensburg

Jepsen Sportwagen GmbH
Merowinger Straße 2
93053 Regensburg
Tel.: 09 41 / 70 57 9 - 0
Fax: 09 41 / 70 57 9 - 300

www.porsche-regensburg.de

Kraftstoffverbrauch (in l/100 km): innerstädtisch 8,1 · außerstädtisch 5,6 · insgesamt 6,5 · CO₂-Emission: 172 g/km



8 (a) Das Dorf Schwarzach vor 1945



8 (b) Das Dorf Schwarzach heute

Auch finden sich Gegenüberstellungen zwischen der böhmischen Grenzregion und den weiter im Landesinneren gelegenen Teilen des Sudetenlandes. Gerda, 1929 in der Oberpfalz geboren, erzählt:

„Weiter drin waren die Leute ja wohlhabend, die haben viel mehr Landwirtschaft betrieben, es war da drinnen ja direkt wie die Kornkammer, wie in Straubing unten.“

Gerda zieht hier einen Vergleich zwischen dem Inneren des Sudetenlands vor 1945 und der Gegend um Straubing, die sie damals als bayerische „Kornkammer“ wahrnahm. Diese beiden wohlhabenden Regionen stehen damit in deutlichem Gegensatz zu ihrem eigenen Besitz an der bayerisch-böhmischen Grenze. Den dortigen Boden beschreibt sie als „karg“ und nur schwer zu bewirtschaften.

Eine dritte Narration der Benachteiligung, die hier vorgestellt werden soll, findet sich in der Gegenüberstellung von alteingesessenen Bewohnern der bayerischen Grenzregion und den nach dem Zweiten Weltkrieg aus dem Sudetenland in Bayern eintreffenden Flüchtlingen. Zwar gibt es einzelne Oberpfälzer Befragte, die in den Flüchtlingen, welche Heimat und Besitz verloren hatten, die hauptsächlich Benachteiligten sehen und diesen bei ihrer Ankunft Hilfestellung leisteten. Für die überwiegende Mehrheit der interviewten Oberpfälzer steht jedoch eine andere Sichtweise im Vordergrund. Gerade für diejenigen, die das Sudetenland immer für wirtschaftlich und kulturell fortschrittlicher gehalten hatten, erschien der neue Status der Sudetendeutschen als Flüchtlinge in vielen Fällen als ein weiterer Vorteilsfaktor, der das ei-

gene Gefühl der Benachteiligung noch verstärkte. Viele der Sudetendeutschen, so wird kritisiert, hätten bereits frühzeitig angefangen, ihren Besitz auf bayerischer Seite in Sicherheit zu bringen und später dennoch Anspruch auf Zuwendungen geltend gemacht. Hans formuliert das Gefühl der Einheimischen gegenüber den Flüchtlingen zusammenfassend so:

„Die auf unserer [bayerischen] Seite waren benachteiligt, wir haben ja auch nicht mehr gehabt [...], nach dem Krieg, ja freilich sind die [Sudetendeutschen] ausgesiedelt worden, aber die an der Grenze, das waren arme Leute hier.“

Diese Erzählung zeigt auch exemplarisch, inwieweit die schwierigen wirtschaftlichen Bedingungen, die jahrzehntelang in der Region vorherrschten, dazu geführt haben, dass viele der älteren Menschen ihr ganzes Leben retrospektiv als „an den Rand gestellt“ betrachten. Dieses Gefühl beschreibt Katherina Eisch im Zusammenhang mit den Bewohnern des deutsch-tschechischen Grenzraums als ein „Abgestelltsein [...] am Rand der zivilen Welt“. Die eigene Position in den lokalen Erzählungen wird definiert, indem man sich von etwas Anderem, scheinbar Besseren abgrenzt, sei es von der Gegend auf der anderen Seite der Grenze, von wohlhabenderen Gegenden im Binnenland oder, wie im Fall der Flüchtlinge, von bestimmten Personengruppen. Die Grenze, die den Raum durchzieht, unterstützt diese Abgrenzung, indem sie für die Menschen erst „das Andere“ schafft, an dem man den Grad der eigenen Benachteiligung festmachen kann. Dabei wird völlig vernachlässigt, dass die wirtschaftliche Benachteiligung nie auf eine Seite der Grenze beschränkt war, und dass man im gesamten Grenzraum schon seit langem mit ähnlichen Problemen zu kämpfen hatte. Stattdessen wird von den Interviewpartnern die wirtschaftliche Randlage für eine weitere Opfererzählung genutzt, welche die gleichen Muster wie die bereits beschriebene Opfernarration aufgrund der Erfahrungen nach dem Zweiten Weltkrieg aufweist.

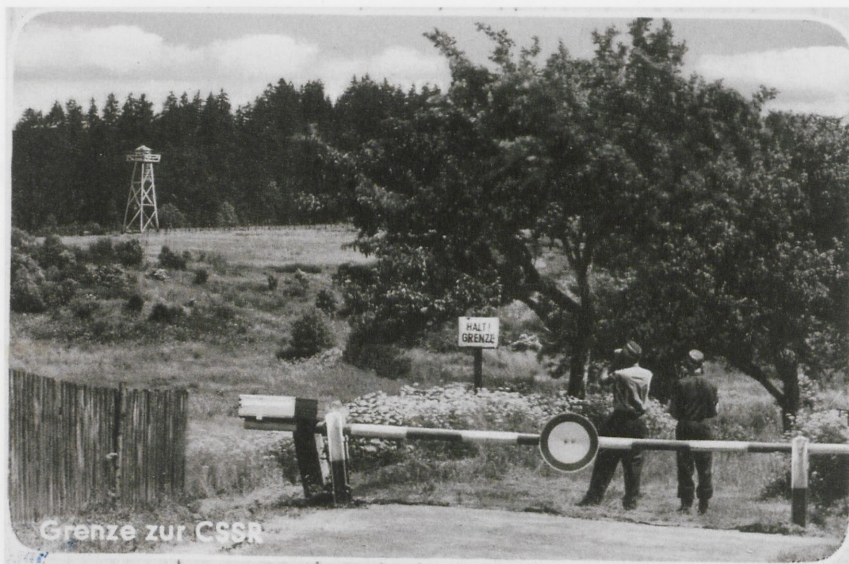
Der heutige Umgang mit Peripherie-, Kriegs- und Vertreibungserfahrung

Bei der Analyse der Interviews kristallisierten sich unterschiedliche Strategien heraus, wie mit den vielschichtigen Opfererfahrungen an der Grenze umgegangen wurde. Dabei

manifestieren sich zwei scheinbar entscheidende Aspekte für den Umgang mit Kriegs- und Nachkriegserfahrungen: Der Grad der möglichen Traumatisierung durch Krieg oder Vertreibung sowie die Generationszugehörigkeit sind für die heutige Präsentation der eigenen Lebensgeschichte ausschlaggebend. Beispielsweise führten die traumatische Erfahrung der Flucht und des gewaltvollen Auftretens der tschechischen Bevölkerung bei der Sudetendeutschen Luise zu unüberwindbaren Vorurteilen gegenüber „den Tschechen“ und zu einer negativen Wahrnehmung der eigenen Entwicklungsmöglichkeiten. Den eigenen Lebenslauf beschreibt sie als „eine einzige Plage“. Bei der gleichaltrigen Oberpfälzerin Gerda, die selbst keine ähnlich traumatischen Erfahrungen durchlebt hat, wird das Leben hingegen trotz der entbehrungsreichen Zeit als insgesamt fröhlich beschrieben.

„Im ganzen war es schon viel Arbeit, aber naja, das ist alles vorbei und Gott-seidank habe ich mich immer gut mit allen verstanden und heute muss ich wirklich sagen: Ich bin zufrieden mit allem.“

Neben dem Einfluss traumatischer Erfahrung auf die Evaluierung der eigenen Lebensgeschichte stellt besonders der Generationenwechsel eine weitere entscheidende Zäsur im Umgang mit dem Leben in dieser Region dar. Durch den zeitlichen Abstand zu Erfahrungen und Erinnerungen an den Krieg, welche in den betroffenen Familien weitergegeben wurden, ergaben sich für Menschen der nachfolgenden Generationen viel mehr Interpretations- und Handlungsmöglichkeiten. Diese reichen



9 Die Grenze zur Tschechoslowakei bei Böhmisch-Schwarzach

von einer Bewahrung der Kriegserinnerung bis zu deren intensiver Aufarbeitung und Kooperation mit dem Nachbarland. Deutlich wird dies auch anhand des unterschiedlichen Umgangs mit den wirtschaftlichen Bedingungen. Die Generation, die in der direkten Nachkriegszeit aufgewachsen ist, beklagt die Unterbrechung ihrer Ausbildung durch die historischen Gegebenheiten und empfindet hohen Rechtfertigungsdruck gegenüber denjenigen, die beispielsweise eine längere Schulbildung genießen durften. Dies gilt gleichermaßen für Sude-tendeutsche wie für Oberpfälzer.

Auch zeigt der Vergleich der Erzählungen zweier Grenzbeamter deutlich, wie stark sich die Motivation, an der Grenze zu

arbeiten, je nach Generation unterscheiden kann. Der ehemalige Zollbeamte Horst, Jahrgang 1930, musste seine Schullaufbahn abbrechen, um seine Familie finanziell unterstützen zu können. Er nahm eine Stelle als Zollbeamter an, obwohl er anfänglich keine genaue Vorstellung von dieser Tätigkeit hatte. Trotz der wirtschaftlichen Randlage der Oberpfalz am Eisernen Vorhang ermöglichte ihm der Grenzdienst eine Beschäftigung mit Aufstiegschancen. Im Nachhinein beschreibt er die Arbeit als eher langweilig und die Region als rückständig. Die Grenze bezeichnet er als „hermetisch abgeriegelt“, was seine Arbeit als Zollbeamter überflüssig wirken lässt.

Bei der nachfolgenden Generation spielt hingegen vor allem die Art, wie der Krieg und die Vertreibung in der Familie erinnert werden, eine zentrale Rolle. Der 17 Jahre jüngere Grenzpolizist Fritz betont seine aktive Entscheidung für den eigenen Werdegang. Er orientiert sich in seinem gesamten Verhalten an seinem Vater, welcher aus Ostpreußen stammte, in Stalingrad gekämpft hatte und schließlich in die Bundesrepublik Deutschland gekommen war. Die „Abenteuer“ des Vaters werden von Fritz zu einer Art Heldenmythos stilisiert und dessen Lebenseinstellung als erfolgreiche Strategie übernommen. Einen Schulausflug mit neun Jahren beschreibt Fritz als Schlüsselerlebnis, welches zu seiner späteren Berufswahl beigetragen habe.

„Also mit neun Jahren bin ich das erste Mal in Schwarzach an der Grenze gewesen, damals hat man die Einschusslöcher auch auf deutscher Seite noch in den Häusern gesehen. Die sind von der anderen Seite der

Die tschechisch-bayerische Grenze im Kalten Krieg

Mit der Regierungsübernahme der Kommunistischen Partei (KPC) in der Tschechoslowakei am 24. Februar 1948 kam es auch zu Absperrmaßnahmen an der Grenze zu Bayern. Schon Ende der 1940er Jahre errichteten Pioniereinheiten der tschechoslowakischen Armee erste Hindernisse, die ab 1951 durch einen mehrreihigen, zeitweise elektrifizierten Stacheldrahtzaun ergänzt wurden. Gleichzeitig entstand die tschechoslowakische Grenzwa- che Pohraniční Stráž, welche die Überwachung des Eisernen Vorhangs sicherstellte und bei Fluchtfällen mitunter die Schusswaffe einsetzte. Kontakte zwischen der Zivilbevölkerung in Ost und West wurden so weitestgehend unterbunden. Parallel hierzu patrouillierten in Bayern Streifen der Grenzpolizei, des Bundesgrenzschutzes und des Zollgrenzdienstes entlang des Eisernen Vorhangs, um Zwischenfälle und Grenzverletzungen zu verhindern. Der Einsatz von Hubschraubern und Flugzeugen zur Luftüberwachung und Informationsgewinnung war dabei auf beiden Seiten üblich, kleinere Konflikte bestimmten den Grenzalltag. Erst die politischen Veränderungen im Herbst 1989 beendeten den „Kalten Krieg“ an der Grenze und führten zu einer Entspannung der Lage.



Dr. **Friederike Kind-Kovács**, geb. 1978 in Frankfurt a. M., 2002 Master in Modern History an der University of St. Andrews, Schottland. 2004–2008 Promotion am Zentrum für Zeithistorische Forschung (ZZF), Potsdam mit Co-tutelle an der Central European University (CEU) in Budapest. Seit 2009 Akademische Rätin a. Z. am Lehrstuhl für Geschichte Südost- und Osteuropas der Universität Regensburg. 2010 Beginn des Habilitationsprojektes „The Embattled Child: Child Poverty and Child Welfare between national propaganda and international philanthropy in Interwar Hungary“.

Forschungsschwerpunkte: Kultur- und Sozialgeschichte Ostmitteleuropas, Transnationale Mediengeschichte des Kalten Krieges, Biographisch-narrative Forschung, Geschichte der Kindheit.



Markus Alexander Meinke M.A., geb. 1977 in Amberg/Oberpfalz. Studium der Geschichte und Germanistik an der Universität Regensburg. 2005 Abschluss als Magister Artium, 2008 Staatsexamen für das Lehramt an Gymnasien. Seit 2009 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für die Geschichte Südost- und Osteuropas an der Universität Regensburg.

Forschungsschwerpunkte: Politische und soziale Geschichte des bayerisch-tschechoslowakischen Grenzgebiets nach 1945; vergleichende Betrachtung osteuropäischer Grenzräume; Spätsozialismus in der DDR.

Sabina Blomann, B.A. European Studies an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. **Roxana Hila**, Studium der Germanistik und Anglistik an der Lucian-Bлага-Universität Sibiu und Ludwig-Maximilians-Universität München. **Julia Kling**, B.A. Anglistik und Europäische Geschichte an den Universitäten Bayreuth und Chester. Die drei Studierenden der Ost-West-Studien (M.A.) an der Universität Regensburg beschäftigen sich in ihrer Masterarbeit mit dem Forschungsschwerpunkt Oral History.



schen als auch auf der sudetendeutschen Seite um eine sozial stark vernetzte Region gehandelt hat. Laut Veronika Wendland handelt es sich zwar um eine Randzone, gleichzeitig jedoch auch um eine „Vermittlungs- und Vermischungszone“. So konnte in den Erzählungen ein „Kanon“ identifiziert werden, der eher zwischen den Generationen variiert als zwischen den verschiedenen sozialen Gruppen.

Darüber hinaus darf der Grenzbezug nicht nur geographisch aufgefasst werden. Das Zitat eines Grenzpolitikers weist beispielhaft auf die Ambivalenz der Grenze, die von den Anwohnern auf vielfältige Weise in ihre Lebensgeschichten eingeflochten wurde.

„Die nasse Grenze war immer die Bachmitte, wenn das Bachbett ausgespült war, hat der Grenzverlauf nicht mehr gestimmt, da wurde der Grenzstein einmal so und einmal so gesetzt, die Grenze ist genau in der Mitte, da darf der Tscheche genauso angeln wie der Deutsche, aber der Haken darf nicht in die Tschechei rüberschwimmen.“

Die Grenze wird hier zur imaginären Projektionsfläche für den Umgang mit der eigenen Vergangenheit und der daraus resultierenden Haltung gegenüber dem tschechischen Nachbarn. Zwar eröffneten die Interviews vereinzelte Einblicke in die Erinnerung an den Eisernen Vorhang als Grenze zwischen Bayern und Böhmen; in weit stärkerem Maße entpuppte sich die Grenze jedoch als eine mentale Grenze, die sich zwischen einst Vertriebenen und Alteingesessenen, zwischen Opfern und Tätern oder zwischen den verschiedenen Generationen verfestigt hat und auch noch heute für biographische Sinnstiftung und Selbstpräsentation in Anspruch genommen wird.

Literatur

Katharina Eisch, Archäologie eines Niemandslands: Deutsch-böhmische Identität und die Gedächtnis-topographie des böhmischen Grenzraums. In: Klaus Roth (Hrsg.), Nachbarschaft. Interkulturelle Beziehungen zwischen Deutschen, Polen und Tschechen. Münster: Waxmann, 2001, S. 307–326.
Anna Veronika Wendland, Randgeschichten? Osteuropäische Perspektiven auf Kulturtransfer und Verflechtungsgeschichte. In: Transfergeschichte(n). Peripherie und Zentrum in Europa. Osteuropa 58 (2008), H. 3, S. 95–116.

Grenze beschossen worden. Das hat auf mich großen Eindruck gemacht.“

Später beschreibt er die Arbeit an der Grenze als „ideales Leben“. Die Grenze als ursprünglicher, abenteuerlicher Ort, zu dem nur wenige Zugang gehabt hätten, machte für Fritz die Faszination seiner Arbeit aus. Dabei betrachtet er die Grenze als Kriegsschauplatz, indem er auf Erzählungen aus dem Zweiten Weltkrieg zurückgreift. Provokationen gehörten dabei zum Alltag, und Hubschrauber überquerten regelmäßig die feindliche Grenzlinie.

Welche Grenze?

Diese unterschiedliche Wahrnehmung verdeutlicht, dass es sich bei der „Grenze“ nicht um einen klar definierten Gegenstand handelt. Sie dient vielmehr als Konstrukt, das die Menschen im gesamten Grenzraum in ihre Argumentation miteinbeziehen, um ihren individuellen Lebensgeschichten einen Sinn zu geben. Dass sich die Erzählmuster auf oberpfälzer und sudetendeutscher Seite sehr ähneln, bestätigt, dass es sich vor dem Zweiten Weltkrieg sowohl auf der bayeri-

Dichternomaden und die Wissenschaft

Der tschechische Jude J. M. Langer

Walter Koschmal

„Künstlernomaden“ werden schnell zu einem Problem national konzipierter Wissenschaft. Gerade im 20. Jahrhundert sind sie besonders häufig. Der Komponist Mieczysław Weinberg (1919–1996) gilt als russischer Komponist. Doch ist der in Warschau Geborene jüdisch-polnischer Herkunft und sein Hauptwerk, die Oper „Die Passagierin“ basiert auf einem polnischen Libretto, das Auschwitz zum Thema hat.

Am Beispiel des tschechisch-jüdischen Dichters Jiří Mordechai Langer (1894–1943) [1] möchte ich Probleme der Erforschung hybrider Literaturverhältnisse ansprechen. Er ist der Bruder des bekannteren, nur tschechisch schreibenden Dramatikers František Langer (1888–1965). Reicht denn unsere wissenschaftliche Systematik aus, um gemischte Elemente, z. B. der jüdischen Literaturen in der Diaspora, im östlichen Galizien, in Prag, angemessen zu beschreiben? Für die Slavia sind solche Überlegungen wohl aus zwei Gründen lange Zeit kaum angestellt worden: Zum einen, weil Literaturen in der Regel in einem nationalen Rahmen dargestellt werden, zum anderen, weil die wissenschaftliche Systematik wenig geeignet ist, transnationale Phänomene angemessen zu erschließen. Literatur erweist sich für das Thema ‚Mischungen‘ als avantgardistischer Diskurs. Man kann von ihr auch in der Wissenschaft lernen.

Mischungen jüdischer mit nationalen Kulturen sind in der Slavia besonders häufig. Martin Buber führt in seiner Prager Rede vom 20.1.1909 über das Judentum aus, dass sich die Juden bewusst sein sollten, dass ihre Kultur eine gemischte ist (Buber 2001:58); es sei sinnlos, „sich etwa von der umgebenden Kultur freimachen zu wollen“.



1 Der tschechische Jude J. M. Langer

„Wir wollen und dürfen uns bewusst sein, daß wir in einem prägnanteren Sinne als irgendein anderes Volk der Kultur eine Mischung sind. Aber wir wollen nicht die Sklaven, sondern die Herren dieser Mischung sein. Die Wahl meint eine Entscheidung über die Suprematie, über das, was das Herrschende und was das Beherrschte in uns sein soll.“

Ist der Dramatiker František Langer aus keiner tschechischen Literaturgeschichte wegzudenken, findet man seinen Bruder Jiří Mordechai dort kaum. Die nationale Erinnerung an František ist selbstverständlich, nicht jene an Jiří.

Jiří hat nicht nur wenig geschrieben: Er hat dieses Wenige auch nicht nur tschechisch („Die neun Tore“), sondern auch deutsch („Die Erotik der Kabbala“) und hebräisch (Gedichte) verfasst. Das Wenige ist nicht nur Literatur, sondern auch Wissen-

schaft. Welche Gemeinschaft soll es sein, die diese Werke in drei Sprachen rezipiert? Welcher Kultur lässt sich der mehrsprachige J.M. Langer zuordnen? Dichter dieses Typs fügen sich ungenügend in nationale Konzeptionen von Wissenschaft ein. Wer also ist für den *Typus* Langer zuständig?

J.M. Langer schreibt chassidische Legenden, kommentiert sie aber auch und rückt sie in den religionsphilosophischen Kontext der „Kabbala“. Langer veröffentlicht eine Anthologie hebräischer mittelalterlicher Lyrik mit seinem Kommentar. Er kennt viele europäische und außereuropäische Sprachen. Er befasst sich – neben der Theologie – mit der damals aktuellen Psychoanalyse, vor allem von Freud, aber auch von Silberer, Stekel u. a. ebenso wie er die Forschung zur Gattung des „Rätsels“ rezipiert oder Theorien der Entstehung von Sprache. Aber er forscht auch zum Stellenwert körperlicher Arbeit in der Bibel und diskutiert dazu die Forschungsliteratur. Langers wissenschaftlicher Horizont ist ähnlich weit wie sein literarischer.

Als Dichter gehört J.M. Langer der jüdischen Literatur, auch jener Prags an. Mit Franz Kafka ist er befreundet und betreibt mit ihm hebräische Konversation. Die vielfältigen Mittlerrollen der Prager Autoren bilden einen Topos der Forschung. Dem Mittler Langer geht es – anders als den meisten Prager Juden – sogar um Vermittlung orientalischer Denkens und Schreibens. Europäisches wird ihm auch in ästhetischer Hinsicht zu eng. Er bemüht sich um die Vermittlung mittelalterlicher Textgeflechte einer den modernen Europäern meist fremden Welt. Er stellt das Vermittelnde selbstbewusst als Merkmal jüdischer Kultur und hebräischer Sprache dar.

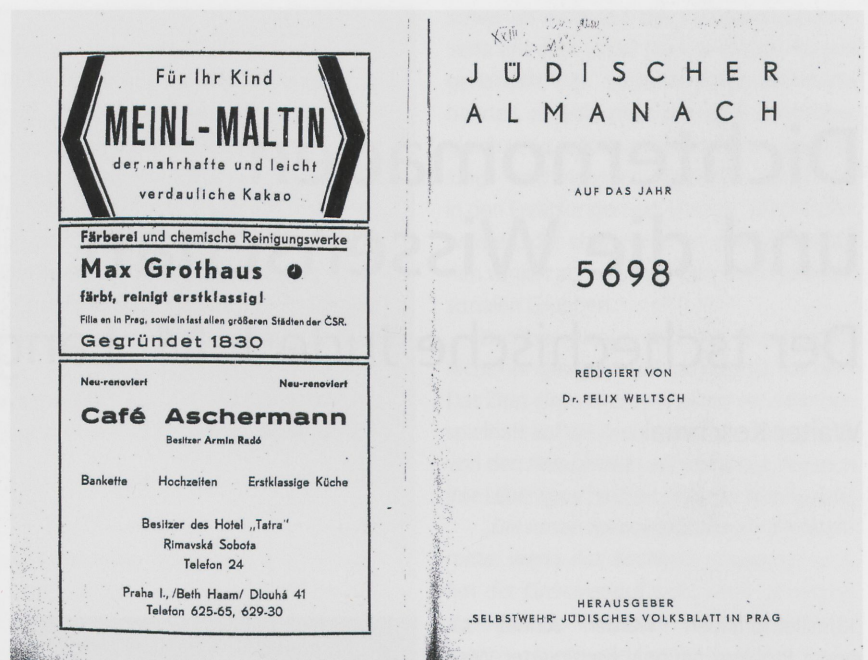
Langer ist nicht nur Teil eines europäischen Gedächtnisses. Als tschechischer Dichter schreibt er mit „Die neun Tore“ (Devět bran), seinem literarischen Hauptwerk aus den 1920er und 1930er Jahren, einen Zyklus chassidischer Erzählungen. Langer versteht sich als Teil einer europäischen Kultur, die offen ist, gegenüber der europäischen Antike und gegenüber dem Orient. Er propagiert auch angesichts der assimilierten Prager Juden, die ihre eigene Kultur über Gebühr verleugneten, einen anderen Weg, jenen der *Koexistenz* von Eigenem und Fremdem. Langer schafft aus Hebräischem, Tschechischem und Deutschem ein spannungsvolles neues Ganzes. Die Koexistenz von europäischen und orientalischen Kulturen will er den Europäern, die er allein der griechisch-lateinischen Antike verpflichtet sieht, als Alternative nahe bringen.

Vor allem die hebräische Literatur charakterisiert Langer als intertextuell gemischt, etwa mit der lateinischen oder den Kulturen der Diaspora. Ihn interessieren vor allem globale kulturelle Kreuzungspunkte wie etwa das mittelalterliche Turkestan. Dort haben sich für ihn chinesische, arabisch-orientalische und europäische Literatur verbunden: Räume wie diese seien zarte Berührungspunkte einer mystisch anmutenden Interkulturalität. Die „Allmacht der Kunst“ entstehe (nur) dort, wo sich ganz unterschiedliche Einflüsse mischten.

Langer beschreibt die Geschichte Israels als ewigen „Auszug“ (*odchod*): „Odchodem z cizí země“, ‚Auszug aus fremden Kulturen‘, Auszug aus sich selbst zu einer vollkommenen Gestaltung seines nationalen Wesens, Auszug aus der bedrückenden Enge profaner Kleinlichkeiten zur Höhe großer schöpferischer Freiheit. Die Nation müsse die eigene kulturelle Enge ebenso verlassen wie das Individuum. Nur so gelangten beide zu künstlerischem und geistigem Reichtum. Das Nationale wird damit als je spezifische Mischung mit fremden Einflüssen definiert. Diese neue Konzeption nationaler Kultur verlangt auch eine neue Konzeptionen von Wissenschaft.

Langers wissenschaftliche und literarische Kontexte

J. M. Langer lässt uns eingefahrene Wege wissenschaftlicher Zuordnungen, „etwa seiner Werke zur tschechischen Literatur, überdenken. Inwiefern übt eine nationale Konzeption von Literaturgeschichte unan-



2 Titelseite des in Prag in deutscher Sprache erscheinenden „Jüdischen Almanach“

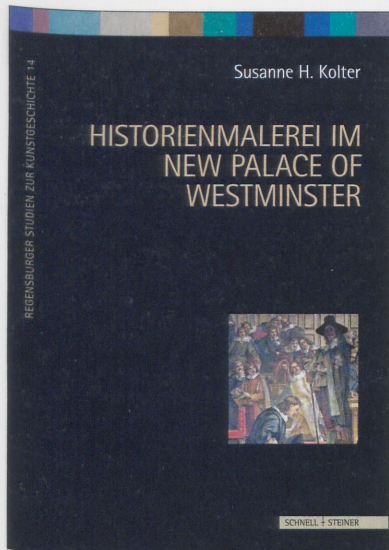
gemessene Systemzwänge aus? Schon zu Beginn des 20. Jahrhunderts richteten Religionswissenschaftler ihr Augenmerk auf kulturelle „Kontaminationen“ zwischen Orient und Okzident. Reitzenstein/Schaeder (1926) fordern die Überwindung „jener Isolierung der einzelnen Religionen, die wir in unseren Lehrbüchern durchführen“.

Das Wesen interkulturellen Austauschs aber ist ein anderes: „Verstehen muß im Aushalten des Fremden, Anderen geschehen, oder es findet gar nicht statt“. Das vorschnelle Vergleichen mit dem Anderen kann verhindern, dass man ihn versteht. Interkulturelles Verstehen zielt nicht auf mehr Wissen ab, sondern auf die „Erfahrung gemeinsamen Lebens“ (Sundermeier 1991:25). Das Verstehen des Anderen öffnet den egozentrischen, solipsistischen Menschen erst für das Gemeinsame, auch für die Nation. Dieser Andere wird ihm Lehrer. Er lehrt ihn zu sehen, was er aus Egoismus nicht sehen kann. Im Gemeinsamen nehme ich den Anderen hin, ohne ihn assimilatörisch zu verändern. Die *Sinnfülle* von Texten erschließe sich erst in einem „interkulturellen konvivialen Umgang“ (Sundermeier 1991:26). Langer selbst sorgt für jene „widerständigen Erfahrungen“, die den Umgang mit dem Fremden charakterisieren. Langer will das kulturell Andere verstehen, indem er mit ihm, in seinem Fall mit den Ostjuden, lebt. Um es verstehen zu können, verstärkt er sein eigenes Fremdsein. Langer macht – in seinem Leben – im Sinne Hans Georg Gadammers das Andere gegenüber dem Eigenen

stark. Koexistenz meint hier das gleichberechtigte Nebeneinander von Kulturen, der hebräischen, tschechischen und deutschen. Erst so kann ein höherwertiges Gemeinsames entstehen.

Die Intertextualität Langers ist vorwiegend eine hebräische, nicht aber eine tschechische. In tschechische literarische Kontexte schreibt sich der Tscheche Langer weniger ein als in jüdische. Diese stammen zudem aus dem europäischen und außereuropäischen Raum. Damit wird zum einen ein neuer Typus einer innerslavischen Intertextualität geschaffen, etwa zur polnischen jüdischen Literatur. Zum anderen entstehen so Verbindungen zur spanischen jüdischen Literatur, aber auch zu arabischen Kulturen. Zwei Komponenten sind hierbei zu unterscheiden: Mit Hebräisch wird zum einen nicht die eigentlich zu erwartende Nationalsprache gewählt, obgleich Langers Erzählung „Die neun Tore“ selbst in der Nationalsprache Tschechisch verfasst ist. Zum anderen wird aber eine nationale Sprache gewählt, die als profan gegenüber der sakralen Sprache des Hebräischen diskreditiert wird. Das Moment des religiösen Charakters einer Sprache tritt neben das der nationalen Spezifik. Die religiöse Dimension ist dabei wichtiger als die nationale.

Die Nationalsprachen sind im Vergleich zur gemeinsamen religiösen Sprache weniger bedeutsam. Sie sind jene unmittelbar vernehmbaren weltlichen Sprachen, die – analog zur nur sichtbaren Welt – das Wichtigere, die wesentliche Sprache verdecken.



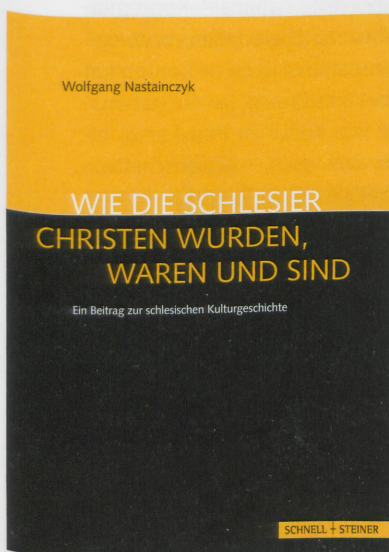
Susanne H. Kolter · Christoph Wagner (Hg.)
**Historienmalerei im
 New Palace of Westminster**

Reihe: Regensburger Studien
 zur Kunstgeschichte, Bd. 14

1. Auflage 2011, 336 Seiten,
 17 x 24 cm, Hardcover, fadengeheftet

ISBN 978-3-7954-2535-7
 ca. € 59,- [D] / SFr ca. 83,90

Erscheint im August 2011



Wolfgang Nastainczyk

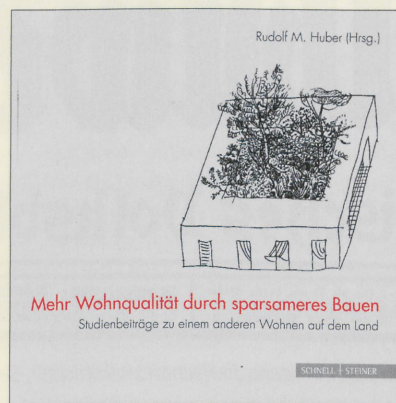
**Wie die Schlesier Christen
 wurden, waren und sind**

Ein Beitrag zur schlesischen Kulturgeschichte

1. Aufl. 2011, 276 Seiten, 7 s/w-Abb.,
 17 x 24 cm, Hardcover, fadengeheftet

ISBN 978-3-7954-2468-8
 € 34,95 [D] / SFr 46,90

Bereits erschienen



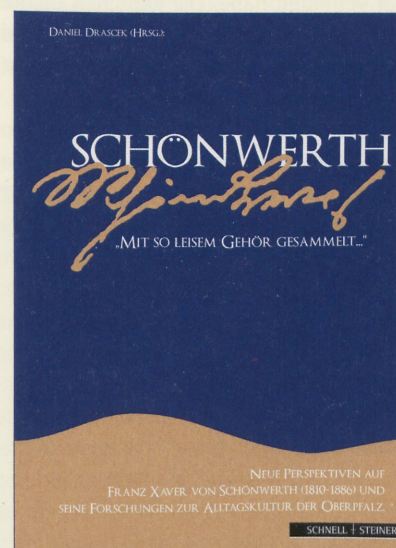
Rudolf M. Huber

**Mehr Wohnqualität durch
 sparsames Bauen**

1. Auflage 2011, 112 Seiten, 124 Farb-,
 16 s/w-Abb., 20 x 20 cm,
 Softcover, klebegebunden

ISBN 978-3-7954-2494-7
 € 12,95 [D] / SFr 20,50

Bereits erschienen



Daniel Drascek (Hrsg.)

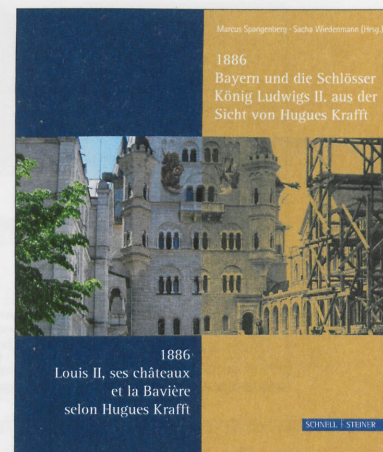
**Schönwerth – „mit so leisem
 Gehör gesammelt..“**

Neue Perspektiven auf Franz X. v. Schönwerth (1810-1886)
 und seine Forschungen zur Alltagskultur der Oberpfalz

1. Aufl. 2011, ca. 176 Seiten, ca. 50 Farb-, ca.
 4 s/w-Abb., 17 x 24 cm, Hardcover, fadengeh.

ISBN 978-3-7954-2544-9
 ca. € 39,95 [D] / SFr ca. 56,90

Erscheint im September 2011



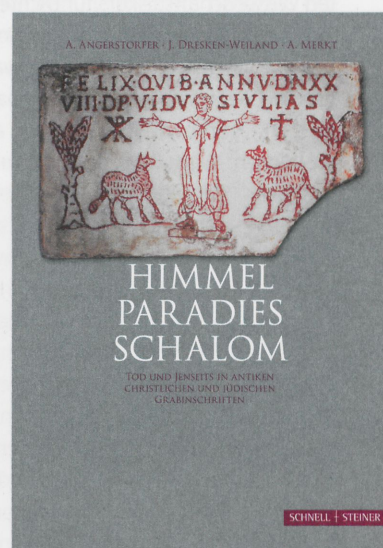
Marcus Spangenberg · Sacha Wiedenmann (Hg.)
**1886. Bayern und die Schlösser
 König Ludwigs II. aus der Sicht
 von Hugues Krafft**

1886. Louis II, ses Châteaux et la Bavière selon
 Hugues Krafft

1. Auflage 2010, ca. 160 Seiten, 52 Farbabb.,
 21 x 25 cm, Broschur, fadengeheftet

ISBN 978-3-7954-2470-1
 € 19,95 [D] / SFr 30,50

Erscheint im August 2011



Andreas Angerstorfer · Jutta Dresken-Weiland ·
 Andreas Merkt

Himmel, Paradies, Shalom

Tod und Jenseits in antiken christlichen
 und jüdischen Grabinschriften

1. Auflage 2011, 370 Seiten, zahlr. s/w-Abb.,
 17 x 24 cm, Hardcover, fadengeheftet

ISBN 978-3-7954-2325-4
 ca. € 34,95 [D] / ca. SFr 46,90

Erscheint im Oktober 2011

<p>Redaktion und Administration Prag 1, Celetná 22.</p> <p>Belbatafellen-Ronto Nr. 45988. Inferaten-Abteilung Nr. 43372. Deutsches Belbatafellen Nr. 404.328.</p> <p>Telephon Nr. 80487. und 4440.</p> <p>Redaktionsbüro Mittwoch, 9 Uhr vormittags.</p> <p>Erscheint jeden Freitag</p> <p>XIX. Jahrgang.</p> <p>Nr. 10</p>	<p>Einzelpreis 2.- Kč.</p> <h1>Selbstwehr</h1> <h2>Jüdisches Volksblatt</h2>	<p>Abonnementpreis mit Beiliegung</p> <p>Halbjährig . . . Kč 35.— vierteljährig . . . Kč 18.— Eingekauft . . . Kč 1.50.</p> <p>Inferatenpreis Kč 1.— für die Korrespondenz-Prüfungszettel. Inferatenannahme durch alle Annoncenbüros u. die Abenteu- rifikation dieses Blattes.</p> <p>Bestellte Schulnoten sind zu liefern: In Wien auf unter Belbatafellen Nr. 404.328. In Deutschland durch Postamt auf Sendung der 1000-Marknoten für die Selbstwehr. In Österreich durch die Postanstalt auf Konto der österr. Annon- cenanstalt für die Selbstwehr.</p> <p>10. Adar 5685.</p> <p>6. März 1925.</p>
<p>Inferatenarief: Im Inferatenteil Kč 2.— für die 72 mm breite Prü- fungszettel: Stellengefuche Kč 1.20 für die 72 mm breite Prüfungszettel: für die Prüfungszettel Kč 2.40 für die 72 mm breite Prüfungszettel.</p> <p>Teritarief: Donnerstagsblätter Kč 10.— für die Morgenzettel und Kč 8.— für die Colonetzettel: Anempfehlungen Kč 12.— für die feste Morgenzettel, Kč 8.— für die Morgenzettel, Kč 7.50 für die Colonetzettel. Beilage von Proben nach Bel. Zahl.</p>		

3 Titelseite des in Prag in deutscher Sprache erscheinenden „Jüdischen Volksblatt“ „Selbstwehr“

Langer bestimmt seine literarische Identität nicht als nationale: Seine Anthologie hebräischer Lyrik verankert er nur in einer hebräischen Tradition. Hebräischkenntnisse seien für die Lektüre ebenso Voraussetzung wie Vertrautheit mit den Schriften des Alten Testaments und des Talmud. Diese Diskrepanz zwischen der von außen bestimmten Identität nationaler Geschichtsschreibung und der subjektiven des Dichters sollte aufgelöst werden. Sie erklärt sich daraus, dass es keinen geeigneten Wissenschaftsdiskurs für Dichter dieses Typus gibt: Langers Schreiben ist ein Schreiben zwischen Literaturen. Dies war wohl dem mittleren und östlichen Europa im frühen 20. Jahrhundert eher eigen als dem westlichen. Wenn Max Brod mit seiner Behauptung, der jüdische Mensch sei ein elliptischer, Recht hat, dann verfügt der Jude – wie die Ellipse – immer über zwei Zentren. Deshalb ist dem jüdischen Humor jene Fähigkeit eigen, als Jude über Juden, über die eigene Ethnie lachen zu können. Der elliptische Jude kann für Langer eine Außenperspektive zu sich selbst einnehmen. Langer reagiert damit auf bestehende, vor allem nationale Wissenschaftsdiskurse. Ihm geht es darum, bei aller Unterschiedlichkeit, die auch national bedingt sein kann, die kulturelle Verwandtschaft im Wesen zu zeigen. Darin sieht er das zentrale Desiderat der Wissenschaft.

Er fordert einen wissenschaftlichen Ansatz, den man heute als „interdisziplinär“ bezeichnen würde. In Langers Sprache ließe sich der Ansatz auch als bizenstristisch, d. h. elliptisch, als jüdisch bezeichnen. Der eine wissenschaftliche Diskurs genüge nicht. Es muss die andere wissenschaftliche Disziplin hinzutreten. Für Langer ist das etwa jene der Psychoanalyse.

Analogien und Konjunktionen: zur Erotik des interkulturellen Netzes

Der tiefere Grund für Langers Plädoyer für Wörtlichkeit der Übersetzung ist neben dem Ethos der wissenschaftlichen Präzision die Konzeption von Übersetzung als einem zentralen Akt kultureller Vermittlung. Diese begreift Langer als ein zutiefst jüdisches Anliegen. Der jüdische Dichter Immanuel der Römer sei es gewesen, der Petrarca's Sonette in die hebräische Literatur vermittelt habe. Die jüdischen Dichter fungieren dann als Mittler, wenn sie national begrenzte Literaturen durch Vermittlung anderer Kulturen öffnen.

Vermittlung hat für Langer vor allem zwei Dimensionen. Zum einen hebt er immer wieder die Bedeutung der Vermittlung des Alten in der Gegenwart hervor, zumal der hebräischen und der mittelalterlichen Literatur. Die jüdischen Dichter seien es vor allem, die eine Brücke zwischen europäischen und orientalischen Kulturen schlugen. Sie brechen also eine vermeintlich national geschlossene Kultur ebenso auf wie eine geschlossene europäische. Auf diesem Weg aber könne zum anderen erst die Annäherung von Literatur und Kultur an deren Wesen stattfinden, das letztlich das Absolute sei und die „Allmacht der Kunst“ begründe.

Langer begreift deshalb auch das Übersetzen weniger als autonome Tätigkeit, denn in dieser – übergeordneten – funktionalen Abhängigkeit. Deshalb wertet er die wörtliche Übersetzung als die wirksamere. Er verzichtet darauf, das Verschiedene ähnlich zu machen. Langer plädiert für eine Übersetzung, die das Andere, das Fremde als das Andere stehen lässt und so die kulturelle Vielfalt erhöht.

Die Perspektive Langers auf Kulturen ist immer eine interkulturell offene. Man darf darin ein spezifisch jüdisches Moment sehen: Langer begreift jüdische Kultur nicht als deutsche, tschechische oder persische jüdische Kultur, sondern immer als eine Nationen und ihre Kulturen übergreifende. Er zeigt primär nicht Differenzen und Disjunktionen auf, wie dies eine nationale Perspektive um der Konstruktion nationaler Spezifik willen tut, sondern Konjunktionen. Für ihn ist die jüdische Kultur dazu prädestiniert, nationale Konzeptionen von Kultur zu überwinden, bzw. diesen eine transnational jüdische Konzeption als Alternative anzubieten. Ein nur nationales Konzept von Kultur ist ihm fremd, erscheint ihm aber auch – wissenschaftlich – unangemessen. Er stellt nationale Wissenschaftskonzepte in Frage.

Der hier zugrunde liegende Gedanke des interkulturellen Netzes – anstelle von (nationalen) Dichotomien – wird durch zwei Ideen unterstrichen: Zum einen verlaufen Einflüsse für Langer immer in mehrere Richtungen, niemals nur in eine; d. h. alle an diesem Prozess beteiligten Kulturen verändern sich. Zum anderen werden die Werke selbst nicht als reine oder homogene begriffen. Auch literarische und kulturelle Räume werden als Knoten in einem Netz verstanden. Langer nennt sie Punkte der Berührung.

Als einen wesentlichen Knotenpunkt im Netz der Weltkultur, der von solchen wechselseitigen „Einflüssen“ geprägt sei, nennt Langer das mittelalterliche Turkestan (1995:128). Hier hätten sich chinesische und indische Kultur mit den islamischen Kulturen berührt (*dotykaly*). Hier habe die chinesische Poesie ihren „betäubenden Duft“ (*opojnou vůni*) über die ganze Welt

ausgebreitet. Warum breitet sich dieser Duft chinesischer Dichtung aber von Turkestan her aus, nicht von China? Turkestan sei einfach ein entscheidender kultureller Kreuzungsort wechselseitiger Einflüsse, die sich hier potenziert haben. Und das habe dazu geführt, dass ganz andere Kulturen „unwillkürlich“ (*mimoděk*) ebenfalls die Bedeutung der chinesischen Poesie erhöht haben, nicht primär der eigenen, nationalen. Dies waren mittelalterliche persische, arabische, hebräische, türkische Sängere, aber auch Troubadoure und Minnesänger der westlichen Welt. Diese Räume der kulturellen Berührung schaffen für Langer mystische Konjunktionen von Kulturen. Es zeichnet sich ein eigenständiges Modell einer erotisch anmutenden Interkulturalität ab.

Langers erotische Interkulturalität basiert auf der Genoebene. Einflüsse verlaufen multidirektional zwischen mehreren Kulturen, ohne Hierarchiebeziehung. Das Fremde wird nicht zum Eigenen hin transformiert, sondern es bleibt bestehen: Gerade die Fremdheit wird betont. Das erfordert aber die Akzeptanz des Fremden und das Aushalten der Spannung zwischen Eigenem und Fremdem. Dies wird dadurch erreicht, dass das Eigene verlassen bzw. relativiert wird, ein „Auszug“ (*odchod*) aus dem Eigenen stattfindet. So wird die Voraussetzung für Konjunktionen geschaffen.

Diese „Vereinigungen“, die Langer in den Mittelpunkt rückt, sind religiös und psychoanalytisch verankert. Das wird in Langers „Die Erotik der Kabbala“ (1923) dargelegt.

Diese kulturellen Konjunktionen auf der Genoebene schaffen eine „unio mystica“, eine geheimnisvolle Vereinigung von Kulturen. „Vereinigung“ aber bildet die Grundlage der „Erotik“. Erotik („I'sod“) ist zugleich das universale religiöse Grundprinzip. Dieses lässt sich nur mit den Mitteln der Psychoanalyse erforschen. Interkulturalität und Intertextualität erhalten eine religiöse Dimension.

Mit diesen Überlegungen zum Denkanlass des Dichternomaden J. M. Langer sollen nicht nationale Literaturgeschichtsschreibung oder Nationalphilologie als solche entwertet werden. Doch wird deutlich, dass es nicht wenige Autoren und Texte gibt, die sich nur bedingt in derart national geprägte Konzepte einfügen. Diese anderen Autoren und Texte verlangen nach einem wissenschaftlichen Konzept, das auch transnationalen Phänomenen gerecht zu werden vermag. Man könnte etwa an eine Literaturgeschichte jüdischer Diasporen denken. Aber auch vergleichende Analysen jüdischer und nationaler Literaturen sind in höherem Maße erforderlich. Die Konzeptionen und die Funktionen national verankerter Wissen-

schaft sind in jedem Fall zu überdenken. Gerade im Interesse offener, objektiver, nicht nur europäisch adäquater Wissenschaftskonzeptionen sollten diese künftig im Geiste J. M. Langers mit nationalen Konzeptionen gleichberechtigt koexistieren können.

Literatur

Martin Buber, Werkausgabe. 1. frühe kulturkritische und philosophische Schriften 1891–1924. Gütersloh: Gütersloher Verlagshaus, 2001.

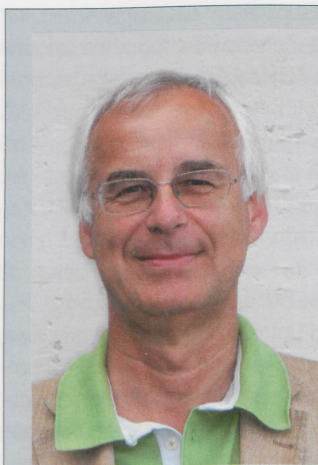
Walter Koschmal, Der Dichternomade. Jiří Mordechai Langer – ein tschechisch-jüdischer Autor. Köln/Weimar/Wien: Böhlau, 2010.

Georg Langer, Die Erotik der Kabbala. Prag: Verlag Dr. Josef Flesch, 1923.

Jiří Mordechai Langer, Die neun Tore. Geheimnisse der Chassidim. Wuppertal: Arco-Verlag, 2011.

Richard Reitzenstein, *H. H. Schaeder*, Studien zum antiken Synkretismus aus Iran und Griechenland. Leipzig/Berlin: B. G. Teubner, 1926.

Theo Sundermeier, „Erwähnungen zu einer Hermeneutik interkulturellen Verstehens“. In: Die Begegnung mit dem Anderen. Gütersloh: Gütersloher Verlagshaus G. Mohn, 1991.



Prof. Dr. **Walter Koschmal**, geb. 1952 in Plattling (Niederbayern), Studium der Slavistik, Germanistik und Geschichte an LMU München; Abschluss mit Staatsexamen und Magister Artium. Promotion zur Dramatik von I. S. Turgenev in München und Leningrad 1980–1983. Wissenschaftlicher Mitarbeiter an den Universitäten Bamberg und München. Habilitation an der LMU München zum Dialog in der altrussischen Literatur. Seit 1990 Professor an der Universität des Saarlandes, seit 1994 Lehrstuhl für Slavische Philologie an der Universität Regensburg. Rufe auf Lehrstühle nach Kiel, Münster, Heidelberg. Leiter des Europaeum der Universität Regensburg. Mitglied im Zentralen Auswahlausschuss der Alexander von Humboldt Stiftung (seit 2005).

Forschungsschwerpunkte: Russische Literatur und Kultur; Tschechische und tschechisch-jüdische Literatur; Polnische Literatur und Kultur (Barock, 20. und 21. Jahrhundert), bulgarische Literatur und sorbische Literatur und Kultur sowie slavische Volksliteratur.

Von molekularen Mechanismen zu komplexen biologischen Systemen

Interdisziplinäre Forschungsschwerpunkte der Regensburger Lebenswissenschaften

Anja Bosserhoff, Gernot Längst, Matthias Mack, Gunter Meister, Michael Rehli, Frank Schweda, Reinhard Sterner, Ernst R. Tamm, Bernhard H.F. Weber

Die molekularen Lebenswissenschaften haben in den vergangenen Jahrzehnten eine überaus rasante Entwicklung vollzogen, die zu eindrucksvollen Erfolgen geführt hat. So wurden zahlreiche funktionelle Prozesse des Lebens vom Einzeller bis zum Menschen im Detail analysiert und die daran beteiligten Moleküle identifiziert. Dadurch ist es auch zunehmend möglich geworden, die molekularen Ursachen von Funktionsstörungen zu verstehen, die zu schwerwiegenden Krankheitsbildern des menschlichen Organismus, wie Krebs oder die große Gruppe der chronisch-degenerativen Erkrankungen, führen. Allerdings hat der beeindruckende Fortschritt der Lebenswissenschaften auch die Aufspaltung in viele unterschiedliche Disziplinen zur Folge gehabt,

deren wissenschaftliche Herangehensweisen und Methoden sich stark unterscheiden. Dies macht gerade im Bereich der biomedizinischen Forschung integrative Ansätze an der Schnittstelle von biologischer und medizinischer Grundlagenforschung notwendig. Für diese Herausforderungen sind die Lebenswissenschaften an der Universität Regensburg bestens gerüstet.

Bei der Gründung der Universität Regensburg wurden die Lebenswissenschaften Biologie und Medizin dadurch verzahnt, dass die vorklinische Medizin in eine gemeinsame Fakultät mit der Biologie (Fakultät für Biologie und vorklinische Medizin) integriert wurde. Dadurch wurde eine in Deutschland einzigartige Situation geschaffen, mit

hervorragenden Möglichkeiten zu Kooperationen. In jüngerer Zeit sind aus diesen gemeinsamen Anstrengungen die Regensburger Internationale Graduiertenschule der Lebenswissenschaften (RIGel) sowie mehrere von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderte und international erfolgreiche Forschungsverbünde hervorgegangen, wie der Sonderforschungsbereich 699 „Strukturelle, physiologische und molekulare Grundlagen der Nierenfunktion“, den Sonderforschungsbereich 960 „Die Bildung von Ribosomen: Grundlagen der RNP-Biogenese und Kontrolle ihrer Funktion. Ziel dieses Artikels ist es, ausgewählte Beispiele der interdisziplinären Zusammenarbeit im Bereich der Lebenswissenschaften an der Universität Regensburg vorzustellen.

Wie Epigenetik das Leben prägt

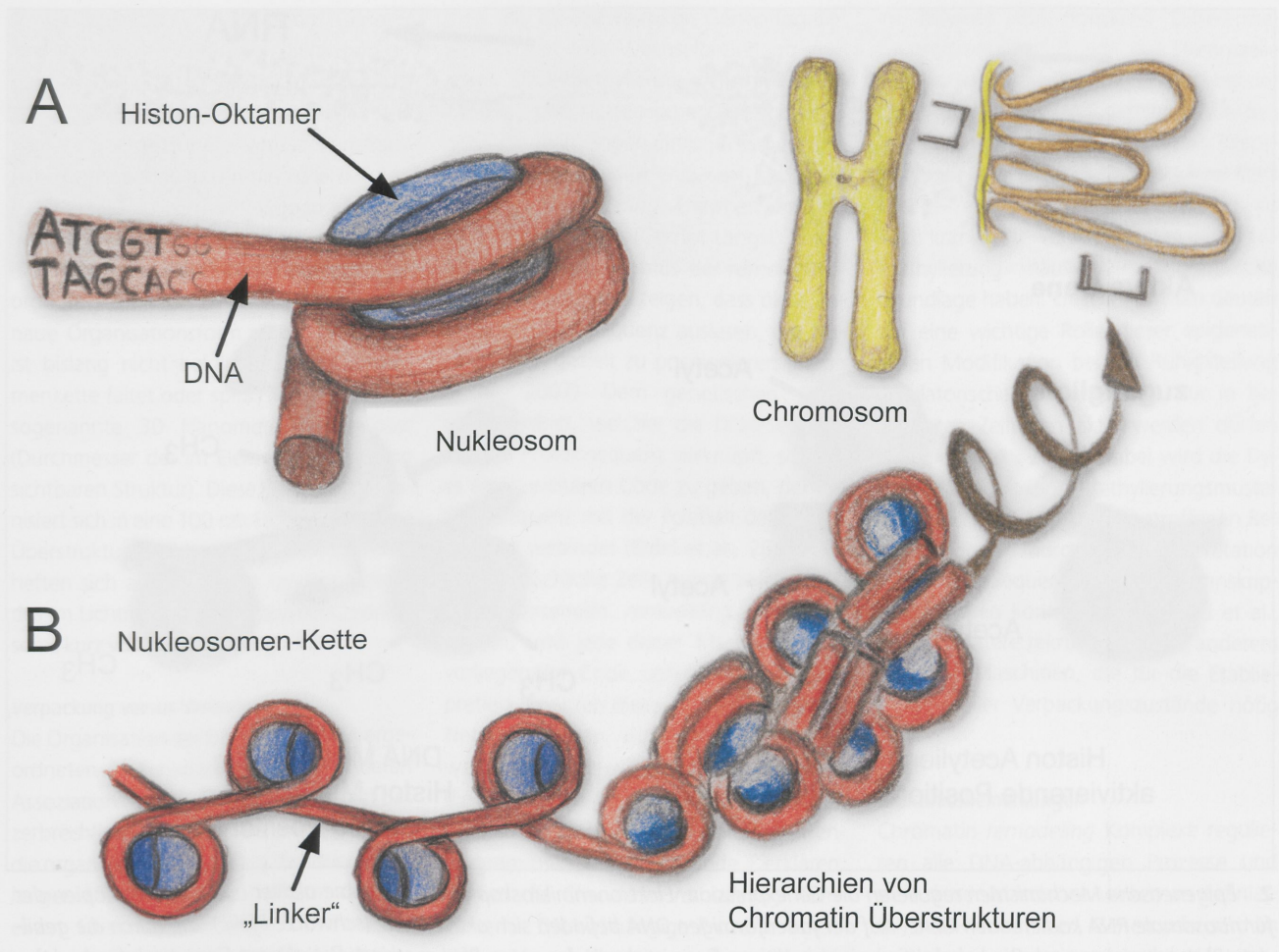
Gernot Längst, Michael Rehli

Eine befruchtete Eizelle trägt in ihrem Zellkern den Bauplan, der zur Entwicklung eines menschlichen Organismus mit all seinen individuellen Eigenheiten notwendig ist. Auch alle aus dieser Eizelle durch Zellteilung hervorgehenden Körperzellen enthalten diesen Bauplan in Form von Desoxyribonukleinsäure (DNA). Dabei handelt es sich um ein langes fadenförmiges Molekül aus Nukleotid-Bausteinen mit den vier verschiedenen Basen Adenin (A), Guanin (G), Cytosin (C) und Thymin (T), den Buchstaben des genetischen Codes. Die Abfolge dieser Nukleotide, die Genom genannt wird, stellt die

eigentliche Erbinformation dar. Ein menschliches Genom besteht aus drei Milliarden Buchstaben, die aneinandergereiht eine Länge von etwa zwei Metern ergeben. Auf diesem zwei Meter langen Bauplan liegen die Informationspakete, die die Herstellung von Proteinen beschreiben und als Gene bezeichnet werden. Die ungefähr 21.000 proteinkodierenden Gene umfassen nur etwa 1,5 Prozent des humanen Genoms.

Jede einzelne Zelle kann diesen „DNA-Bauplan“ mit all seinen „Anweisungen“ für die Ausführung spezifischer Funktionen lesen, jedoch wird ein und derselbe Bau-

plan durch unterschiedliche Zelltypen, wie z.B. Muskelzellen und Leberzellen, unterschiedlich interpretiert. Im Laufe der Entwicklung des Organismus und der Spezialisierung der Zellen ändert sich das Programm, das die Kombination an ausgelesenen Genen bestimmt und somit die Art und Menge der synthetisierten Proteine. Die definierte Kombination und Konzentration von Proteinen definiert das Aussehen und die Funktion der Zellen im Körper. Mit fortschreitender Entwicklung ändert sich die Programmierung der Zellen und deren Nachkommen, ohne den DNA-



1 Verpackung der DNA im Zellkern

(A) Das Nukleosom stellt die grundlegende Verpackungseinheit in der Zelle dar, in der 147 bp DNA um einen Proteinkern aus Histonen gewunden ist. (B) Die Nukleosomen sind durch einen unverpackten DNA-Abschnitt (linker) verbunden. Die DNA wird durch weitere Spiralisierung der Nukleosomenkette kompaktiert, deren dichteste Verpackungsform dem Chromosom kurz vor der Zellteilung entspricht.

Bauplan zu verändern. Wie aber sieht ein Programm aus und wie wählt die einzelne Zelle das passende DNA-Programm aus? Ein wichtiger Schlüsselmechanismus hierbei ist die Verpackung des zwei Meter langen DNA-Fadens in den 100.000-fach kleineren Zellkern, zum sogenannten Chromatin (griech. *chroma* = Farbe; so benannt, weil sich diese Struktur zur Lichtmikroskopie leicht anfärben lässt).

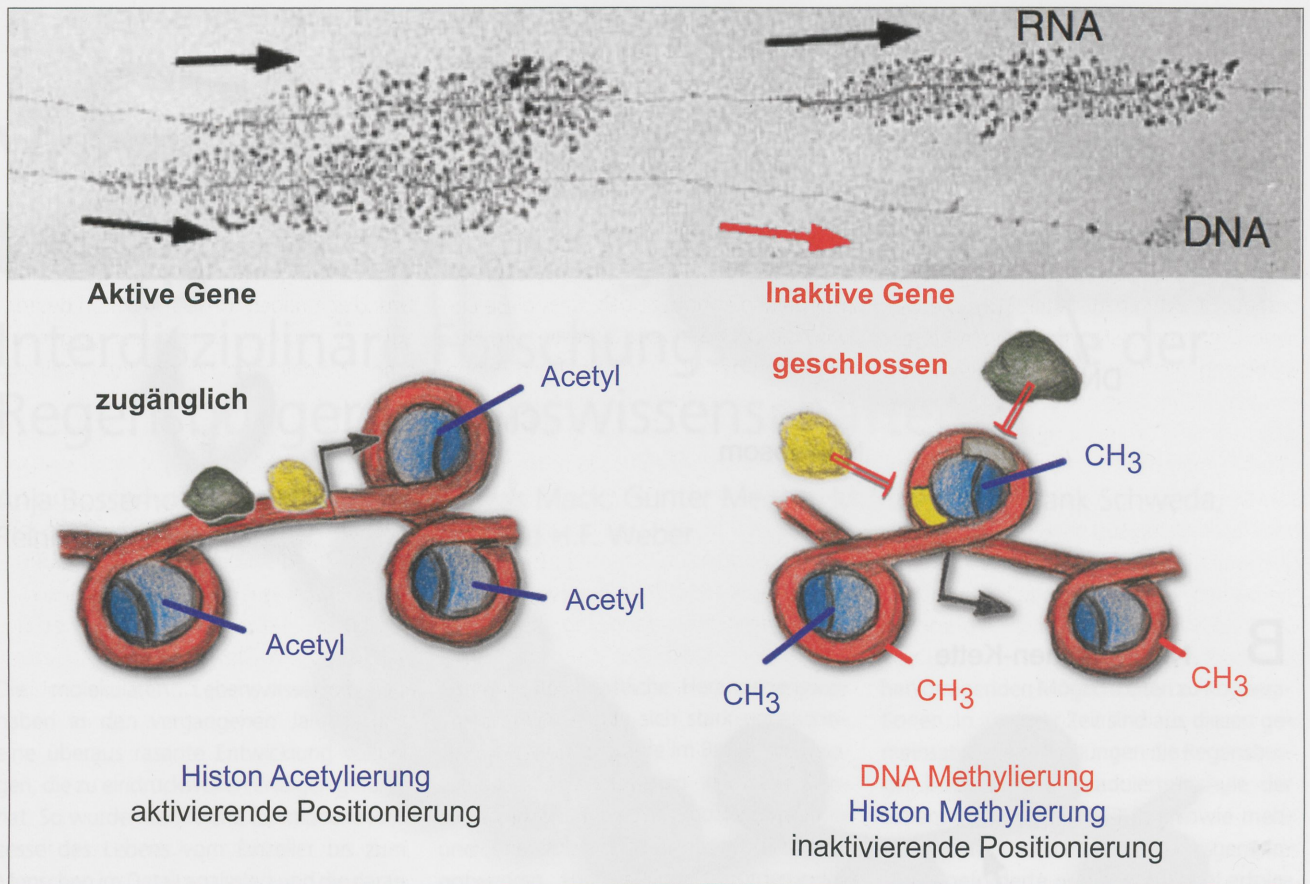
Dynamisches Informationsmanagement im sich entwickelnden Organismus

Das Problem des Informationsmanagements einer Zelle lässt sich veranschaulichen, indem man sich die DNA als einen 1000 km langen Faden mit 1 mm Durchmesser vorstellt, der in einem Zellkern von der Größe eines Fußballs verstaut wird. Die Zelle findet bei Bedarf innerhalb von Sekunden bis wenigen Minuten eine bestimmte Base der insgesamt 3 Milliarden Basenpaare, die den Anfang eines spezifi-

schen Gens darstellt und das Auslesen dieser Information ermöglicht. Für diese unglaubliche Schnelligkeit und Präzision ist nicht nur die geordnete Verpackung der DNA entscheidend, sondern auch die selektive Zugänglichkeit und die Kennzeichnung wichtiger Genombereiche. Durch die Verpackung der DNA in Chromatin muss nicht die gesamte DNA-Sequenz nach der benötigten Information abgesucht werden. Das Chromatin verpackt die DNA in eine unzugängliche Struktur. Nur ein geringer Teil der DNA mit den wichtigen regulatorischen Elementen bleibt zugänglich und findbar für die zellulären Ablesemaschinen.

Als Genetik werden alle Prozesse und Ausprägungen bezeichnet, die mit der Veränderung der DNA-Sequenz einhergehen und somit direkt den Bauplan der Zelle verändern. Während der Entwicklung eines Organismus und der Differenzierung seiner Zellen wird nicht die DNA-Sequenz

Gene, die für Eiweißmoleküle (Proteine) kodieren, liegen in menschlichen Zellen als Desoxyribonukleinsäure (DNA) im Zellkern vor. An der DNA wird aber nicht direkt ein Protein produziert, sondern die genetische Information wird zunächst in eine sogenannte messenger Ribonukleinsäure (mRNA) umgeschrieben (man spricht von Transkription). Die mRNA dient nun als Vorlage für die Proteinproduktion (Translation), ein Prozess, der an den Ribosomen einer Zelle ausgeführt wird. Bei Ribosomen handelt es sich um granuläre makromolekulare Komplexe, die aus Proteinen und ribosomalen Ribonukleinsäuren (rRNA) aufgebaut sind. Der Weg vom Gen auf der DNA bis hin zum fertigen Genprodukt, dem Eiweißmolekül, wird als Genexpression bezeichnet.



2 Epigenetische Mechanismen regulieren die Genexpression. Elektronenmikroskopische Aufnahme aktiver und inaktiver Kopien der für ribosomale RNA kodierenden Gene. Auf der fadenförmigen DNA befinden sich aktive Gene (schwarze Pfeile), die durch die gebildete RNA erkennbar sind. Die Lokalisation eines inaktiven Gens ist durch den roten Pfeil markiert. Die aktiven Gene sind durch aktivierende Nucleosomenpositionen und Histon-Acetylierung gekennzeichnet, die eine für die RNA-Synthese notwendige, zugängliche Struktur etablieren. Die geschlossenen inaktiven Gene haben ein lokalisiertes Nucleosom über den regulativen Regionen und sind durch methylierte DNA und methylierte Histone markiert.

verändert, sondern die Verpackungseigenschaften der DNA. Die verschiedenen Vorgänge, die diese Strukturveränderungen, die auch an die Tochterzellen weitergegeben werden, kontrollieren, fasst man heute unter dem Begriff „Epigenetik“ (vom griech. *ἔπι* = über) zusammen. Im Rahmen epigenetischer Veränderungen werden in erster Linie DNA und Verpackungsproteine modifiziert. Die DNA wird durch Methylierung an der Base Cytosin chemisch verändert, und die Verpackungsproteine können unter anderem durch Acetylierung, Phosphorylierung und Methylierung modifiziert werden. Solche Veränderungen der DNA und des Chromatins werden aufgrund definierter zellulärer Programme oder als Antwort auf äußere „Umwelt“-Einflüsse gesteuert. Initiiert werden diese Programme durch spezifisch DNA-bindende Proteine, die alle Prozesse auf der Ebene des DNA-Bauplans regulieren. Die regulierte Zugänglichkeit des Chromatins zusammen mit den DNA-bindenden Protei-

nen ermöglicht es, dass Zellen zur rechten Zeit am richtigen Ort ihre spezifischen Funktionen übernehmen. Mithilfe der epigenetischen Veränderungen, die als Kurz- oder Langzeitgedächtnis fungieren können, merkt sich jeder Genomabschnitt, ob er zum Ablesen bereit stehen soll oder nicht.

Verpackung der DNA im Zellkern

Zur Unterbringung der DNA im Zellkern muss die hohe negative Ladung der DNA neutralisiert und das relativ starre Molekül durch Spiralisierung gleichzeitig kompaktiert werden. Im Zellkern geschieht dies durch die Wicklung der DNA um molekulare Spulen, die aus positiv geladenen Proteinen, den Histonen, bestehen. Vier verschiedene Histone lagern sich zu einem oktameren Partikel zusammen, das so beschaffen ist, dass sich die DNA in etwa zwei engen Schleifen von 147 Basenpaaren (Bp) Länge darum wickeln kann [1A]. Der entstehende DNA-Proteinkomplex

wird als Nucleosom bezeichnet. Auf der Oberfläche des Histonoktamers ist die DNA stark verzerrt und nicht zugänglich für Proteine, die diese DNA Bereiche ansonsten erkennen würden. Aufgrund ihrer zentralen Bedeutung zählen die Histone zu den am höchsten konservierten Proteinen in eukaryotischen Zellen. So unterscheiden sich die Histonproteine H4 vom Menschen und der Erbse in nur zwei von 103 Aminosäure-Positionen. Dementsprechend funktionieren die Verpackungssysteme entfernt verwandter Organismen wie der Erbse und des Menschen in derselben Weise.

Die einzelnen Nucleosomen sind wie die Perlen auf einer Kette nebeneinander aufgereiht, wobei zwischen den Nucleosomen ein kurzer DNA-Abschnitt als Abstandhalter dient (engl. *linker*). Diese für spezifisch an DNA bindende Proteine vergleichsweise gut zugänglichen *linker* umfassen etwa 30 bis 50 Basenpaare. Letztendlich werden 80 % der humanen DNA in ca. 20 Millionen unzugängliche Nucleo-



somen verpackt, und 20 % des Genoms sind in den offeneren *linker*-Bereichen organisiert [1B].

Nach der Bildung des Nukleosoms sind weitere übergeordnete Verpackungsmaßnahmen notwendig, um die Fülle der Erbsubstanz im Zellkern unterzubringen. Eine Vielzahl weiterer Proteine ist daran beteiligt, die Nukleosomenkette in mehrfach übergeordnete Strukturen zu falten [1B]. Die genaue Organisationsform dieser Strukturen ist bislang nicht bekannt. Die Nukleosomenkette faltet oder spiralisiert sich in eine sogenannte 30 Nanometer (nm) Faser (Durchmesser der im Elektronenmikroskop sichtbaren Struktur). Diese wiederum organisiert sich in eine 100 nm Faser, die weitere Überstrukturen bildet. Deren DNA-Schleifen heften sich an das Gerüst (engl. *scaffold*) des im Lichtmikroskop sichtbaren Chromosoms kurz vor der Zellteilung.

Verpackung versus Verwaltung?

Die Organisation der DNA in diesen übergeordneten Chromatinstrukturen und deren Assoziation mit vielen Proteinen schützt das zerbrechliche DNA-Molekül und ermöglicht die organisierte Verpackung des zwei Meter langen DNA Fadens im Zellkern, der nur einen 10-millionsten Meter Durchmesser aufweist. Bei erfolgreicher Packung entsteht nun jedoch ein neues Dilemma. Die Erbinformation muss ja nicht nur gestaut, sondern gleichzeitig auch genutzt werden können. Jeder Lebensvorgang erfordert einen steten Rückgriff auf die im DNA-Bauplan niedergelegten Informationen. Dazu müssen die ausgewählten Gene von molekularen Maschinen gefunden und ausgelesen werden.

Hierbei bestimmen epigenetische Mechanismen die Aktivität von Genen, indem ein spezifisches Wechselspiel von DNA-Methylierung, Modifikationen der Histone und die Ausrichtung der Nukleosomen auf der DNA die Zugänglichkeit für Transkriptionsfaktoren und molekulare Maschinen bestimmen [2].

Unsere Arbeitsgruppen arbeiten an der Entschlüsselung epigenetischer Mechanis-

men, die die Aktivität von Genen regulieren. Es gibt eine Wechselbeziehung zwischen DNA-Methylierung, Histon-Modifikationen und Nukleosomen-Positionierungen, die von sogenannten Histon- und DNA-modifizierenden Enzymen und Nukleosomen *remodeling* Enzymen bewirkt wird. Einer von uns (Gernot Längst) untersucht den Mechanismus der *remodeling*-Enzyme und konnte zeigen, dass diese Enzyme die DNA-Sequenz auslesen, um Nukleosomen gezielt zu positionieren (Rippe et al., 2007). Dem genetischen Code übergeordnet, welcher die DNA-Sequenz mit der Proteinsequenz verknüpft, scheint es einen weiteren Code zu geben, der die DNA-Sequenz mit der Position der Nukleosomen verbindet (Erdel et al., 2010). Da eine menschliche Zelle hunderte verschiedene Chromatin *remodeling* Komplexe enthält, und jede dieser Maschinen den vorliegenden Code unterschiedlich interpretiert, könnten diese ein regulatorisches Netzwerk bilden. Innerhalb dieses Netzwerks bestimmen die lokalen Maschinen die Positionen der Verpackungsproteine und somit die Muster des zellulären Gen-Programms. Diese Befunde erklären, warum die Chromatin *remodeling* Komplexe für DNA-abhängige Prozesse essenziell sind und Mutationen dieser Maschinen häufig mit der Entartung von Zellen assoziiert sind. Dieses Netzwerk steht in wechselseitiger Abhängigkeit zu weiteren epigenetischen Modifikationen wie der DNA-Methylierung, mit deren Biologie sich der zweite von uns (Michael Rehli) beschäftigt.

DNA-Methylierung wirkt als Signal für die Rekrutierung von Repressorkomplexen oder verhindert sterisch die Bindung von Transkriptionsfaktoren an die DNA, was beides zur Abschaltung von entsprechend markierten Genabschnitten führt. Diese chemische Modifikation der DNA, die an Basenabfolge und Proteinkodierung nichts verändert, wird bei der Zellteilung an Tochterzellen vererbt und fungiert damit als eine Art Gedächtnis für zelluläre Zustände. DNA-Methylierungsmuster verändern sich

im Rahmen von normalen Differenzierungsprozessen (z.B. von der Stammzelle zur spezialisierten Zelle), aber auch bei der Entstehung von krankhaften Zuständen (z.B. von der normalen Zelle hin zur Krebszelle). Die Arbeitsgruppe von Michael Rehli konnte zeigen, dass sowohl gesunde, als auch krankhafte Veränderungen der DNA-Methylierung häufig eine genetische Grundlage haben. Unsere Arbeiten deuten auf eine wichtige Rolle dieser epigenetischen Modifikation bei der Ruhigstellung regulatorischer Regionen, die nur in bestimmten Zelltypen aktiv werden dürfen (Schmidl et al., 2009). Dabei wird die Dynamik lokaler DNA-Methylierungsmuster durch die Basenabfolge in betroffenen Regionen sowie durch ihre Interpretation durch DNA-Sequenz-abhängige Transkriptionsfaktoren kontrolliert (Gebhard et al., 2010). Letztere rekrutieren unter anderem auch die Maschinen, die für die Etablierung stabiler Verpackungszustände nötig sind.

Abschlussbemerkungen

Chromatin *remodeling* Komplexe regulieren alle DNA-abhängigen Prozesse und viele dieser Maschinen wirken an definierten DNA-Abschnitten, Genen oder sind an bestimmten Prozessen beteiligt, wozu unter anderem Replikation, Transkription und DNA-Methylierung gehören. Die Kenntnis von den Wirkorten dieser Komplexe, der Art und Weise, wie sie den genomischen oder epigenomischen Code interpretieren und ihrem Wechselspiel mit Transkriptionsfaktoren und epigenetischen Modifikationen wird Aufschlüsse über die Mechanismen der epigenetischen Programmierung und der Entwicklung vielzelliger Organismen geben. Es sind bereits vielversprechende Substanzen (z.B. Demethylierungsagentien, Histondeacetylaseinhibitoren) für die Tumorthherapie zugelassen, die epigenetische Signale modifizieren. Inhibitoren gegen Chromatin *remodeling* Maschinen bieten sich als Ziele für die Entwicklung neuer epigenetischer Therapeutika geradezu an.

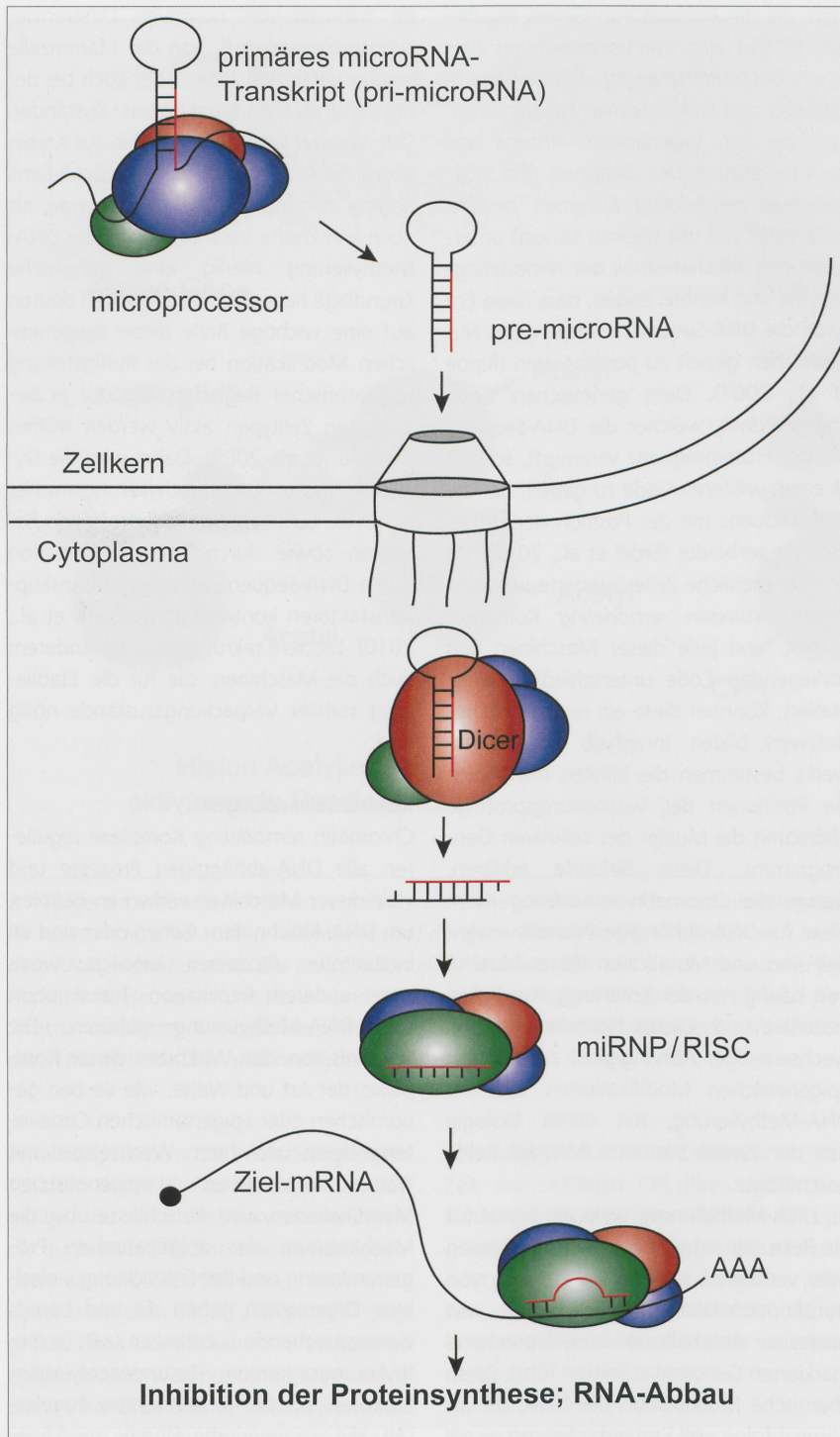
MicroRNAs – neuartige zelluläre Regulatoren mit großer Bedeutung für die Melanomforschung

Anja Bosserhoff, Gunter Meister

Nach der Entschlüsselung des humanen Genoms wurde schnell klar, dass nur ein sehr kleiner Teil der menschlichen genetischen

Information für Proteine kodiert. Der weitaus größere Teil des humanen Genoms (man schätzt mehr als 90 %) ist nicht-ko-

dierender Natur, und man ging zunächst davon aus, dass es sich dabei um evolutionäre „Müll-DNA“ handelt. Heute wissen wir



3 Herstellung und Prozessierung von microRNAs. MicroRNAs werden zunächst als primäre miRNA-Transkripte hergestellt (pri-microRNAs) und bereits im Zellkern durch den ‚microprocessor‘-Enzymkomplex verkürzt (prozessiert). Es entstehen dadurch sogenannte pre-miRNAs, die in das Cytoplasma der Zelle transportiert werden. Dort prozessiert das Enzym Dicer die pre-miRNAs zu reifen miRNA-Molekülen. Die einzelsträngige miRNA wird dabei in einen Proteinkomplex eingebaute (miRNP oder RISC). Die miRNA interagiert mit komplementären Bereichen von Ziel-mRNAs (siehe Kasten) und bewirkt, dass die Genexpression inhibiert wird.

allerdings, dass fast die gesamte nicht-kodierende DNA ständig in nicht-kodierende RNA umgeschrieben (transkribiert) wird. Solche RNA-Moleküle sind für die korrekte

Funktion von Säugerzellen von entscheidender Bedeutung. Durch intensive Forschung der letzten Jahre konnte gezeigt werden, dass nicht-kodierende RNAs auch

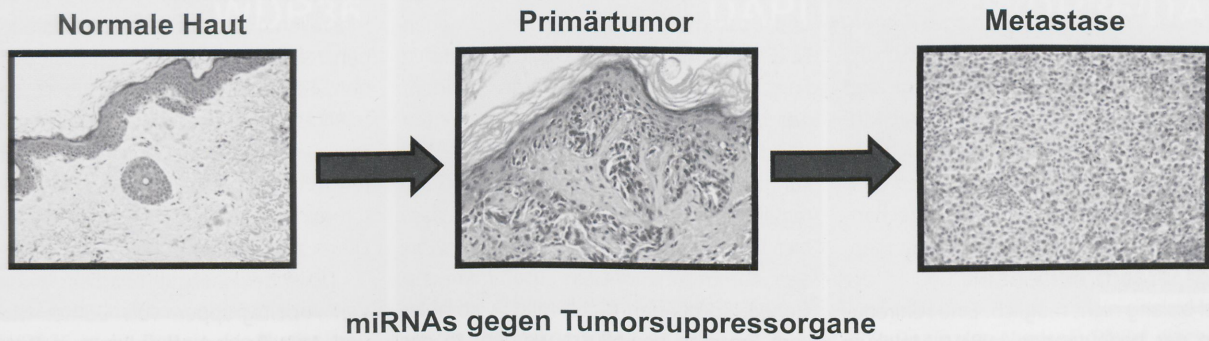
bei der Entstehung und Ausprägung von verschiedenen Krankheiten wie neurodegenerativ bedingten Funktionsstörungen, aber auch Krebs eine Rolle spielen. Die Erforschung solcher RNAs steht allerdings noch am Anfang, und neue Erkenntnisse aus der RNA-Biologie werden sicherlich in den nächsten Jahren auch weitere Impulse für die Therapie von Tumoren liefern.

Unsere Arbeiten an der Universität Regensburg befassen sich mit der Funktion von nicht-kodierenden RNAs, die durch ihre spezifische Länge gekennzeichnet sind und daher als microRNAs (miRNAs) bezeichnet werden.

miRNAs inhibieren die Expression spezifischer Ziel-Gene

Ähnlich wie Eiweißmoleküle, werden auch miRNAs von spezifischen Genen des humanen Genoms endogen produziert. Dabei werden miRNA-Gene zunächst als miRNA-Transkripte im Zellkern generiert. Dort werden diese primären miRNAs (auch als pri-miRNAs bekannt) durch verschiedene Enzyme verkürzt, und es entstehen sogenannte pre-miRNAs, die durch eine ausgeprägte Haarnadelstruktur (engl. *hairpin*) gekennzeichnet sind. Der dafür verantwortliche Enzymkomplex wird als Microprocessor bezeichnet. Ein zellulärer Transportweg verfrachtet pre-miRNAs vom Zellkern ins Cytoplasma, wo das Enzym Dicer die pre-miRNAs zu 20–23 Nukleotide langen RNAs spaltet. Nach weiteren Prozessierungsschritten wird schließlich reife miRNA in spezifische Protein-Komplexe, sogenannte miRNPs (auch als *RNA-induced silencing complex* oder RISC bekannt), eingebaut [3].

Wie funktionieren solche kleinen miRNA-Moleküle in einer menschlichen Zelle? Ähnlich wie DNA, die in der Regel aus zwei gegenläufigen und zueinander komplementären DNA-Molekülen aufgebaut ist, können auch RNA-Moleküle Basenpaarungen mit anderen komplementären RNA-Molekülen eingehen. Reife miRNAs sind zunächst einzelsträngiger Natur und können daher mit komplementären RNAs eine Wechselwirkung eingehen. Tierische miRNAs zum Beispiel interagieren hauptsächlich mit komplementären Bereichen auf definierten Bereichen von mRNAs (siehe Kasten). Die Interaktion von miRNAs mit spezifischen mRNAs (Ziel-mRNAs) führt dazu, dass die mRNA entweder zerstört wird oder die Produktion des Eiweißmoleküls (ein Prozess, der als Translation bezeichnet wird), für das die mRNA kodiert, unterbrochen wird (Meister und Tuschl, 2004) [3].



miRNAs als Regulatoren von Onkogenen

4 Die Rolle einer Fehlregulation der bedeutenden miRNA-Moleküle bei der Entstehung des malignen Melanoms. Im Verlauf der Melanomentstehung und Tumorprogression hin zur Metastasierung werden miRNAs vermehrt produziert, die Tumorsuppressorgene inhibieren. Ferner kommt es zur verminderten Expression von miRNAs, die in normalen Zellen die Expression von Onkogenen streng kontrollieren.

Computergestützte Analysen haben gezeigt, dass einzelne miRNAs eine Vielzahl von Ziel-RNAs gleichzeitig regulieren können. Zahlreiche Studien haben weiterhin ergeben, dass miRNAs die Expression ihrer Ziel-mRNAs nicht vollständig blockieren. Vielmehr unterdrücken viele miRNAs die Proteinproduktion nur um maximal 60–70%. Man geht daher davon aus, dass viele miRNAs die Expression ihrer Ziel-mRNAs nur feinregulieren und somit die genau richtige Menge der entsprechenden Proteine für die Zelle bereitstellen (Peters und Meister, 2007).

Bereits kurz nach der Entdeckung humaner miRNAs wurde berichtet, dass in Lymphomen wie der chronischen, lymphozytischen B-Zell-Leukämie (B-CLL), miRNA-Gene komplett fehlen oder deren Expression stark reduziert ist. Bei 68% der untersuchten Patienten wurde eine Deletion des Genlokus 13q14 gefunden. Genau in diesem Bereich befinden sich die Gene für miR-15 und miR-16, und in der Tat war die Menge an miR-15- und miR-16-RNAs in B-CLL-Patienten stark herabgesetzt. Ausgehend von diesen initialen Befunden wurde eine Vielzahl von weiteren Studien an verschiedenen Krebsarten durchgeführt. Dabei wurde gefunden, dass in verschiedenen Lymphomarten miR-155 sowie miRNAs des miR-17–92 *clusters* überrepräsentiert waren. Zudem scheint bei bestimmten Formen von Lungenkrebs die Expression der miRNA let-7 stark reduziert zu sein. Heute wissen wir, dass miRNAs an der Entstehung von einer Vielzahl von Krebsarten maßgeblich beteiligt sind.

miRNAs im schwarzen Hautkrebs

Das maligne Melanom („schwarzer Hautkrebs“) ist ein bösartiger Tumor, der von den Pigmentzellen unserer Haut, den Melanozyten, ausgeht. Am häufigsten tritt dieser Tumor daher in der Haut auf, seltener kommt er auch im Auge, an den Hirnhäuten und an Schleimhäuten vor. Die Häufigkeit der Melanomentstehung nimmt in der Bevölkerung weltweit zu. In Mitteleuropa beträgt die Inzidenz derzeit 10–12 Fälle pro 100.000 Einwohner und Jahr, die höchsten Zahlen wurden mit 50–60 Fällen pro 100.000 Einwohner und Jahr in Australien ermittelt. Die Entstehung von Melanomen wird mit UV-Strahlung in Zusammenhang gebracht. Besonders eine zu starke Belastung in der Kindheit, wie z.B. starke Sonnenbrände werden als Ursache gesehen. Hier ist es nur konsequent, dass die Benutzung von Solarien für Kinder und Jugendliche in Deutschland 2009 verboten wurde (<http://www.krebsinformationsdienst.de/themen/risiken/uv-strahlung.php>).

Das durchschnittliche Erkrankungsalter liegt beim malignen Melanom bei ungefähr 50 Jahren. Die Häufigkeit der Tumorerkrankung steigt ab dem 20. Lebensjahr stark an und bleibt zwischen dem 30. und 65. Lebensjahr dann etwa konstant. Im Alter zwischen 20 und 30 Jahren ist die Sterblichkeit von Frauen am malignen Melanom höher als an Brustkrebs.

Bisherige Therapien für primäre maligne Melanome, die eine Tumordicke ≤ 1 mm („vertikale Tumordicke“) besitzen, liegen in der operativen Entfernung (Exzi-

sion) mit einem in Leitlinien festgelegten Sicherheitsabstand um den Tumor. Die Exzision führt zu einer 5-Jahres-Überlebensrate von über 90 %. Beträgt die Tumordicke mehr als 1 mm, so wird in Deutschland des Weiteren eine Analyse der in der Nähe des Tumors liegenden Lymphknoten durchgeführt. Diese Untersuchung kann für die Entscheidung einer vorsorglichen (adjuvanten) systemischen Therapie herangezogen werden. Sind bereits Lymphknoten von Tumorzellen befallen, sollten die nahegelegenen Lymphknoten vollständig entfernt werden. Als adjuvante Tumorthherapie dient die Verabreichung von hohen Dosen Interferon- α zusätzlich zur Exzision des Primärtumors, um das Metastasierungsrisiko zu senken. Kommt es zur Metastasierung des malignen Melanoms, sinkt die 5-Jahres-Überlebensrate unter 2 %. Bei metastasierten Melanomen kommt neben der Strahlentherapie häufig die Chemotherapie oder Chemoimmuntherapie zum Einsatz. Dacarbazin (DTIC) wird als häufigstes Chemotherapeutikum verwendet, obwohl die Ansprechrate bei nur ca. 10% liegt. Alle Erfahrungen und Studien belegen, dass die bisherigen Therapien, unabhängig davon, ob ein oder mehrere Medikamente verwendet wurden, schlechte Ansprechraten aufweisen und auch die Überlebensrate nicht signifikant verbessern.

Nur das genaue Verständnis der ursächlichen Veränderungen in Tumorzellen, die für die Veränderung von normalen Zellen hin zu aggressiv wachsenden und im Körper streuenden Zellen verantwortlich

sind, wird letztendlich zu gezielten Ansätzen in der Therapie von Tumoren führen. Nach dem wissenschaftlichen Entschlüsseln einiger deregulierter Signalwege und Tumor-relevanter Gene mitsamt ihrer Mutationen, wie z.B. B-RAF, zeigen sich bereits jetzt erste Erfolge einer *targeted* (zielgerichteten) Therapie als vielversprechender Weg zur Behandlung von Melanomen, jedoch ist auch hier eine Heilung in der Regel bislang nicht möglich. Eine Fehlregulation der bedeutenden miRNA-Moleküle spielt auch in der Entstehung des malignen Melanoms eine entscheidende Rolle [4]. Bislang sind bereits einige bestimmte miRNAs mit der Entartung von normalen Pigmentzellen bzw. mit dem Fortschreiten der Erkrankung hin zur Metastasierung in Zu-

sammenhang gebracht worden (Müller und Bosserhoff, 2009). In diesem neuen Feld muss nun zunächst durch intensive Forschungsarbeiten verstanden werden, wie bestimmte miRNAs das Fortschreiten der Erkrankung beeinflussen. Es ist bekannt, dass eine miRNA viele weitere Gene regulieren kann. Man geht davon aus, dass hier Gene gemeinschaftlich reguliert werden, die im funktionellen Zusammenhang stehen. So können durch miRNA komplexere Prozesse beeinflusst werden. In der Vergangenheit konnte bereits gezeigt werden, dass die miRNA let-7 sowohl Gene reguliert, die Zellwachstum steuern, als auch Gene, die die Wanderung von Zellen und damit letztendlich die Ausbreitung von Tumorzellen im Körper unterstützen

(Müller und Bosserhoff, 2008). In vielen Tumorzellen sind aufgrund von Fehlsteuerungen verschiedene miRNAs zu stark vorhanden. Es ist daher wünschenswert, solche miRNAs durch geeignete Hemmstoffe zu reduzieren. Sequenz-spezifische Inhibitoren von überrepräsentierten miRNAs könnten daher in naher Zukunft neue Möglichkeiten zur Bekämpfung von Krebs liefern.

In enger Zusammenarbeit zwischen den Arbeitsgruppen von Gunter Meister und Anja Bosserhoff sollen nun Prozesse der miRNA-Regulation und ihrer Auswirkung auf Tumorzellen untersucht werden. Durch die sich ergänzenden Expertisen der beiden Arbeitsgruppen werden durch diese Zusammenarbeit die Untersuchungen stark beschleunigt und vorangetrieben.

Molekulare Ursachen von Sehstörung und Erblindung

Ernst Tamm, Bernhard Weber

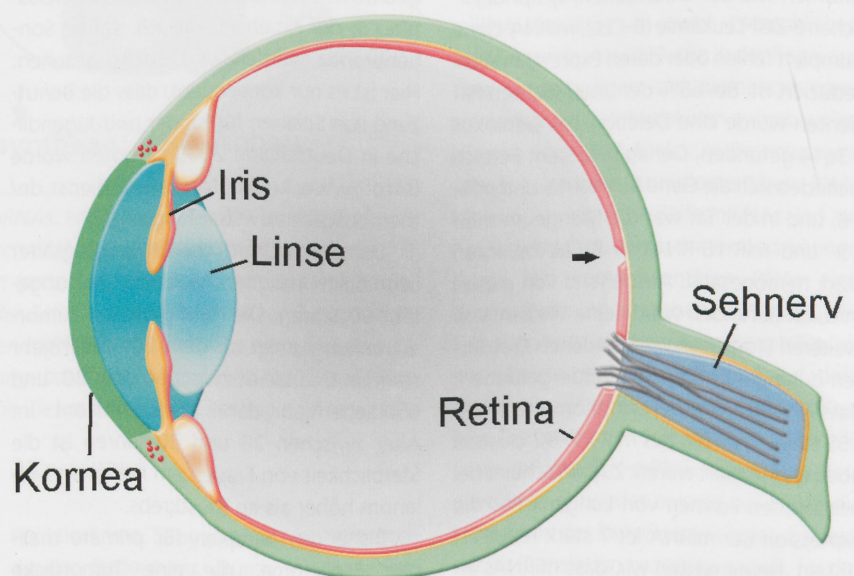
Wesentliche Eindrücke aus unserer Umwelt werden über das Auge, unser wichtigstes Sinnesorgan, aufgenommen. Daher betrifft der vollständige oder teilweise Verlust der Sehfunktion viele Bereiche und Aktivitäten des täglichen Lebens. Für den Betroffenen bedeuten Sehbehinderung und Erblindung eine massive Einschränkung der Selbständigkeit, der Lebensplanung und einen hochgradigen Verlust an Lebensqualität. In Deutschland erblinden jedes Jahr etwa 17.000 Patienten vollständig, während zusätzlich nahezu 50.000 Patienten eine beträchtliche Verminderung der Sehkraft erleiden, die unter anderem auch zu Einschränkungen der Erwerbsfähigkeit führt. Die häufigsten Krankheitsbilder gehören zur Gruppe der genetisch komplexen Erkrankungen wie der altersabhängigen Makuladegeneration (AMD) und dem Glaukom. Da diese Erkrankungen mit zunehmendem Alter stark gehäuft auftreten, ist aufgrund einer weiter steigenden Lebenserwartung davon auszugehen, dass in den nächsten Jahren die Zahl der Sehbehinderten und Blinden in Deutschland dramatisch zunehmen wird. Eine grundlagenbetonte Erforschung der molekularen Ursachen eines Sehfunktionsverlustes ist daher dringend erforderlich, um mittel- bis langfristig geeignete kausale Therapieansätze zu erarbeiten. Dieser Aufgabe widmet sich die Forschergruppe 1075 „Regulation und Pathologie von homöostatischen Prozessen der visuellen Funktion“ an der Universität Regensburg, in der in einem

fachlich übergreifenden Ansatz Wissenschaftler aus unterschiedlichen Disziplinen wie Anatomie, Humangenetik, Augenheilkunde, Physiologie und Psychologie eng zusammenarbeiten. Dabei konnten in den letzten Jahren entscheidende Fortschritte erzielt werden, die wesentliche Einblicke in die Entstehung der AMD, ein Krankheitsbild mit dem sich hauptsächlich die Arbeitsgruppe von Bernhard Weber beschäftigt (siehe hierzu auch Friedrich et al., *Blick in die Wissenschaft* 2010), aber auch des Glaukoms, ein Schwerpunkt der Arbeitsgruppe

von Ernst Tamm, ermöglicht haben. Aspekte dieser Forschung sollen hier nun am Beispiel der Grundlagenforschung zur Pathogenese des Glaukoms vorgestellt werden.

Das Glaukom

Beim Glaukom handelt es sich um eine chronische, degenerative Erkrankung, bei der es zu einem progredienten Verlust der Nervenfasern bzw. Axone im Sehnerv kommt. Diese Axone sind Zellfortsätze von retinalen Nervenzellen, den retinalen Ganglienzellen, welche die Sehinformation vom



5 Schematische Darstellung des menschlichen Auges (Zeichnung Antje Zenker)



6 WDR36 ist ein Protein des Nucleolus. Fluoreszenzmikroskopische Darstellung von WDR36 (grün) in den Nucleoli (Pfeile) eines Zellkerns, der mit dem Farbstoff DAPI (blau) angefärbt wurde

Auge zum Gehirn vermitteln. Ort des Schadens ist der Sehnervenkopf, der Bereich am hinteren Pol des Auges, wo der Sehnerv das Auge verlässt [5]. Zahlreiche randomisierte, prospektive klinische Studien, die koordiniert in vielen Augenkliniken weltweit durchgeführt wurden, haben übereinstimmend gezeigt, dass der Flüssigkeitsdruck im Auge der größte Risikofaktor für die Entstehung des Sehnervenschadens beim Glaukom ist. Unter normalen Bedingungen ist der Augeninnendruck höher als in den umgebenden Geweben, um Formveränderungen des Auges bei seinen Bewegungen zu vermeiden, da diese zu einer Verschlechterung der Abbildungsqualität führen würden. Bei der häufigsten Form des Glaukoms, dem primären Offenwinkelglaukom, ist der Augeninnendruck in der Regel zu hoch. Die Gründe, warum ein zu hoher Augeninnendruck zu einem Sehnervenschaden beim Glaukom führt, sind nicht abschließend geklärt. Vermutlich spielen Stoffwechselveränderungen der Axone des Sehnervs eine entscheidende Rolle, da diese am Sehnervenkopf durch einen zu hohen Augeninnendruck mechanisch beeinträchtigt werden. Der axonale Schaden führt dann zum Zelltod der retinalen Ganglienzelle.

Genetische Faktoren des Glaukoms

Die Empfindlichkeit für den Zelltod von retinalen Ganglienzellen beim Glaukom hängt offenbar von der genetischen Ausstattung des individuellen Patienten ab, da manche einen Schaden erleiden bei einem Augeninnendruck im statistisch normalen Bereich (Normaldruckglaukom), andere wiederum auch bei einem deutlich erhöhten Augeninnendruck (okulärer Hypertension) in ihrer Sehkraft nicht beeinträchtigt sind. Bislang wurden vier Gene identifiziert, die bei Veränderungen ihrer DNA-Sequenz zu einem Glaukom prädisponieren. Bei den von diesen Genen kodierten Proteinen handelt es

sich um Myocilin, Optineurin, WD repeat domain 36-Protein (WDR36) und Neurotrophin-4. Das Verständnis der biochemischen Funktion dieser Proteine ist wichtig, um Einblicke in die molekularen Mechanismen zu erhalten, die zum Untergang von retinalen Ganglienzellen beim Glaukom führen. Hierbei ist es Forschern an der Universität Regensburg erstmals gelungen, die Funktion von WDR36 weitgehend aufzuklären (Galtenberger et al. 2011).

Die molekulare Funktion von WDR36

Das charakteristische Strukturelement von WDR36 sind multiple Strukturmodule (WD40 repeats), die aus etwa 40 Aminosäuren bestehen und mit Tryptophan und Aspartat enden, die gemeinhin mit den Buchstaben W und D abgekürzt werden. WD40 repeat-Proteine bilden eine große Familie, deren Mitglieder an zahlreichen zellulären Prozessen wie Zellteilung oder Signalweiterleitung beteiligt sind. Ihre gemeinsame Funktion ist es offenbar als Gerüst zum Aufbau von Multiproteinkomplexen zu dienen, da die WD40 Strukturmodule die Interaktion von Proteinen erleichtern bzw. erst möglich machen. Um einen Hinweis auf die spezifische Funktion von WDR36 zu erhalten, untersuchten wir zunächst seine zelluläre Lokalisation mit Hilfe von Antikörpern, welche mit einem fluoreszierenden Farbmolekül markiert sind und spezifisch an WDR36 binden. Dabei beobachteten wir eine spezifische Färbung in einer Struktur des Zellkerns, dem Kernkörperchen oder Nucleolus [6]. Im Nucleolus werden die Untereinheiten von Ribosomen aus ribosomalen Proteinen und ribosomaler RNA synthetisiert. Weiterhin fiel auf, dass die Struktur von WDR36 sehr ähnlich ist zu der von Utp21, einem Protein der Bäckerhefe (*Saccharomyces cerevisiae*). Von Utp21 war bereits gezeigt worden, dass es Teil des *small subunit processome* ist, einem ma-

kromolekularen Komplex aus mehr als 40 Proteinen, der im Nucleolus für die Prozessierung einer bestimmten rRNA Spezies verantwortlich ist, die sich am Aufbau der kleinen Untereinheit von Ribosomen beteiligt.

Wir stellten daraufhin die Hypothese auf, dass WDR36 das zu Utp21 homologe Protein beim Säuger ist. Um dieser Hypothese nachzugehen, generierten wir gentechnisch veränderte Mäuse, denen eine oder beide Kopien des WDR36-Gens fehlen. Zudem stellten wir Zelllinien her, in denen die Expression von WDR36 stark vermindert war. Wir beobachteten nun, dass bei Fehlen beider Kopien von WDR36 die embryonale Entwicklung bereits in einer frühen Phase zum Stillstand kam. Bei den Zelllinien stellten wir fest, dass eine Reduktion von WDR36 zum Zelltod führte. Beide Beobachtungen deuteten direkt auf eine lebenswichtige Funktion von WDR36 hin, wie sie zweifelsohne die Biosynthese von Ribosomen darstellt. Schließlich konnten wir nachweisen, dass die Reduktion von WDR36 in Zellen zu einer deutlichen Beeinträchtigung der Prozessierung der rRNA Spezies führte, die sich in der kleinen Untereinheit von Ribosomen befindet – ein Befund, der unsere anfängliche Hypothese bestätigte.

Die Rolle von WDR36 beim Glaukom

Normalerweise verfügt eine menschliche Zelle über zwei Kopien des gleichen Gens, die jeweils von Vater und Mutter stammen. Während der Verlust beider WDR36 Kopien offenbar letal ist, prädisponiert der Verlust einer Kopie zum Glaukom. Wir vermuten, dass das Fehlen einer Kopie zu einer chronischen Beeinträchtigung der ribosomalen Biosynthese in retinalen Ganglienzellen führt. Kommt es nun zu einer zusätzlichen Belastung, z.B. hervorgerufen durch einen erhöhten Augeninnendruck, begünstigt diese Achillesferse den Zelltod beim Glaukom.

Die Niere: Die Erforschung dieses komplexen Organs fordert wissenschaftliche Kooperationen

Frank Schweda, Matthias Mack

Der menschliche Körper besteht zu etwa zwei Dritteln aus Wasser. Die Konstanz dieses großen Wasserbestands und der darin gelösten Substanzen, die eine Voraussetzung für die ordnungsgemäße Funktion der Organe und letztlich für das Überleben ist, wird über das Zusammenspiel von Flüssigkeitszufuhr und Flüssigkeitsausscheidung reguliert. Neben dem Flüssigkeitsverlust über den Schweiß und die Atemluft spielen dabei die Nieren die zentrale Rolle, da sie eine Zunahme des Flüssigkeitsbestands über eine vermehrte Urinproduktion ausgleichen. Dieser, bei oberflächlicher Betrachtung an ein Überlaufventil erinnernden Funktion der Niere liegen tatsächlich sehr komplexe Regelprozesse zugrunde, die zum großen Teil durch im Blut zirkulierende Hormone kontrolliert werden. Die Komplexität der Kontrolle der Nierenfunktion ergibt sich aus den weiteren Aufgaben, die eine gesunde Niere erfüllen muss. Neben der Kontrolle des Wasserbestandes

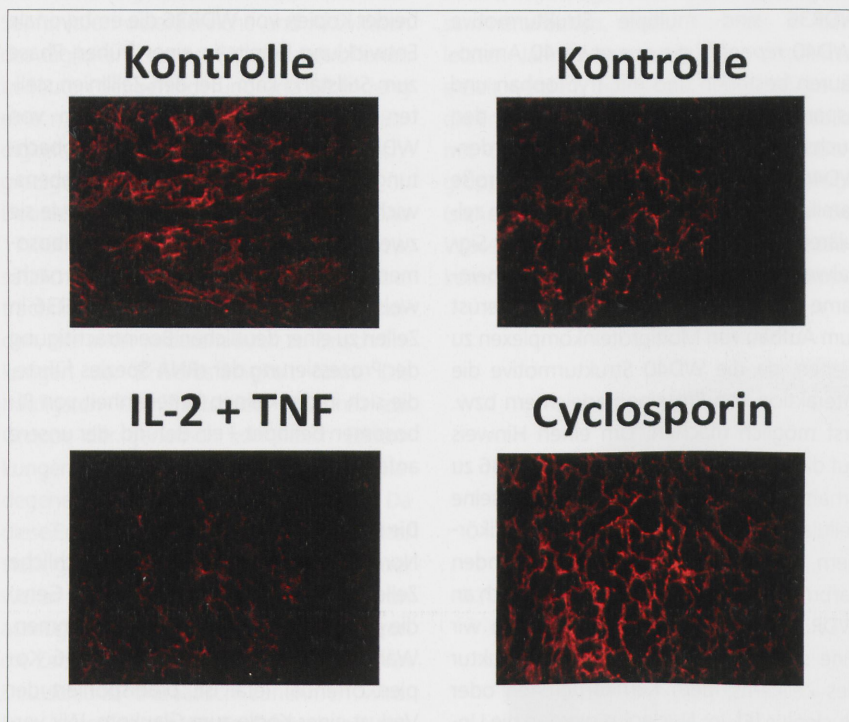
werden durch die Nieren exogene Giftstoffe und Stoffwechselendprodukte, die für den Körper keinen Nutzen mehr haben, über den Urin ausgeschieden (sogenannte „harnpflichtige Substanzen“). Andererseits müssen die Nieren gewährleisten, dass dem Körper mit dem Urin keine wertvollen Stoffe, wie z.B. Glukose und Aminosäuren verloren gehen. Wenn man noch bedenkt, dass auch die Konstanthaltung der Konzentration von Elektrolyten wie z.B. Natrium, Chlorid, Kalium und Calcium von großer Bedeutung für die Körperfunktion ist und dass die Aufnahme dieser Salze durch die Nahrung stark variiert, wird deutlich, dass die Nieren keine einfachen Filter sein können, sondern die Zusammensetzung des Urins eng reguliert und an den Bedarf angepasst werden muss.

Eine menschliche Niere enthält etwa 1 Million Nephrone, die die kleinste Funktionseinheit der Niere darstellen. Jedes Nephron besteht aus einem Nierenkörper-

chen (Glomerulus) und dem sich daran anschließenden Tubulusapparat. Das Nierenkörperchen dient als Filter, in dem etwa 20% des durchfließenden Blutplasmas als sogenanntes Primärfiltrat in den Tubulus abfiltriert werden. Pro Tag werden in beiden Nieren 180 Liter dieses Primärharns gebildet. Da der Glomerulusfilter sehr durchlässig für niedermolekulare Substanzen wie Glukose, Aminosäuren und die oben genannten Elektrolyte ist, enthält der Primärharn eine hohe Konzentration dieser Stoffe. Die Aufgabe des Tubulusapparates besteht nun darin, den Urin auf das Endvolumen von ca. 1,5 Liter pro Tag zu konzentrieren, dabei alle vom Körper benötigten Substanzen aus dem Primärharn in das Blut zurückzuholen und die harnpflichtigen Substanzen im Urin zu belassen.

Neben der Funktion als Ausscheidungsorgan bilden die Nieren Hormone, welche die Bildung der roten Blutkörperchen im Knochenmark kontrollieren (Erythropoietin) und in die Regulation des Blutdrucks involviert sind (Renin). Darüber hinaus wird in der Niere das Vitamin D3 in seine aktive Form überführt.

Aus dieser kursorischen Aufstellung der Funktionen der Niere wird deutlich, dass es sich um ein äußerst komplexes Organ handelt, dessen Funktion sich an stark schwankende Anforderungen anpassen muss. Da eine Fehlfunktion zudem erhebliche Auswirkungen auf den gesamten Organismus hat, z.B. ist die Niere ein zentrales Organ der Blutdruckkontrolle, macht die Erforschung sowohl der Regulation der Nierenfunktion als auch der Entstehung von Nierenerkrankungen und deren Auswirkungen das Zusammenspiel mehrerer wissenschaftlicher Disziplinen notwendig. Im Regensburger Sonderforschungsbereich 699 (Strukturelle, physiologische und molekulare Grundlagen der Nierenfunktion, www-sfb699.uni-regensburg.de) haben sich daher Wissenschaftler der Vorklinik (Anatomie und Physiologie), der Pharmakologie und der Medizinischen Fakultät zusammengeschlossen, um unter Ausnutzung eines breiten Methodenspektrums und breiter wissenschaftlicher Kompetenz („von der Zelle zum Patienten“) einige der zahlreichen offenen Fragen zur Kontrolle der normalen und gestörten Nierenfunktion zu beantworten.



7 Fluoreszenzmikroskopische Darstellung der Ablagerung von Bindegewebe (Kollagen I, rot) in den Nieren von mit IL-2/TNF bzw. mit CyclosporinA-behandelten Tieren im Vergleich zu unbehandelten Kontrollen. Die Gabe der Entzündungsbotenstoffe (Zytokine) IL-2 und TNF führte zu einer deutlichen Reduktion der Kollagenablagerungen. Wurde die Bildung der Zytokine durch das Immunsuppressivum CyclosporinA, das häufig zur Vermeidung von Transplantatabstoßungen verabreicht wird, gehemmt, war sowohl die Zahl der Kollagen-bildenden Fibrozyten, als auch die Kollagenablagerung in der Niere (rote Färbung) deutlich erhöht.



Das chronische Nierenversagen als Volkskrankheit

Etwa 10% der Bevölkerung sind von einem chronischen Nierenversagen, einem meist langsam progredienten Verlust der Nierenfunktion betroffen. Aufgrund der unzureichenden Ausscheidung harnpflichtiger Substanzen und Wasser sind Patienten im Terminalstadium der Niereninsuffizienz auf eine Nierenersatztherapie in Form einer Dialyse oder Nierentransplantation angewiesen. Die häufigsten Ursachen eines chronischen Nierenversagens sind die Zuckerkrankheit (*Diabetes mellitus*), hoher Blutdruck und chronisch entzündliche Nierenerkrankungen (Glomerulonephritiden). Da das Nierenversagen in frühen Stadien in der Regel keine auffälligen Symptome verursacht, gehen die Betroffenen meist erst in fortgeschrittenen, irreversiblen Stadien zum Arzt.

Im Rahmen vieler Nierenerkrankungen, die zum chronischen Nierenversagen führen, kommt es mit fortschreitender Erkrankung zu einem bindegewebigen Umbau des Nierengewebes, zur Nierenfibrose. Ursächlich für die Nierenfibrose ist eine übermäßige Ablagerung sogenannter extrazellulärer Matrixproteine, v.a. dem Protein Kollagen Typ I, im Nierengewebe, also zwischen den Nephronen. Es ist leicht verständlich, dass durch derartige Ablagerungen die Nierenstruktur erheblich verändert und eine normale Nierenfunktion unmöglich gemacht wird. Auch in transplantierten Nieren kann es zur Nierenfibrose kommen, die zu einem Funktionsverlust führt und die somit die Überlebenszeit des Transplantats begrenzt. Dabei wird das Risiko einer Transplantatfibrose durch Episoden von Transplantatabstoßung und Einnahme von Calcineurin-Inhibitoren (z.B. CyclosporinA), einer Klasse von immunsuppressiven Medikamenten, erhöht. Bedauerlicherweise sind die Nierenfibrose und der damit verbundene Verlust der Nierenfunktion irreversibel. Ein besseres Verständnis der molekularen Mechanismen, die die Nierenfibrose auslösen und kontrollieren, könnte daher neue Wege in der Therapie des chronischen Nierenversagens und der Behandlung nierentransplantierter Patienten eröffnen.

Immunzellen sind wesentlich an der Ausbildung einer Nierenfibrose beteiligt

In der Niere besitzen verschiedene Zelltypen die Fähigkeit, extrazelluläre Matrixproteine, wie das Kollagen Typ I, zu bilden. Es sind dies vor allem die klassischen Bindegewebszellen, die Fibroblasten. Darüber hin-



Prof. Dr. **Anja Bosserhoff** studierte Biologie an der Universität Bielefeld und promovierte an der Universität Regensburg. Anschließend habilitierte sie im Fach „Allgemeine und molekulare Zellpathologie“ an der RWTH Aachen. Seit 2002 ist Anja Bosserhoff Professorin für Molekulare Pathologie an der Universität Regensburg.

Forschungsschwerpunkte: Tumorentstehung und -progression, Zellmigration und Metastasierung, transkriptionelle und posttranskriptionelle Regulation, zelluläre Differenzierung, Molekulare Pathologie.



Prof. Dr. **Gernot Längst** studierte Biologie an der Technischen Universität Darmstadt und promovierte am Deutschen Krebsforschungszentrum in Heidelberg. Er arbeitete danach als Postdoktorand am Europäischen Institut für Molekularbiologie (EMBL) im Labor von Peter Becker. Im Adolf Butendandt Institut der LMU München leitete Gernot Längst eine Arbeitsgruppe, bis er im Jahr 2006 einen Ruf für das Fach Biochemie an die Universität Regensburg erhielt.

Forschungsschwerpunkte: Chromatindynamik und Genregulation.



Prof. Dr. **Matthias Mack** studierte Humanmedizin an der Ludwig-Maximilians Universität in München, wo er auch promovierte und seine klinische Ausbildung in Innerer Medizin und Nephrologie absolvierte. Seit 2004 ist er als Professor für Innere Medizin und Nephrologie am Universitätsklinikum Regensburg tätig.

Forschungsschwerpunkte: Nephrologie, Transplantation, Nierenversagen, entzündliche Nierenerkrankungen.



Prof. Dr. **Gunter Meister** studierte Biologie an der Universität Bayreuth und promovierte in Biochemie am Max Planck Institut für Biochemie in Martinsried und an der Universität München. Gunter Meister arbeitete anschließend im Labor von Tom Tuschl an der Rockefeller University in New York. Nach seiner Rückkehr leitete er die selbständige Nachwuchsgruppe „RNA Biologie“ am Max Planck Institut für Biochemie in Martinsried. Seit 2010 leitet Gunter Meister einen Lehrstuhl für Biochemie an der Universität Regensburg.

Forschungsschwerpunkte: Genregulation durch microRNAs.



Prof. Dr. **Michael Rehli** studierte Chemie an der Universität Regensburg und promovierte am Regensburger Uniklinikum. Er arbeitete danach als Postdoktorand im Labor von David Hume an der University of Queensland in Brisbane. Seit seiner Rückkehr leitet Michael Rehli eine Arbeitsgruppe in der Abteilung für Hämatologie am Uniklinikum Regensburg und ist seit 2010 außerplanmäßiger Professor für das Fach „Experimentelle Hämatologie“.

Forschungsschwerpunkte: Etablierung und Funktion epigenetischer Modifikationen bei zellulären Differenzierungsprozessen und Tumorentstehung, Regulierung der Transkription in Blutzellen.



Prof. Dr. **Frank Schweda** studierte Humanmedizin an der Universität Göttingen, wo er auch promovierte. Nach einer vierjährigen klinischen Tätigkeit in der Inneren Medizin (Kardiologie und Nephrologie) wechselte er an das Institut für Physiologie der Universität Regensburg an dem er im Fach Physiologie habilitierte und seit 2008 als Professor für Physiologie tätig ist.

Forschungsschwerpunkte: Nierenphysiologie, Blutdruckregulation und arterielle Hypertonie.



Prof. Dr. **Reinhard Sterner** studierte Biologie an der Universität München, wo er im Jahr 1991 promovierte. Er arbeitete anschließend als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Biozentrum der Universität Basel und habilitierte sich dort 1997 im Fach Biochemie. Es folgten eine zweijährige Gruppenleitertätigkeit als Heisenberg-Stipendiat der Deutschen Forschungsgemeinschaft an der Universität Göttingen und von 1999-2003 eine C3-Professur für Biochemie an der Universität zu Köln. Seit 2004 ist Reinhard Sterner Inhaber eines Lehrstuhls für Biochemie an der Universität Regensburg.

Forschungsschwerpunkte: Enzymdesign und Enzymevolution.

aus können sich im Rahmen von Nierenschädigungen Tubuluszellen zu Kollagen produzierenden Zellen umwandeln. Schließlich tragen sogenannte Fibrozyten zur Kollagensynthese bei. Bei Fibrozyten handelt es sich, im Gegensatz zu Fibroblasten, die ständig in der Niere vorhanden sind, um in die Niere eingewanderte Blutzellen. Fibrozyten differenzieren sich aus einer Untergruppe der weißen Blutkörperchen, den Monozyten, aus denen sich klassischerweise Fresszellen, die Makro-

phagen, entwickeln. Die Arbeitsgruppe von Matthias Mack geht der Frage nach, welche Faktoren die Differenzierung von Monozyten in Kollagen bildende Fibrozyten auslösen und damit zur Nierenfibrose beitragen. Erste Untersuchungen, die in Kooperation mit der Arbeitsgruppe von Frank Schweda durchgeführt wurden, zeigen, dass eine weitere Untergruppe weißer Blutkörperchen, die T-Zellen (T-Lymphozyten), für die Umwandlung von Monozyten zu Fibrozyten notwendig ist.

T-Zellen sind Zellen der Immunabwehr, die im Knochenmark gebildet werden und im Thymus (daher das „T“) ausreifen. Man unterteilt T-Zellen nach dem Vorhandensein bestimmter Erkennungsmoleküle in CD4-positive und CD8-positive Zellen. T-Zellen kontrollieren ständig die Oberfläche anderer Zellen. Stellen sie dort krankhafte Veränderungen fest, werden die T-Zellen aktiviert und setzen im Fall von CD4+ T-Zellen Entzündungsbotenstoffe, sogenannte Zytokine frei, die andere Immunzellen an den Ort des Geschehens locken. Zunächst konnte in Zellkulturexperimenten gezeigt werden, dass die Differenzierungsrate von Monozyten zu Fibrozyten und die Bildung von Kollagen durch nicht aktivierte CD4+ T-Zellen deutlich stimuliert wurde. Darüber hinaus waren bei einem Mäusestamm, der keine T-Zellen besitzt, die Zahl der Fibrozyten in der Niere und vor allem auch die Nierenfibrose nach einem Schädigungsreiz deutlich reduziert. Schließlich führte die experimentelle Verminderung der CD4+ T-Zellen zu einer Reduktion der extrazellulären Kollagenablagerung in der Niere. Die Anwesenheit von CD4+ T-Zellen ist also eine Voraussetzung für die Fibrozytendifferenzierung. Interessanterweise setzen CD4+ T-Zellen nach ihrer Aktivierung, wie sie im Rahmen einer Entzündungsreaktion erfolgt, Entzündungsbotenstoffe (Zytokine) frei, die die Bildung von Fibrozyten hemmen. Entsprechend konnte die Zahl der Fibrozyten und die Ablagerung von Kollagen I bei Mäusen mit Nierenfibrose durch die Gabe dieser Zytokine, nämlich Interleukin-2 und Tumor Nekrose Faktor, deutlich vermindert werden [7]. Wurde hingegen die Bildung dieser Zytokine durch das Immunsuppressivum CyclosporinA gehemmt, war die Anzahl der Fibrozyten erhöht und die Kollagenablagerung verstärkt [7], so dass dieser Befund das gehäufte Auftreten von Nierenfibrosen bei nierentransplantierten Patienten, die mit dieser Substanzklasse behandelt werden, erklären könnte.

Zusammenfassend zeigen die Untersuchungen, dass die Differenzierung von Fibrozyten wesentlich von CD4+ T-Zellen kontrolliert wird, und dass Immunsuppressiva über die Fibrozytenbildung einen negativen Einfluss auf die Nierenfibrose ausüben können. Um weitere mögliche therapeutische Ansatzpunkte zur Verminderung oder Verhinderung fibrotischer Prozesse im Rahmen von Nierenerkrankungen zu identifizieren, wird das Zusammenspiel von CD4+ T-Zellen und Fibrozyten gegenwärtig weiter untersucht.

Literatur

Fabian Erdel, Thomas Schubert, Caroline Marth, Gernot Längst, und Karsten Rippe, Human ISWI chromatin-remodeling complexes sample nucleosomes via transient binding reactions and become immobilized at active sites. In: Proc. Natl. Acad. Sci. USA 107 (2010), S. 19873–19878.

Ulrike Friedrich, Lars G. Fritsche, und Bernhard H.F. Weber, Volkskrankheit altersabhängige Makuladegeneration. Die Erforschung genetischer Faktoren als Voraussetzung für gezielte Therapiekonzepte. In: Blick in die Wissenschaft 22 (2010), S. 48–54.

Martin Gallenberger, Dominik M. Meinel, Markus Kroeber, Michael Wegner, Philip Milkereit, Michael R. Bösl, Ernst R. Tamm, Lack of WDR36 leads to preimplantation embryonic lethality in mice and delays the formation of small subunit ribosomal RNA in human cells in vitro. In: Hum. Mol. Genet., 20 (2011), S. 422–435.

Claudia Gebhard, Chris Benner, Mathias Ehrich, Lucia Schwarzfischer, Elmar Schilling, Maja Klug, Wolfgang Dietmaier, Christian Thiede, Ernst Holler, Reinhard Andreesen, Michael Rehli, General transcription factor binding at CpG islands in normal cells correlates with resistance to de novo DNA methylation in cancer cells. In: Cancer Res. 70 (2010), S. 1398–1407.

Gunter Meister, Thomas Tuschl, Mechanisms of gene silencing by double-stranded RNA. In: Nature 431 (2004), S. 343–349.

Daniel Mueller, Anja Bosserhoff, Role of miRNAs in the progression of malignant melanoma. In: Brit. J. Cancer 101 (2009), S. 551–556.

Marianne Niedermeier, Barbara Reich, Manuel Rodriguez Gomez, Andrea Denzel, Kathrin Schmidbauer, Nicole Göbel, Yvonne Talke, Frank Schweda, Matthias Mack, CD4+ T cells control the differentiation of Gr1+ monocytes into fibrocytes. In: Proc Natl Acad Sci U S A 106 (2009), S. 17892–17897.

Lasse Peters, Gunter Meister, Argonaute proteins: mediators of RNA silencing. In: Molecular Cell 26 (2007), S. 611–623.

Karsten Rippe, Anna Schrader, Philipp Riede, Ralf Strohnner, Elisabeth Lehmann, Gernot Längst, DNA sequence- and con-



Prof. Dr. **Ernst R. Tamm** studierte Humanmedizin an der Universität Erlangen-Nürnberg und promovierte 1986 bei Elke Lütjen-Drecoll am Anatomischen Institut, wo er sich auch 1993 für Anatomie und Entwicklungsgeschichte habilitierte. Von 1995–1999 folgte, als Heisenberg-Stipendiat der Deutschen Forschungsgemeinschaft, ein Forschungsaufenthalt am National Eye Institute der National Institutes of Health (Laboratory for Molecular and Developmental Biology, Joram Platiorsky). 2000–2004 Universitätsprofessor (C3) für Molekulare Anatomie an der Universität Erlangen-Nürnberg. Seit 2004 Leiter des Lehrstuhls für Humananatomie und Embryologie an der Universität Regensburg.

Forschungsschwerpunkte: Identifizierung von molekularen Mechanismen für den Schutz und das Überleben von Nervenzellen der Netzhaut, Analyse der molekularen Ursachen des Glaukoms, Erforschung der Steuerungsprozesse der Augenentwicklung.



Prof. Dr. **Bernhard H.F. Weber** studierte Chemie und Biologie für das Lehramt an Gymnasien an den Universitäten Mainz und Freiburg und promovierte 1988 bei Prof. Ulrich Wolf am Institut für Humangenetik der Universität Freiburg. Von 1988–1993 war er zunächst Research Assistant, dann Associate Professor am Department of Medical Genetics der Universität von British Columbia in Vancouver, Canada. 1995 Habilitation für das Fach Humangenetik, 1995 Universitätsprofessor (C3) an der Universität Würzburg. Seit 2004 Leiter des Instituts für Humangenetik an der Universität Regensburg.

Forschungsschwerpunkte: Ursachen und Mechanismen der neuronalen Degeneration am Modell der Säugernetzhaut. Suche nach genetischen Risikofaktoren bei genetisch komplexen Erkrankungen. Entwicklung von Ansätzen innovativer Therapieoptionen bei seltenen genetischen Erkrankungen.

formation-directed positioning of nucleosomes by chromatin-remodeling complexes. In: Proc Natl Acad Sci USA 104 (2007), S. 15635–15640.

Christian Schmidl, Maja Klug, Tina Boeld, Reinhard Andreesen, Petra Hoffmann, Mat-

thias Edinger, Michael Rehli, Lineage-specific DNA methylation in T cells correlates with histone methylation and enhancer activity. In: Genome Res. 19 (2009), S. 1165–1174.

Spins, Moleküle und Supercomputer – Bausteine und Konzepte einer zukünftigen Elektronik

Christoph Strunk, Dieter Weiss, Jascha Repp, Andreas Schäfer, Thomas Niehaus, Tilo Wettig

Die Halbleiterelektronik und ihre Anwendungen, insbesondere in der Informationsverarbeitung, prägen in zunehmendem Maße unsere Alltagswelt. Was mit dem Transistor vor 60 Jahren begann, hat sich in nahezu alle Lebensbereiche ausgebreitet und zu Geräten und Netzwerken von beeindruckender Komplexität geführt. Im kommerziellen Bereich wird die Plattform, auf der elektronische Schaltungen realisiert werden, noch auf geraume Zeit von der Silizium-Technologie dominiert werden, weil hier ein zuverlässiger Herstellungsprozess etabliert werden konnte, der flexibel an viele unterschiedliche Bedürfnisse angepasst werden kann. Für speziellere Anwendungen wurden auch andere Materialien entwickelt. Beispiele sind Gallium- und Indium-Arsenid in der Optoelektronik und der Hochfrequenztechnik oder neuartige Halbleiter auf der Basis organischer Moleküle.

Diese Schlüsselstellung verdanken die Halbleiter der Tatsache, dass deren elektrische Leitfähigkeit durch die Zugabe von Fremdatomen („Dotierung“), und durch elektrische Felder gesteuert werden kann. Die Steuerbarkeit des Widerstands ermöglicht die Konstruktion von Verstärkern und elektronischen Schaltern, welche letztlich die Basis aller elektronischen Schaltungen darstellen.

Trotz der Vielfalt der bereits existierenden Technologien bemüht sich die Forschung an der Universität Regensburg und anderswo, ganz neue Materialien und Funktionsprinzipien zu entwickeln. Die Triebkraft dieser Untersuchungen ist nicht so sehr

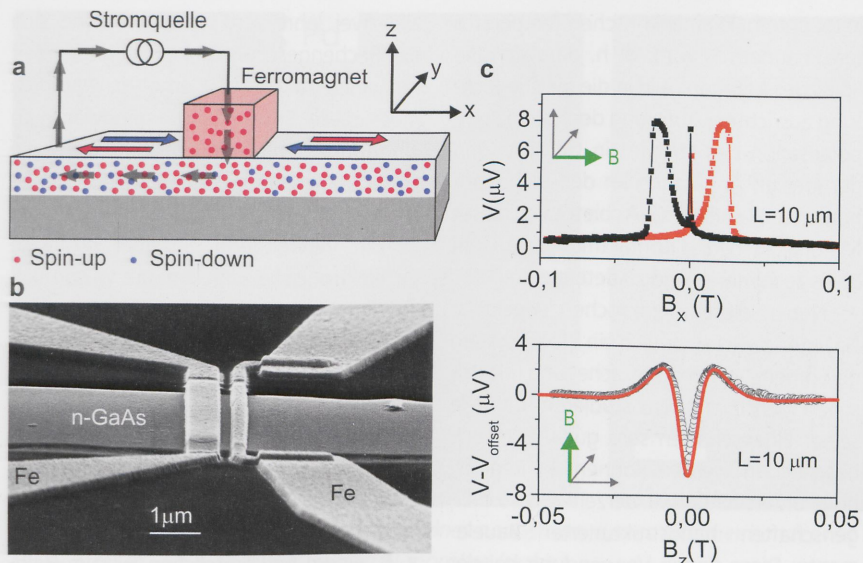
eine konkrete Anforderung aus der Praxis, sondern mehr die wissenschaftliche Neugier – das Bedürfnis neue Phänomene zu entdecken und zu verstehen. Die Richtung dieser Aktivitäten wird überwiegend durch die persönlichen Interessen der Forscher bestimmt, die oft weniger technologische Anwendungen, als den Fortschritt der „reinen Wissenschaft“ im Auge haben. Daher wirkt der auf diese Weise erzielte Fortschritt in vielen Fällen zunächst eher zufällig und wenig zweckorientiert – und damit ineffizient. Die auf die Weiterentwicklung bestehender Technologie ausgerichteten Forschungsaktivitäten der Industrie und der angewandten Wissenschaft erscheinen zielgerichteter und effizienter, und sind dies auf kurze Sicht auch. Im Gegensatz dazu besteht die Stärke der Grundlagenforschung darin, fundamental neue Phänomene zu entdecken und zu verstehen – erst nachdem ein Phänomen bekannt ist, kann man sich Gedanken darüber machen, auf welche Weise es nutzbar gemacht werden kann. In vielen Fällen ergeben sich die bedeutendsten praktischen Anwendungen einer neuen Entdeckung erst weit im Nachhinein und sind oft völlig verschieden von dem, was die Entdecker selbst für ihre Forschung motiviert hat. Auf lange Sicht führen die Ergebnisse der Grundlagenforschung daher immer wieder zu technologischen Umwälzungen, die zum Zeitpunkt der Entdeckung völlig unvorhersehbar waren.

Wichtige Forschungsschwerpunkte an der Fakultät für Physik der Universität Regensburg sind die *Spin-Elektronik* (kurz: *Spintronik*), die *molekulare Elektronik* und

die Entwicklung und Anwendung von *Supercomputern*, insbesondere für Arbeiten im Bereich der theoretischen Teilchenphysik.

Spintronik

Während die hergebrachte Elektronik auf der Leitfähigkeit, beziehungsweise der Steuerung der Leitfähigkeit von Halbleitern durch äußere Signale beruht, versucht die Spintronik aus der Tatsache Kapital zu schlagen, dass die Elektronen, die für den Stromfluss verantwortlich sind, neben der elektrischen Ladung noch eine andere physikalische Größe tragen, nämlich den *Spin*. Man kann sich vorstellen, dass der elektrische Strom durch die zielgerichtete Bewegung kleiner Teilchen, der Elektronen innerhalb eines Metalls oder eines anderen Leiters zustande kommt. Wie bereits 1925 entdeckt wurde, tragen die Elektronen nicht nur elektrische Ladung, sondern auch ein magnetisches Dipolmoment mit sich, das Elektron besitzt einen magnetischen Nord- und Südpol. Im Gegensatz zu einem „klassischen“ Magneten hat das magnetische Moment eines Elektrons in einem äußeren Magnetfeld nur zwei Einstellmöglichkeiten: parallel oder anti-parallel zum äußeren Magnetfeld. Die beiden möglichen Einstellungen heißen Spin-up und Spin-down. In der konventionellen Elektronik spielt der Spin keine Rolle, weil die Richtung dieses magnetischen Moments für verschiedene Elektronen zufällig orientiert ist, und im Mittel daher Null ergibt. Die Spintronik versucht nun, den Spin für die Übertragung von zusätzlicher Informa-



1 (a) Spinakkumulation und Spinstrom. Der Strom in dem roten ferromagnetischen Spininjektor ist in diesem Beispiel zu 100 % spinpolarisiert, d.h. der Strom wird z. B. nur von roten Spin-up Elektronen getragen. Im darunter liegenden Halbleiter entsteht eine Spinakkumulation, d.h. eine Anhäufung von roten Elektronen mit Spin up und eine Verarmung an blauen Spin-down Elektronen. Aufgrund des Konzentrationsgradienten fließen die blauen Elektronen in einer, die roten in anderer Richtung vom Injektorkontakt. Rechts vom Kontakt heben sich die beiden Teilströme gerade auf; es fließt kein elektrischer Strom aber ein Spinstrom, da Elektronen mit Spin-up in eine und die mit Spin-down in die entgegengesetzte Richtung fließen. Die grauen Pfeile geben den Fluss der Elektronen im Kreis, nicht die technische Stromrichtung an.

(b) Elektronenmikroskopische Aufnahme zweier Eisenkontakte, die als Spininjektor (z. B. linker Fe Kontakt) bzw. als Spindetektor (z. B. rechter Fe Kontakt) dienen. Unterschiedliche Dichten von Spin-up und Spin-down Elektronen unter einem ferromagnetischen Detektor werden als Spannungssignal nachgewiesen.

(c) Typische Messkurven, die das Vorhandensein einer Spinpolarisation unter einem Detektor für ein in der Probenebene angelegtes Magnetfeld B_x (oben) bzw. für ein Magnetfeld B_z senkrecht dazu (unten) anzeigt. Die Spannungen V werden hierbei zwischen dem Detektorkontakt und einem entfernt liegenden Referenzkontakt gemessen.

tion nutzbar zu machen. Während die mittels der elektrischen Ladung in einem Speicherchip enthaltene Information flüchtig ist, und immer wieder aufgefrischt werden muss (was Energie kostet), ist die in dem Spinmoment kodierte Information unter bestimmten Umständen wesentlich weniger flüchtig. Schon heute wird der Spin zur Datenspeicherung auf den Festplatten von PCs eingesetzt, allerdings sind die magnetischen (Festplatten) und elektronischen Komponenten (Prozessoren) räumlich und konzeptionell getrennt. Daher stellt sich die Frage, ob magnetische und elektrische Eigenschaften so zusammengeführt werden können, dass sich neue physikalische Effekte ergeben, die genutzt werden können. Längerfristig verspricht man sich davon neue Funktionalitäten, z. B. nicht-flüchtige Datenspeicherung oder Schaltkreise, die weniger Energie verbrauchen. Da der Spin in einigen Materialien, wie

zum Beispiel dem in der Elektronik überall gebräuchlichem Silizium lange „lebt“, stellt er auch eine mögliche Option für die Realisierung eines Quantencomputers dar. Hierbei wird das Ergebnis einer Rechnung nicht mehr durch logische Operationen durchgeführt, die auf dem An- (Bit „1“) und Abschalten von Transistoren (Bit „0“) beruhen, sondern auf der Überlagerung, Manipulation und zeitlichen Entwicklung quantenmechanischer Zustände. Dazu werden die Regeln der Quantenmechanik ausgenutzt. Für diese Anwendung sind allerdings die oben erwähnten langen Lebensdauern in einem Zustand, z.B. im Spin-up oder Spin-down, essentiell. Da die Quantenchips, die das Gehirn eines solchen Computers ausmachen, für die praktische Nutzung aus einem Festkörper bestehen müssen, ist eine zentrale Frage, wie man Spins effizient in einen geeigneten Halbleiter oder Leiter „injiziert“, wie man

den Spin im Festkörper manipuliert, ihn zum Beispiel von Nord nach Süd dreht, und wie man den Spinzustand ausliest. Die diesen Prozessen zugrundeliegende Physik wird in Regensburg im Rahmen eines Sonderforschungsbereichs der Deutschen Forschungsgemeinschaft untersucht.

Geeignete Festkörpermaterialien, die derzeit untersucht werden, sind Halbleiter wie Silizium oder Galliumarsenid (GaAs), die schon jetzt das Rückgrat der Elektronik- und Optoelektronik bilden, aber auch neue Materialsysteme wie dünnste Graphitfilme die nur aus einer Atomlage Kohlenstoff bestehen und Graphen genannt werden, oder Kohlenstoffnanoröhren, die aus einer oder mehreren Lagen aufgerollten Graphens bestehen. Ein zentrales Problem bei der Nutzung des Spins in der Elektronik liegt in der effizienten und möglichst rein elektrischen Injektion von Spins in diese Materialien. Ein viel versprechender Weg ist die Verwendung ferromagnetischer Kontakte durch die der Strom auf dem Weg in den Halbleiter fließt. In den letzten Jahren haben wir und andere Gruppen in der Welt große Fortschritte gemacht und zumindest bei tiefen Temperaturen effiziente Spininjektion nachweisen können. Eine experimentelle Anordnung zur Untersuchung dieser Phänomene ist in Abbildung [1] gezeigt. In den ferromagnetischen Kontakten ist der elektrische Strom spinpolarisiert, d.h. es tragen mehr Elektronen einer Spinsorte zum Strom bei. Fließt der polarisierte Strom über die Grenzfläche, so bildet sich bei optimierten Grenzflächeneigenschaften eine Spinakkumulation aus, das ist eine Anhäufung der einen und eine Verarmung der anderen Spinsorte im nichtmagnetischen Material. Diese Spinakkumulation treibt einen Spinstrom, der in [1 a] auch nach rechts fließt, also in einem Bereich des Leiters, in dem kein elektrischer Strom fließt. Ein Spinstrom ist ein Fluss an Magnetisierung, d. h. es bewegen sich z. B. Elektronen mit Spin up nach rechts und die mit Spin-down nach links: In Summe wird keine Ladung transportiert, sondern Spin oder anders ausgedrückt: Magnetisierung. Da dieser Strom praktisch keinen Spannungsabfall und damit keine Wärmeentwicklung entlang seines Wegs verursacht, kann man darüber spekulieren, ob solche Spinströme die Basis für eine energieeffiziente Elektronik bzw. Spintronik sein könnten. Nachweisen kann man solche Spinströme optisch oder elektrisch über eine zweite ferromagnetische Elektrode. Die Spannung, die an dieser zweiten Elektrode gemessen wird, hängt von der mittleren

Ausrichtung aller Elektronenspins im Bereich des Kontaktes ab und erlaubt es somit, ein spinabhängiges Signal zu messen. Beide Methoden, optische und elektrische werden von verschiedenen Arbeitsgruppen des SFB eingesetzt. Es gibt aber auch andere Möglichkeiten Spinströme zu erzeugen: mit zirkular polarisiertem Licht oder mit Spin-Ratschen, einem Konzept, das in Regensburg theoretisch entwickelt wurde. Ein noch offenes Problem ist die Spininjektion in ein zweidimensionales Ladungsträgersystem wie man es beispielsweise in herkömmlichen MOS-Feldeffekttransistoren findet. Schafft man es einen spinpolarisierten elektrischen Strom oder einen reinen Spinstrom in ein zweidimensionales System zu injizieren, so gibt es eine einfache Möglichkeit, die Spinausrichtung zusätzlich über die sogenannte Spin-Bahn Wechselwirkung zu manipulieren. Diese Kopplung von elektrischen Feldern und Spins, die im Rahmen des SFB ebenfalls experimentell und theoretisch untersucht wird, erlaubt die Spins durch Anlegen einer Spannung an eine geeignet platzierte Elektrode zu drehen. Damit wären alle oben genannten Operationen, Injektion, Manipulation und Detektion in einer Transistor ähnlichen Anordnung möglich. Von der Manipulation und Detektion eines einzelnen Elektrons mit Spin ist man damit aber noch weit entfernt. Die kann jedoch mit Hilfe von sogenannten Einzelelektronentransistoren realisiert werden. Hierbei wird eine kleine leitende Insel durch dünne isolierende Bereiche von den beiden Zuleitungen abgetrennt. Möchte man ein zusätzliches Elektron auf die Insel bringen, so muss erst die abstoßende Kraft zwischen einem negativ geladenen Elektronen auf der Insel und dem negativ geladenen Neuankömmling durch Anlegen einer genügend großen elektrischen Spannung überwunden werden. Dieser Effekt wird Coulomb-Blockade genannt und erlaubt in Kombination mit ferromagnetischen Zuleitungen oder ferromagnetischer Insel Spintronik auf der Ebene eines einzelnen Elektrons zu untersuchen.

Ein anderes Materialsystem, das in unserem Sonderforschungsbereich einen breiten Raum einnimmt und exemplarisch die Verknüpfung von Spin und Halbleiterelektronik verkörpert, ist der magnetische Halbleiter Galliummanganarsenid (GaMnAs). Die Zugabe von einigen Prozent Mangan in den Halbleiter Galliumarsenid, der üblicherweise in der Herstellung von Leuchtdioden oder Halbleiterlasern Verwendung findet, führt dazu, dass der Halb-

leiter unterhalb einer kritischen Temperatur ferromagnetisch wird, d. h. dass sich die Spins des Mangans alle in die gleiche Richtung ausrichten. Aufgrund der hohen Spinpolarisation des Stromes in GaMnAs und der idealen Anpassung an den nichtmagnetischen Halbleiter GaAs bietet sich dieses Material als ideales Kontaktmaterial an, um Spins zu injizieren und zu detektieren.

Neben diesem praktischen Aspekt ist GaMnAs zwischenzeitlich ein Modellsystem geworden, um magnetische und elektrische Eigenschaften zu studieren, da viele seiner Eigenschaften sehr gut theoretisch beschrieben werden können. In Regensburg untersuchen wir derzeit z. B. die Eigenschaften nanostrukturierter Bauelemente: Diese finden Verwendung bei der Herstellung ferromagnetischer Einzel-Elektronen-Transistoren oder als Spin-Injektoren oder Detektoren. Auch lassen sich mit modernen Wachstumsmethoden wie der Molekularstrahlepitaxie, bei der Kristalle Atomlage für Atomlage aufgebaut werden können, sehr dünne Nanodrähte direkt auf geeignet präparierte Substrate aufwachsen. Der praktische Einsatz von GaMnAs wird derzeit noch durch die relativ niedrige Curie-Temperatur von etwa -80°C behindert, bei der das System ferromagnetisch wird. Deshalb müssen die Experimente bei sehr niedrigen Temperaturen durchgeführt werden. Es gibt aber erste Experimente, die belegen, dass mit einer nur wenige Atomlagen dicken Eisenschicht, die auf den Halbleiter aufgewachsen wird, die Curie-Temperatur im GaMnAs signifikant angehoben werden kann. Die Untersuchung und Anwendung dieses Effektes nimmt in unseren derzeitigen Arbeiten einen breiten Raum ein.

Kohlenstoff-basierte NANOelektronik

Ein entscheidender Faktor für die Schnelligkeit der Informationsverarbeitung und die Packungsdichte der gespeicherten Information ist die Größe der elementaren Bausteine der verwendeten Hardware. Der Trend zur Miniaturisierung der Elektronik seit den 60er Jahren hat auf der Basis der Silizium-Technologie bereits zu einer dramatischen Verkleinerung dieser Bausteine geführt: gemäß dem „Moore’schen Gesetz“ hat sich die Zahl der Bauelemente auf einem Quadratzentimeter eines integrierten Schaltkreises zwischen 1970 und 2010

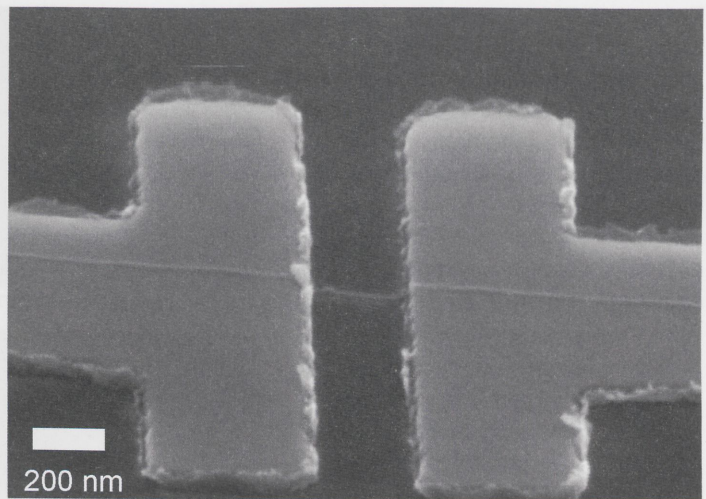
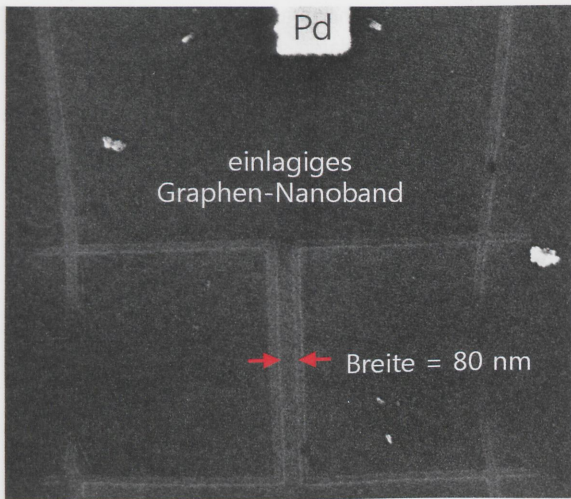
alle zwei Jahre verdoppelt, während sich die Rechengeschwindigkeit in dieser Zeit um einen Faktor 10^{13} erhöhte. Natürlich muss diese Entwicklung irgendwann an eine fundamentale Schranke stoßen – die Frage ist, wo diese fundamentale Schranke tatsächlich liegt.

Die Verwendung einzelner Moleküle als elektronische Bauelemente würde völlig neue Möglichkeiten der Miniaturisierung ermöglichen. Diese Frage wird im Rahmen der *molekularen Elektronik* untersucht. Die dabei meist verwendeten sogenannten organischen Moleküle bestehen primär aus Kohlenstoff und Wasserstoff. Zwischen organischen Molekülen und einem makroskopischen Festkörper (wie z. B. einem herkömmlichen Silizium-Halbleiter) sind Graphen und Kohlenstoff-Nanoröhrchen angesiedelt, die aufgrund ihrer interessanten Materialeigenschaften ebenfalls Kandidaten für zukünftige elektronische Bauelemente darstellen. Sie bestehen ausschließlich aus Kohlenstoff.

Graphen und Kohlenstoff-Nanoröhrchen

Diese neuartigen Materialien erlauben eine Kombination der einzigartigen Vielfalt der Chemie des Kohlenstoffs mit der in der Halbleiter-Elektronik üblichen lithographischen Strukturierungsverfahren zur Realisierung von Bauelementen. Beispiele solcher Nanostrukturen sind in Abbildung [2] gezeigt.

Im Jahr 2004 gelang die Extraktion und elektrische Kontaktierung einer einzelnen Atomlage von Kohlenstoff aus einem Graphit-Kristall. Obwohl dieses, als Graphen bezeichnete Material nur aus einer einzelnen Lage von Atomen besteht, ist es mechanisch, chemisch und elektrisch außerordentlich stabil. Es stellt eine zweidimensionale Form des Kohlenstoffs dar und zeigt eine ganze Reihe neuartiger Phänomene. Die besondere Honigwabeng-artige Anordnung der Atome in Graphen ist für seine besonderen elektrischen Eigenschaften verantwortlich. Abbildung [3] zeigt, dass die Energien der Elektronen im Graphen auf einem Doppelkegel, an dessen Engstelle die Zahl der Elektronen, die zum Stromfluss beitragen kann, minimal sind. Graphen ist weder Metall noch Halbleiter. Abbildung [3 (b)] zeigt, wie sich ähnlich bei einem Halbleiter durch eine Elektrode Elektronen von außen zuführen oder verdrängen lassen. Auf diese Weise lässt sich die elektrische Leitfähigkeit stufenlos einstellen, womit Transistor-ähnliche Funktionen realisierbar sind. Die Ladungsträgerdichte



2 Elektronenmikroskopische Aufnahmen eines nanostrukturierten Graphenbandes mit Pd-Kontakten (links) und einer mit zwei Nb-Kontakten versehenen Kohlenstoff-Nanoröhre (rechts)

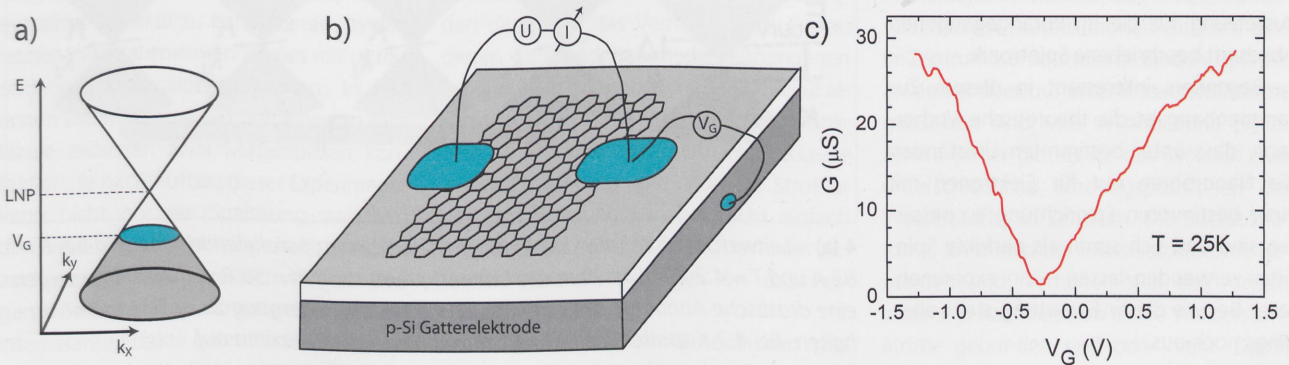
hat am Ladungsneutralitätspunkt (LNP) ein Minimum. An diesem Punkt ist Graphen elektrisch neutral. Für Schalter ist dagegen das Graphen bisher weniger gut brauchbar, weil die am Ladungs-Neutralitätspunkt immer noch recht hohe Leitfähigkeit keinen gut definierten ‚Aus‘-Zustand erlaubt. Das für die Wissenschaftler eigentlich Interessante dieses Materials stellen jedoch eine Reihe sehr ungewöhnlicher elektrischer Eigenschaften dar, die gegenwärtig Gegenstand der Grundlagenforschung sind.

Schneidet man zum Beispiel Graphen mit Hilfe der Elektronenstrahl-Lithographie in schmale Streifen – Nano-Bänder, so hängen die Eigenschaften dieser Streifen stark von der Beschaffenheit des Randes ab, was bei sehr schmalen Bändern zu iso-

lierendem Verhalten führt. Bei etwas höheren Temperaturen lässt sich der Widerstand mit Hilfe einer Elektrode leicht um einen Faktor 10 oder mehr variieren. Ein Beispiel für dieses Transistor-artige Verhalten ist in Abbildung [3 (c)] gezeigt. Aus praktischer Sicht ist Graphen auch deshalb sehr interessant, weil sich davon großflächige Schichten herstellen lassen, die man sich in den der Mikroelektronik üblichen Verfahren nanostrukturieren kann.

Bei einem anderen Vertreter dieser Materialklasse, den Kohlenstoff-Nanoröhren, sind die Graphen-Streifen zu einem nahtlosen Zylinder mit einem Durchmesser zwischen einem und zehn Nanometern aufgerollt. Nanoröhren weisen wegen der Abwesenheit eines Randes eine viel geringere

Dichte von Defekten auf und ihre Transistor-Funktion wurde schon vielfach und in einem breiten Frequenzbereich demonstriert. Allerdings zeigen Nanoröhren keine identischen elektrischen Eigenschaften, sondern unterscheiden sich in ihrem Leitwert sehr stark, je nachdem in welcher Richtung des Kristallgitters das Aufrollen erfolgt: hat der Rand am Ende des Röhrchens eine zick-zack-förmige Gestalt, so verhält sich das Röhrchen halbleitend. Im Diagramm der Elektronenenergien [3 (a)] äußert sich dies darin, dass die besetzten von den unbesetzten Elektronenzuständen durch eine *Bandlücke* getrennt sind. Läuft der Rand dagegen parallel zu den Kanten der Sechsecke des Bienenwabengitters, so ist das Röhrchen metallisch, und ist bei



3 (a) Energie der Elektronen in Graphen als Funktion des Wellenvektors k . Mit Hilfe der Gatterspannung V_G lässt sich die Elektronendichte, und damit die Grenze zwischen besetzten und unbesetzten Zuständen auf der Energieachse verschieben. Die Zahl der Elektronen an dieser Grenze (blaue Fläche) ist zum Leitwert $G = I/U$ proportional und nimmt am Ladungs-Neutralitätspunkt (LNP) ein Minimum an.

(b) Schema der Probengeometrie: die Graphenflocke liegt auf einem leitfähigen Siliziumchip (dunkelgrau). Zusammen mit der isolierenden Siliziumoxid-Schicht (weiß) bildet diese Anordnung einen Plattenkondensator, dessen Ladung durch die Gatterspannung geregelt wird.

(c) Gemessener Leitwert $G = I/U$ als Funktion der Gatterspannung

Zimmertemperatur nur wenig durch äußere Felder veränderbar. Zwischen diesen Sonderfällen existieren viele Nanoröhren mit einer spiralförmigen („chiralen“) Struktur, von denen 2/3 halbleitend und 1/3 metallisch sind. Eine Anwendung in der Elektronik erfordert natürlich wohldefinierte Eigenschaften der Bauelemente und daher eine Kontrolle der Struktur im Herstellungsprozess – an der Lösung dieses Problems wird derzeit intensiv gearbeitet.

Für die Grundlagenforschung ist neben der Transistorfunktion auch die Tatsache interessant, dass sich die elektrischen Eigenschaften der Nanoröhren auch mit Hilfe eines Magnetfeldes stark beeinflussen lassen. Nach der Quantentheorie breiten sich die für den Stromtransport verantwortlichen Elektronen wellenartig aus und können stehende Wellen ausbilden – wie der Luftdruck in einer Orgelpfeife. Die Wellenlänge dieser Wellen wird einerseits durch die Geometrie bestimmt (die Länge der Orgelpfeife), andererseits lässt sie sich aufgrund eines fundamentalen Quanteneffektes, des Aharonov-Bohm Effektes, auch mittels eines entlang der Nanoröhrenachse orientierten äußeren Magnetfeldes beeinflussen. Auf diese Weise kann die Bandlücke einer Nanoröhre durch das Magnetfeld gesteuert und der Charakter der Nanoröhren vom Metall zum Halbleiter, und auch andersherum vom Halbleiter zum Metall verändert werden. Kühlt man die Nanoröhren auf 4.2 K, der Temperatur flüssigen Heliums, ab, so beobachtet man zusätzlich eine sogenannte Spin-Aufspaltung. Dies bedeutet, dass sich Elektronen mit unterschiedlich ausgerichteten Spins unterschiedlich verhalten; eine Grundvoraussetzung für die im vorangegangenen Abschnitt beschriebene Spintronik.

Besonders interessant in diesem Zusammenhang ist die theoretische Vorhersage, dass unter bestimmten Umständen die Nanoröhren nur für Elektronen mit einer bestimmten Spinrichtung zu passieren sind und sich somit als perfekte Spin-Filter verwenden lassen – ein experimenteller Beweis dieser Erwartung steht allerdings noch aus.

Eine weitere attraktive Anwendung der Kohlenstoff-Nanoröhren ist deren Verwendung als Kontakte für die im nächsten Abschnitt beschriebene molekulare Elektronik. Aufgrund ihres typischerweise großen Verhältnisses von Länge (einige zehn Mikrometer) zu Durchmesser (wenige Nanometer) eignen sich die Nanoröhren sehr gut als Schnittstelle zwischen den meist

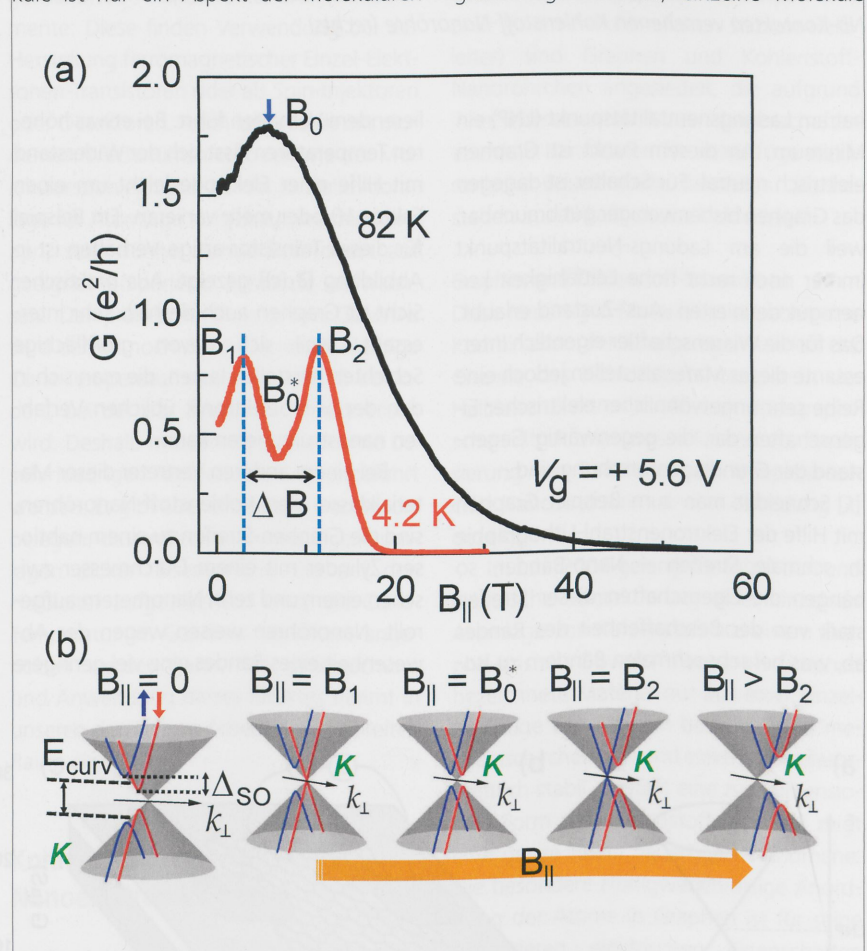
sehr kleinen Molekülen als eigentliche Schaltelemente und den viel größeren metallischen Elektroden für die Kommunikation mit der Außenwelt. Mittels eines fokussierten Elektronen- oder Ion-Strahls können die Nanoröhren so geschnitten werden, dass eine wenige Nanometer breite Lücke entsteht, in der elektrische interessante Moleküle über spezielle Ankergruppen eingebaut werden.

Moleküle

Die Miniaturisierung elektronischer Bauelemente durch Verwendung einzelner Moleküle ist nur ein Aspekt der molekularen

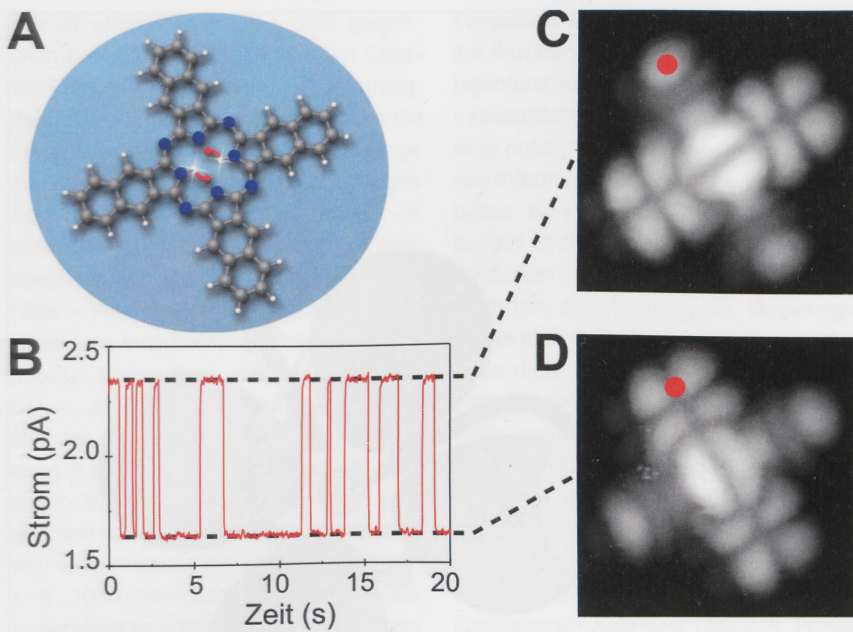
Elektronik. Das eigentlich Reizvolle an der molekularen Elektronik liegt darin, dass sich mit Mitteln der chemischen Synthese Myriaden identische Moleküle herstellen lassen. Trägt also ein bestimmtes Molekül eine komplette elektronische Funktionalität in sich, z.B. die eines Speicherelementes, so kann man in einem einzigen Reagenzglas so viele Speicherelemente herstellen, dass man das gesamte Wissen der Menschheit darin speichern könnte. Die eigentliche Herausforderung besteht dann darin, diese Moleküle – oder eben die Speicherelemente – zu kontaktieren und zu Schaltkreisen zu verdrahten.

Während die dem Forschungsfeld zugrundeliegende Idee, einzelne Moleküle



4 (a) Leitwert einer chiralen Kohlenstoff-Nanoröhre im parallelen Magnetfeld bei $T = 82 \text{ K}$ und $T = 4.2 \text{ K}$ in Einheiten des Leitwertquantums $e^2/h = 38,8 \mu\text{S}$. Die Daten zeigen eine drastische Abnahme des Leitwerts und damit der Übergang zu isolierendem Verhalten. Bei 4.2 K spaltet das Leitwert-Maximum in zwei Maxima auf.

(b) Vom Graphen abgeleitete Energien $E(k_{||}, k_{\perp})$ der Elektronen. Während $k_{||}$ und damit die Geschwindigkeit der Elektronen parallel zur Achse kontinuierlich variiert, ist k_{\perp} quantisiert, d.h. auf gewisse diskrete Werte eingeschränkt. Durch die Krümmung der Zylinderwand entsteht eine kleine Bandlücke E_{curv} . Zusätzlich sind die k_{\perp} -Werte der beiden Spin-Subbänder wegen der Spin-Bahn-Aufspaltung Δ_{SO} für beide Spin-Richtungen unterschiedlich. Das Magnetfeld verschiebt die k_{\perp} -Werte nacheinander durch den Ladungsneutralitätspunkt. Bei den Magnetfeldern B_1 und B_2 schließen sich nacheinander die Energielücken für die beiden Spin-Richtungen, so dass bei diesen Feldern ein theoretisch vollständig spin-polarisierter Elektronenstrom auftritt.



5 Illustration (A) und experimentelle Schaltkurve (B) eines molekularen Schalters. In (A) sieht man die Molekülstruktur eines Naphthalocyanin-Moleküls, das ein Derivat der Phthalocyanine ist. Die grauen, weißen und blauen Kugeln repräsentieren jeweils Kohlenstoff-, Wasserstoff- und Stickstoff-Atome. Im Zentrum befinden sich zwei Wasserstoffatome (hervorgehoben), die jeweils auf zwei sich gegenüberliegenden von vier äquivalenten Bindungsplätzen sind. Die Wasserstoffatome können, angeregt durch Stromfluss durch das Molekül, ihre Plätze wechseln (rote Pfeile), was mit einer Änderung des Leitwertes des Moleküls einhergeht. Die experimentelle Schaltkurve (B) zeigt eine solche Anregung, bei der die Position der Wasserstoffatome mehrfach geschaltet wird und der gemessene Strom zwischen zwei wohldefinierten Niveaus hin- und herspringt. Werden nach solchen Schaltvorgängen rastertunnelmikroskopische Bilder aufgezeichnet (rechts), so sieht man, welches Stromniveau welcher Orientierung der Wasserstoffe entspricht. Die Punkte in den Bildern zeigen die Position der Strominjektion während des Schaltvorganges an.

als elektronische Bauelemente zu verwenden, schon in die 1970er Jahre zurückgeht, bestand die experimentelle Herausforderung zunächst darin, überhaupt einmal ein einzelnes Molekül zu kontaktieren. In den letzten zwei Jahrzehnten ist dies mit unterschiedlichen Ansätzen gelungen. In den ersten Experimenten wurden einzelne Moleküle zwischen zwei Metallspitzen kontaktiert. Je nach Aufbau dieser Experimente kann nicht nur die Spannung zwischen den beiden Elektroden eingestellt, sondern auch deren Abstand variiert werden. Eine ganze Serie von Experimenten zeigte viele interessante Effekte beim Stromfluss durch Moleküle und viele unterschiedliche Funktionalitäten konnten so in einzelnen Molekülen realisiert werden.

Da die Moleküle zu den Metallelektroden eine Bindung eingehen, stellt sich die Frage, wo genau eigentlich die Metallelektrode aufhört und das Molekül beginnt. Diese einfache Frage hat handfeste Konsequenzen für die Experimente: So wie idea-

lerweise die Funktionalität des Moleküls durch dessen Struktur bestimmt sein soll, so wirkt sich natürlich auch die atomare Struktur der Kontaktierung zu den Elektroden direkt auf das Verhalten aus. Genau diesen Umstand haben die vergangenen Experimente gezeigt: nicht das Molekül alleine bestimmt die gemessenen Kennlinien, sondern die Gesamtstruktur inklusive der Kontaktierung. Die atomare Struktur der Kontaktierung ist aber nicht einfach reproduzierbar und darin liegt eine der aktuellen Herausforderungen an das Forschungsfeld.

Dabei werden im Wesentlichen drei Ansätze verfolgt: Zum einen versucht man durch geeignete Chemie der Kontaktstellen und der Elektroden die Moleküle dazu zu bringen, immer gleich an die Elektroden zu binden. Zweitens versucht man, den kritischen Kontaktpunkt mit in das Molekül zu verlagern, indem man Moleküle synthetisiert, die gleichsam einen Teil der Elektroden beinhalten. Dies muss dann so ge-

schehen, dass die Kontaktierung zwischen den molekularen Elektroden zu den makroskopischen Metallelektroden für die Funktionalität keine oder nur eine untergeordnete Rolle spielt. Drittens versucht man, die atomare Geometrie genau zu kennen, so dass man die atomare Struktur der Kontaktierung direkt mit den Messkurven in Relation setzen kann. Für letzteren Ansatz eignet sich insbesondere die sogenannte Rastertunnelmikroskopie, da diese gleichzeitig atomar aufgelöste Bilder liefert und elektrische Leitwertmessungen erlaubt.

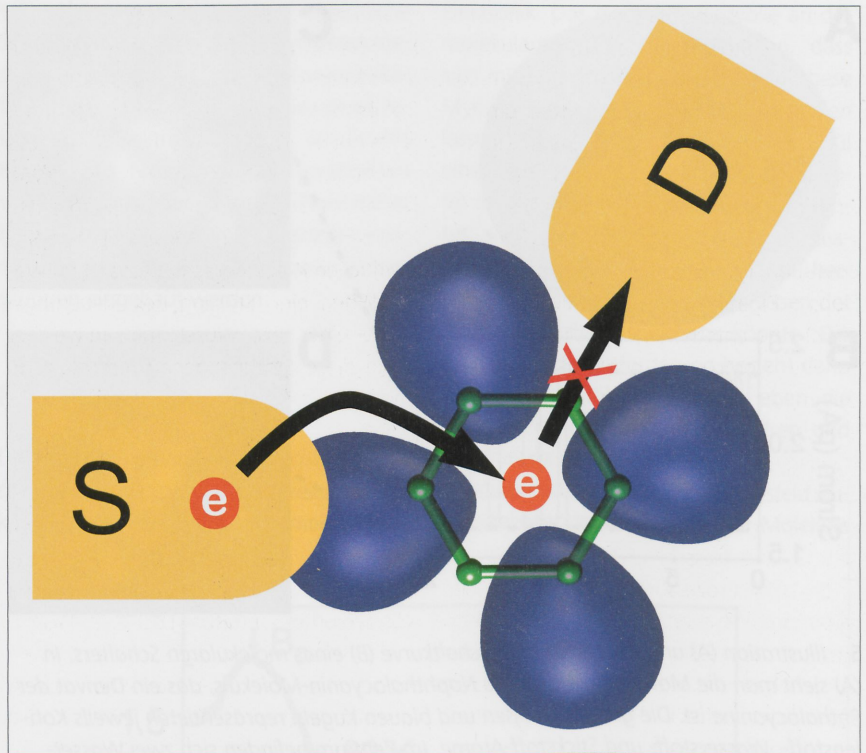
Eine weitere Herausforderung in der Zukunft wird sein, dass man – wenn man es mit dem Begriff der molekularen Elektronik ernst meint – mehrere molekulare Bauelemente miteinander verbindet und zu einer komplexeren Schaltung verdrahtet. Dies ist jedoch wissenschaftlich noch komplettes Neuland.

Alle diese genannten Herausforderungen werden an der Universität Regensburg in Kooperationen unterschiedlicher Arbeitsgruppen angegangen. Einerseits versuchen Forscher, Kohlenstoff-Nanoröhrchen, die im Grenzbereich zwischen Makromolekülen und Festkörpern eine ideale Schnittstelle zwischen makroskopischen Elektroden und Molekülen darstellen, in der molekularen Elektronik zum Kontaktieren zu nutzen. Andererseits werden einzelne Moleküle atomar genau mit einem Rastertunnelmikroskop auf Oberflächen platziert und auf deren Leitwerte untersucht. Bei den letztgenannten Experimenten konnten Forscher der Universität Regensburg in Kooperation mit IBM Rüschlikon z.B. ein neues molekulares Speicherelement identifizieren: In einem Phthalocyanin-Molekül, das in vielen unterschiedlichen Modifikationen existiert, sind im Zentrum vier äquivalente Bindungsplätze, an denen aber nur zwei Wasserstoffatome gebunden sind, wie in Abbildung [5] zu sehen. Daher gibt es für das Molekül zwei unterschiedliche Bindungspositionen der Wasserstoffe im Zentrum. Die Stickstoffatome, an denen die Wasserstoffatome gebunden sind, verhalten sich elektronisch anders, je nachdem, ob an sie Wasserstoffatome gebunden sind oder nicht. Damit wirkt sich die Position der beiden Wasserstoffatome im Zentrum auf den Leitwert des gesamten Moleküls aus, und damit auf die gemessenen Bilder im Rastertunnelmikroskop (siehe [5], unten rechts). Wir fanden heraus, dass man durch Stromfluss durch das Molekül ab einer bestimmten Spannung, dieses so anregen kann, dass die Wasserstoffatome im Zentrum ihren Platz

wechseln. Damit kann man also über den Strom das Molekül in den jeweiligen anderen Zustand umschalten. Auslesen kann man die Schaltstellung dann am Leitwert bei geringer Spannung bei der die Wasserstoffatome in ihrer Position fest bleiben.

In der molekularen Elektronik wird es nicht genügen, die Konzepte zur Realisierung bestimmter Funktionen aus der Mikroelektronik direkt auf molekulare Systeme übertragen zu wollen. So ist jetzt schon bei der Mikroelektronik das größte Hemmnis der Weiterentwicklung die enorme Hitzeentwicklung in den Chips. In einem Chip aus molekularer Elektronik, der nach den herkömmlichen Konzepten arbeiten würde, wäre diese wohl noch viel gravierender. Stattdessen sind in der molekularen Elektronik fundamentale andere Konzepte gefragt. Wie im oben genannten Beispiel können molekulare Schaltelemente auf der mechanischen Bewegung von Molekülteilen basieren.

In einem anderen neuen Ansatz versucht man sich quantenmechanische Interferenzeffekte zu Nutze zu machen. Ein Beispiel für solche quantenmechanischen Interferenzeffekte in der molekularen Elektronik haben Physiker an der Universität Regensburg in theoretischen Modellrechnungen untersucht: Sie studierten als Modellsystem das relativ einfache Benzol-Molekül (siehe [6]). Die für die Entdeckung wichtige Eigenschaft des Moleküls ist, dass es zwei elektronische, quantenmechanische Zustände bei der gleichen Energie besitzt. Erst dadurch können die quantenmechanischen Interferenzeffekte beobachtet werden. Die neue Funktionalität, die die Forscher bei ihrer Arbeit am Benzolmolekül entdeckten, besteht darin, dass unter bestimmten Umständen einer der beiden Zustände nicht an beide Elektroden koppelt. Ein Elektron, das auf seinem Weg durch das molekulare Bauelement einmal in diesen Zustand gerät, wird gleichsam darin gefangen und kann das Bauelement nicht passieren. Da sich zwei Elektronen gegenseitig abstoßen, ist es in dieser Situation auch für andere Elektronen unmöglich, das Bauelement zu passieren, so dass der Stromfluss unterbunden ist. Man spricht dann von einer Blockade-Situation. Das Besondere an dem Interferenz-Bauelement ist, dass diese Blockade abhängig von der an eine weitere Elektrode angelegten Spannung selektiv aufgehoben werden kann. Damit ist es dem herkömmlichen Transistor nicht unähnlich, nur dass der Effekt auf völlig anderen physikalischen Effekten beruht.



6 Illustration des Interferenz Einzel-Elektronen-Transistors bestehend aus einem Benzolmolekül (Molekülstruktur in der Mitte), das zu zwei Elektroden (Source S und Drain D) kontaktiert ist. Die blauen Strukturen symbolisieren die Kopplung eines elektronischen Zustandes an die Elektroden. Für bestimmte Parameter kann ein Elektron zwar vom Source-Kontakt auf das Molekül gelangen, von dort aber nicht mehr entweichen. Dadurch wird der Stromfluss durch das Bauelement blockiert.

Dieser Interferenz Einzel-Elektronen-Transistor, wie er genannt wird, ist ein Beispiel für ein einfaches Modellsystem, das man noch ohne aufwändige Computersimulationen rechnen kann. Der Vorteil liegt darin, dass man direkt mit den zugrunde liegenden physikalischen Mechanismen arbeitet und die physikalischen Ursachen für den beobachteten Effekt direkt identifizieren kann, was bei komplexen Simulationsrechnungen oft nur begrenzt möglich ist.

Andererseits möchte man als komplexeren Ansatz zum direkten Vergleich zu konkreten Experimenten realistische Systeme modellieren, d.h. eine konkrete molekulare Struktur in seinen elektronischen Eigenschaften möglichst genau simulieren. Auch die Kombination beider Ansätze ist sehr vielversprechend für die Zukunft: Man versucht zunächst ein kontaktiertes Molekül mit allen Einzelheiten atomar genau zu simulieren, um mit den daraus gewonnenen System-Parametern einfachere Modellrechnungen zu füttern, die dann den Stromfluss durch das Molekül wiedergeben und so zum eigentlichen Verständnis der molekularen Elektronik beitragen.

Solche aufwändigen Computersimulationen in der molekularen Elektronik werden ebenfalls von mehreren Arbeitsgruppen an der Universität Regensburg durchgeführt. Sie sind damit an der Schnittstelle zwischen den Bereichen der molekularen Elektronik und von Computational Science, letzteres wird im nächsten Abschnitt beschrieben.

Selbstverständlich sind diese Anstrengungen noch im Pionierstadium und vielleicht vergleichbar mit dem Stand der Halbleiterphysik des Jahres 1950. Andererseits könnte hieraus in der Tat eines Tages wieder eine völlig neue Technologie erwachsen.

Computational Science und Entwicklung von Supercomputern

In den modernen Naturwissenschaften lassen sich viele der wichtigsten Aufgabenstellungen nur durch den massiven Einsatz von Computern bewältigen, weshalb Neuentwicklungen im High Performance Computing (HPC) eine zentrale Rolle spielen.

Hierbei unterscheidet man grob gesprochen zwei Stoßrichtungen, nämlich Capacity Computing und Capability Computing. Beim Capacity Computing geht es um die Bewältigung einer immer größeren Menge an Rechenjobs mit möglichst geringen Kosten. Hierbei spielt gegenwärtig vor allem der Energieverbrauch pro Rechenoperation (gemessen in Flops pro Watt; Flops = **F**loating point **o**perations per **s**econd) eine entscheidende Rolle. Beim Capability Computing geht es hingegen darum, auf einen einzelnen Job so viel Rechenzeit zu konzentrieren, dass die Rechnung in einem vernünftigen Zeitraum, z. B. einem Jahr, bewältigt werden kann. Dies erfordert die hocheffiziente Vernetzung sehr vieler Prozessoren, so dass ein Job auf z. B. 1024 Prozessoren tatsächlich etwa tausendmal so schnell läuft wie auf einem einzelnen Prozessor und sich der Bearbeitungszeitraum in diesem Beispiel von tausend Jahren auf ein Jahr reduziert. Die Regensburger Universität hat sich in beiden Bereichen profiliert.

Capacity Computing

In allen Naturwissenschaften ist der Bedarf an Rechenleistung in den letzten Jahren rasant gestiegen. In Regensburg zeigt sich dies vor allem in den Forschungsschwerpunkten Computational Genomics, Computational Nanoscience und Theoretische Teilchenphysik. Abzulesen ist diese Entwicklung z. B. an der immer stärkeren Auslastung des Rechner-Clusters ATHENA des Rechenzentrums der Universität, der dringend durch einen neuen Cluster entlastet werden muss (das *iDataCool*-Projekt, siehe unten). Die bearbeiteten wissenschaftlichen Fragestellungen sind die folgenden:

Computational Genomics

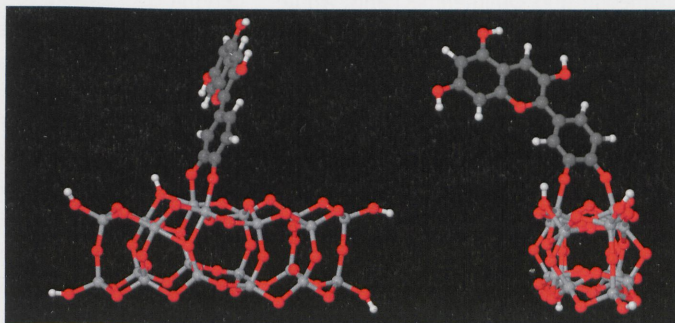
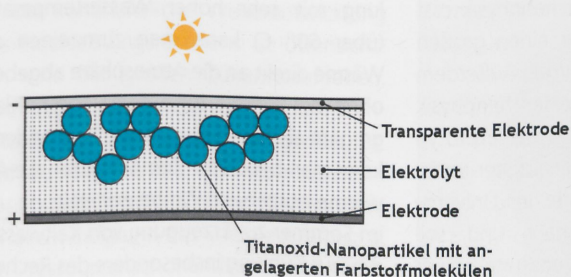
Zur Beantwortung vieler Fragen der Grundlagenforschung wie auch der praktischen, insbesondere medizinischen Anwendung, ist es notwendig, die Steuerungskreise und den Informationsfluss innerhalb von Zellen besser zu verstehen. Das spektakulärste Beispiel ist sicher die Möglichkeit einer individuellen Krebstherapie. Krebs ist im Wesentlichen eine Störung des Steuerungskreises einer Zelle. Wüsste man an welcher Stelle diese Störung genau auftritt, z. B. dadurch, dass ein spezielles Protein nicht mehr produziert wird, so könnte man eventuell dort gezielt intervenieren, statt die Zellen pauschal abzutöten. Man gewinnt Informationen über die zellinternen Regelkreise, indem man z. B. diese vorsätzlich stört und dann beobachtet welche Korrelationen auftreten. Löst z. B. Protein A die Synthese von Protein B aus, dann wird immer wenn die Produktion von A aussetzt, auch die von B aussetzen. Die Aufgabe aus Hunderten derartiger Beobachtungen das Synthese-Netzwerk einer Zelle zu deduzieren ist ein statistisch/kombinatorisches Problem zu dessen Bewältigung man sowohl ausreichende Computer-Leistungen und große Datenspeicher als auch eine Verbesserung der verwendeten mathematischen Verfahren benötigt. Vor diesem Hintergrund wurde in Regensburg ein interdisziplinärer Studiengang „Computational Science“ eingerichtet, in dem derartige komplementäre Aspekte den Studierenden vermittelt werden. Ein anderes typisches Beispiel für die Notwendigkeit eines fachübergreifenden Zugangs ist das weite Gebiet der Modellierung. Mathematiker und Theoretische Physiker haben gelernt, komplexe Mechanismen in

mathematische Modelle zu übersetzen. Biologen und Mediziner verfügen über detaillierte Kenntnisse der Vorgänge in Zellen. Gemeinsam können sie Modelle entwickeln, die möglichst realistisch sind und eine effiziente numerische Behandlung ermöglichen.

Computational Nanoscience

Das Fachgebiet der computergestützten Nanowissenschaft befasst sich mit Struktur und Eigenschaften von Materialien, die nur eine Ausdehnung von wenigen Nanometern aufweisen (zum Vergleich: Ein rotes Blutkörperchen ist tausendfach größer). Inzwischen gibt es eine ganze Reihe solcher Nanopartikel, z. B. Nanoröhren und -drähte, Graphenbänder oder Quantenpunkte. Diese können gezielt hergestellt, manipuliert und in ihren Eigenschaften verändert werden. Einige dieser neuartigen Strukturen haben bereits ihren Weg in die industrielle Verwertung gefunden, obwohl die Wirkprinzipien auf der atomaren Ebene oft noch ungeklärt sind. Hier setzt die *Computational Nanoscience* an. Die zugrundeliegenden Gleichungen sind dabei bekannt; sie lassen sich allerdings nur durch den Einsatz von modernen Parallelrechnern praktisch lösen. Nanopartikel weisen nämlich trotz ihrer mikroskopischen Größe immer noch Tausende von miteinander wechselwirkenden Elektronen auf, deren Beschreibung eine quantenmechanische Behandlung erforderlich macht.

Ziele und Vorgehensweise der computergestützten Nanowissenschaft lassen sich am Beispiel der Photovoltaik näher erläutern. Gewöhnliche Solarzellen, wie sie sich mittlerweile auf vielen Hausdächern finden, basieren auf hochreinen Silizium-



7 Links: Aufbau einer Farbstoffsolarzelle. Die Absorption von Sonnenlicht durch ein Farbstoffmolekül führt zur Anregung von Elektronen, die auf benachbarte Titanoxid-Nanopartikel übergehen und schließlich die obere Elektrode erreichen. Die im Molekül verbliebene Elektronenvakanz wird über den Elektrolyt neutralisiert, welcher wiederum an der unteren Elektrode regeneriert wird. Auf diese Weise entsteht eine nutzbare elektrische Spannung.

Rechts: Zwei Ansichten des Resultats einer quantenmechanischen Simulation der Bindung eines Cyanidin-Farbstoffmoleküls an einen Titanoxid-Nanodraht mit der energetisch günstigsten Bindungskonfiguration.

schichten, die industriell unter hohem Kostenaufwand in speziellen Reinräumen hergestellt werden. Eine kostengünstige und technologisch weniger anspruchsvolle Alternative bilden sogenannte Farbstoffsolarzellen (siehe [7]). Diese bestehen im Wesentlichen aus Titanoxid-Nanopartikeln in einer Elektrolytlösung, auf die eine Schicht von organischen Farbstoffmolekülen aufgebracht wird. Diese Moleküle absorbieren das Sonnenlicht, was zu einer Trennung von positiven und negativen Ladungsträgern führt. Mit Hilfe von quantenmechanischen Simulationen versucht man nun Faktoren zu ermitteln, die einen schnellen Abtransport der Ladungsträger begünstigen, bevor es zur unerwünschten Rekombination unter Energieverlust kommt. Dazu werden systematisch verschiedene Moleküle und Oberflächenstrukturen untersucht und deren unterschiedliche Bindungskonfigurationen berücksichtigt. Eine weitere Effizienzsteigerung lässt sich durch die optimale Ausnutzung des Sonnenlichtes erreichen: Das Ziel ist, Farbstoffmoleküle so zu modifizieren, dass deren Absorptionsspektrum maximal mit dem Sonnenspektrum überlappt. Solche Simulationen gehen dabei über einen heuristischen Ansatz nach Versuch und Irrtum hinaus und haben den Anspruch systematische Trends offenzulegen. Im konkreten Beispiel müssen dazu Elemente der Oberflächenphysik und Photochemie kombiniert werden; die Themen und Methoden der computergestützten Nanowissenschaften sind daher oft interdisziplinär.

Theoretische Teilchenphysik

Die Theoretische Teilchenphysik benötigt extreme Rechenleistungen auf verschiedenen Rechnerarchitekturen. Zum Hintergrund: Aus der Vereinigung von Relativitätstheorie und Quantenmechanik wurde im Laufe des 20. Jahrhunderts die Quantenfeldtheorie entwickelt, die als *Standardmodell* die Grundlage der gesamten Physik und streng genommen aller Naturwissenschaften bildet. Durch ein mathematisches Verfahren, nämlich die analytische Fortsetzung der Größe *Zeit* zu imaginären Zahlen (dies sind Zahlen, deren Quadrat negativ ist), kann man viele Probleme der Quantenfeldtheorie auf Probleme der statistischen Physik abbilden, die man dann rein numerisch behandeln kann. Am Ende erhält man Resultate, die man direkt mit den Reaktionswahrscheinlichkeiten vergleichen kann, die an den großen Teilchenbeschleunigern gemessen werden.

Tatsächlich ist der Erkenntnisgewinn durch derartige Rechnungen vergleichbar zu dem durch direkte Hochenergie-Experimente, für die jedes Jahr viele hundert Millionen Dollar ausgegeben werden. Deshalb ist der Einsatz von zig Millionen Dollar pro Jahr weltweit für derartige Rechnungen ausgesprochen sinnvoll, und dies definiert die Größenordnung, die man sich vergegenwärtigen muss, wenn von HPC in der Teilchenphysik die Rede ist.

Computerentwicklung

Im Bereich des Capacity computing dominieren heute Clusterrechner, die inzwischen typischerweise eine Hybridstruktur aus CPU- und GPU-Prozessoren haben. CPUs (**C**entral **P**rocessing **U**nits) sind die eigentlichen Computer-Chips, auf denen Rechnungen z.B. auf einem handelsüblichen PC durchgeführt werden. GPUs (**G**raphics **P**rocessing **U**nits) sind die extrem leistungsstarken Prozessoren, die für moderne Computerspiele entwickelt wurden (Marktführer ist Nvidia). GPUs haben ein sehr viel besseres Preis-Leistungsverhältnis, sind aber weniger universell einsetzbar. Sie haben sehr viele vergleichsweise kleine Prozessoren auf einem Chip, was das Programmieren mitunter deutlich erschwert. Gegenwärtig werden CPUs mit immer mehr Unterprozessoren entwickelt, während gleichzeitig qualitativ besonders hochwertige GPUs speziell für den Einsatz im HPC-Bereich entwickelt werden, so dass sich die Unterschiede verwischen. Auch gibt es bereits Chips, die GPUs und CPUs kombinieren, und generell scheinen den CPU/GPU-Hybridstrukturen die Zukunft zu gehören. Daher ist es für Forschung und Lehre notwendig, beide Architekturen zu beherrschen. In der Computational Nanoscience gibt es bereits langjährige Erfahrungen mit dem Einsatz von GPUs in Regensburg, während in der Teilchenphysik erst vor kurzem ein Antrag für einen großen Hybrid-Cluster gestellt wurde. Außerdem wird gegenwärtig von der Teilchenphysik in Zusammenarbeit mit IBM der Prototyp (*iDataCool*) eines neuartigen Cluster-Rechners entwickelt. Dieser wird im Universitätsrechenzentrum aufgebaut und soll neue Standards für die sogenannte *power usage effectiveness* von Großrechnern setzen, unabhängig von den gewählten Prozessoren.

Das gravierendste Problem im HPC Bereich ist der immense Energieverbrauch moderner Rechner (in der Spitzengruppe mehrere Megawatt), der zu entsprechend



8 Ein QPACE-Rack mit 256 Prozessoren und einer Rechenleistung von 25.6 Teraflops

hohen Anforderungen bei der Kühlung führt. Deshalb ist die Reduktion der benötigten Watt pro Flop eine der zentralen Designaufgaben moderner Rechner. *iDataCool* realisiert erstmalig eine besonders vielversprechende Option: Durch eine Wasserkühlung mit sehr hoher Wassertemperatur (über 60° C) kann man zum einen die Wärme direkt an die Atmosphäre abgeben, ohne viel Energie für aufwändige Kühlaggregate einsetzen zu müssen. Zum anderen kann man bei diesen Temperaturen die Abwärme nutzen, im Winter zur Heizung und im Sommer zur Erzeugung von Kaltwasser, d.h. zur Kühlung insbesondere des Rechenzentrums selbst. *iDataCool* ist auch ein Prototyp für den neuen Landesgroßrechner des Leibniz-Rechenzentrums in Garching.

Capability Computing

Im Bereich des Capability Computing hat sich Regensburg vor allem durch die Ent-

wicklung des Rechners QPACE einen Namen gemacht (siehe [8]). QPACE verwendet PowerXCell-8i-Prozessoren, das sind Weiterentwicklungen der Prozessoren der Playstation 3. Diese werden durch sogenannte FPGAs in einem dreidimensionalen Netzwerk miteinander verbunden. Ein FPGA ist ein Prozessor, deren Architektur nicht feststeht, sondern je nach Anwendung verschieden konfiguriert werden kann. Die FPGAs ermöglichen die Realisierung sehr guter Skalierungseigenschaften und eine sehr kurze Entwicklungszeit. QPACE besitzt ebenfalls eine neuartige Wasserkühlung und war für ein Jahr (Nov. 2009–Nov. 2010) auf Platz 1 der Green 500-Liste und damit der energie-effizienteste Großrechner weltweit. QPACE wurde von einem Konsortium aus verschiedenen Firmen, Forschungszentren und Universitäten entwickelt. Besonders wichtig waren die Beiträge von IBM, Regensburg, DESY und dem Forschungszentrum Jülich. Die Leitung des Projekts lag in Regensburg. Die Finanzierung auf Universitätsseite erfolgte überwiegend aus Mitteln des SFB/TR-55 der Universitäten Regensburg und Wuppertal. Die gesamte installierte Rechenleistung beträgt 0.2 Petaflop (1 Petaflop sind eine Million Milliarden Flops). Zukünftig wird sich Regensburg zusammen mit dem Forschungszentrum Jülich an der Entwicklung des europäischen Exaflop-Rechners beteiligen (1 Exaflop sind eine Milliarde Milliarden Flops). Im Rahmen dieser Zusammenarbeit wurde vor kurzem eine Professur nach dem „Jülicher Modell“ eingerichtet (Bezahlung durch das FZ Jülich, Professur in Regensburg). Langfristig soll die international beachtete Rolle der Universität Regensburg bei der Entwicklung von Supercomputern durch diese und andere Maßnahmen weiter gestärkt werden.

Die kontinuierliche Weiterentwicklung des Hochleistungsrechnens ist offensichtlich eine der großen Zukunftsaufgaben. Auch wenn die traditionelle Silizium-Technologie noch keineswegs ausgereizt ist, sind die Grenzen des Wachstums auch in diesem Gebiet bereits heute stark spürbar, vor allem aufgrund des Energieverbrauchs. Am ressourcenschonendsten sind Fortschritte in der Angewandten Mathematik und den theoretischen Naturwissenschaften. So haben sich in den letzten Jahren z. B. Hinweise verdichtet, dass man bestimmte Aufgabenstellungen der numerischen Teilchenphysik auf äquivalente Rechnungen in der Stringtheorie abbilden und



Prof. Dr. **Dieter Weiss** studierte in Ulm und München Physik, promovierte 1987 an der TU München und habilitierte 1993 in Stuttgart zu Transporteigenschaften nanostrukturierter Elektronensysteme. Seit 1995 ist er Lehrstuhlinhaber in Regensburg und auf dem Grenzgebiet zwischen Magnetismus und Halbleiterphysik tätig. Dies führte zur Etablierung einer DFG-Forschergruppe und zur Einrichtung des Sonderforschungsbereichs 689 „Spinphänomen in reduzierten Dimensionen“, deren Sprecher er seit 2006 ist.

Forschungsschwerpunkte: niederdimensionale Elektronensystemen, Ferromagnet-Halbleiter Hybridsysteme, ferromagnetische Halbleiter, Spintronik.



Prof. Dr. **Andreas Schäfer**, geboren 1957 in Frankfurt a. M., Studium der Theoretischen Physik in Frankfurt, Promotion 1985 an der Universität Frankfurt mit einer Arbeit zur Paritätsverletzung in Cäsium-Atomen. 1986–1991: Tolman-Prize-Fellow am Caltech, Pasadena, USA; Heisenberg-Stipendium (DFG); G. Hess-Preis (DFG); Mitglied des MPI für Kernphysik, Heidelberg; Habilitation. 1991 Professur für Theoretische Physik (C3) Frankfurt. Seit 1997 Lehrstuhl für Theoretische Physik Universität Regensburg. 2001 „Eminent Scientist Award“ RIKEN, Japan; 2008, Gastprofessur am Yukawa Institute, Kyoto; 2002–2009 Sprecher der DFG-Forschergruppe „Lattice Hadron Phenomenology“; Seit 2008 Sprecher des SFB/TR-55 „Hadron Physics from Lattice QCD“.

Forschungsschwerpunkte: Quantenchromodynamik, d. h. die fundamentale Theorie der Quarks, der Gluonen und ihrer Wechselwirkung. Einsatz diverser Techniken: Gitter-QCD, störungstheoretische QCD, effektive hadronische Modelle, Stringtheorie; Bau energiesparender Hochleistungsrechner.



Prof. Dr. **Jascha Repp** promovierte 2002 auf Gebiet der Tieftemperatur-Rastertunnelmikroskopie an der FU Berlin. Danach wechselte zum IBM Forschungslabor in Zürich, wo er für fünf Jahre an der Rastertunnel-Mikroskopie und -Spektroskopie von Atomen und Molekülen auf ultradünnen isolierenden Salzsichten arbeitete. Seit 2007 hat er eine Lichtenberg-Professur an der Universität Regensburg inne, wo er die lokale Spektroskopie auf der molekularen Ebene vorantreibt.

Forschungsschwerpunkte: Tieftemperatur-Rastertunnelmikroskopie, molekulare Elektronik, molekulare Spintronik und Adsorbate auf dünnen Isolatorschichten.



Prof. Dr. **Christoph Strunk** promovierte 1992 an der Universität Karlsruhe mit einer Arbeit über das Wechselspiel von Supraleitung und Magnetismus in dünnen Metallfilmen. Bei Forschungsaufenthalten in Leuven/Belgien (1993–1996) und Basel/Schweiz (1996–2000) kam er mit der Physik kleiner Strukturen in Kontakt. 2000 wurde er Professor für Experimentalphysik in Regensburg und befasst sich mit elektrischen Transportphänomenen in Nanostrukturen bis herab zur molekularen Ebene. 2007–2009 Sprecher des Graduiertenkollegs „Nichtlinearität und Nichtgleichgewicht in kondensierter Materie“.

Forschungsschwerpunkte: Quantentransport in Nanostrukturen, insbesondere in Supraleitern und Hybridsystemen aus Kohlenstoff-Nanoröhren mit supraleitenden und ferromagnetischen Systemen und molekulare Elektronik.



Prof. Dr. **Thomas Niehaus** promovierte 2001 in Heidelberg und Paderborn über Probleme der zeitabhängigen Dichtefunktional-Theorie. Während seiner Assistentenzeit in Paderborn war er Gastwissenschaftler an der Università degli Studi di Roma Tor Vergata in Rom, an der University of Cambridge, dem Quantum Protein Center in Kopenhagen, und an der City University of HongKong. Anschließend war er Leiter der Arbeitsgruppe „Elektronendynamik in komplexen Systemen“ am Zentrum für Computergestützte Materialwissenschaft in Bremen. Seit 2010 ist er Professor für Theoretische Physik an der Universität Regensburg, wo er sich insbesondere mit numerischen Methoden der kondensierten Materie befasst.

Forschungsschwerpunkte: theoretische Beschreibung der Licht-Materie-Wechselwirkung in Nanostrukturen, Methodenentwicklung im Bereich der zeitabhängigen Dichtefunktional-Theorie, Molekulare Elektronik, Kombination von Halbleitern mit biologischen Materialien.



Prof. Dr. **Tilo Wettig**, geb. 1966 in Borna, 1988–1990 Studium der Physik an der Universität Tübingen, 1990–1994 Studium der Physik und 1994 Promotion in Physik an der Stony Brook University (New York, USA). 1995–1996 Postdoc am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg, 1997–1999 Postdoc an der Technischen Universität München, 1998 Habilitation an der Universität Heidelberg, 1999 Heisenberg-Stipendium der Deutschen Forschungsgemeinschaft. 1999–2003 Assistant Professor an der Yale University, 2003–2004 Associate Professor an der Yale University, 1999–2004 Fellow des RIKEN-Brookhaven Research Centers, seit 2004

Professor am Institut für Theoretische Physik der Universität Regensburg. 2008–2009 Gastprofessor am KEK (Tsukuba, Japan) und an der Universität Tokio (Japan).

Forschungsschwerpunkte: Quantenfeldtheorie, insbesondere Quantenchromodynamik und deren numerische Simulation (Gitter-QCD); Effektive Feldtheorien; Mathematische Physik, insbesondere Zufallsmatrix-Theorie; Hochleistungsrechnen; Design und Entwicklung von Supercomputern für Gitter-QCD.

dann mit minimalem numerischen Aufwand lösen kann. Entsprechende Beispiele lassen sich in fast allen Teilgebieten finden, so ist z. B. in der Genomik die Entwicklung besserer Reaktionsmodelle genauso wichtig wie die Steigerung der genutzten Rechenleistung. Fortschritte bei den mathematischen Verfahren und verwendeten Algorithmen können ebenfalls die erforderliche Rechenleistung für einzelne Projekte um Größenordnungen senken. Deshalb ist es ein bedeutender Vorteil, dass in Regensburg die Angewandte Mathematik eng mit den Naturwissenschaften zusammenarbeitet.

Trotz all dieser Fortschritte sind langfristig jedoch fundamentale Neuerungen in der Computer-Technologie notwendig, um dem wachsenden Bedarf gerecht zu werden. Besonders große Hoffnungen setzt man in die Entwicklung von Quantencomputern, die nach vollkommen anderen Regeln arbeiten als klassische Computer. Gegenwärtig ist nicht absehbar, ob es jemals einen universellen Quantencomputer geben wird, aber dies ist klarerweise einer der in der Einleitung angesprochenen Fälle, in denen die heutige Grundlagenforschung das Potential hat, das Leben auf der Erde in z. B. hundert Jahren grundlegend zu prägen. In Regensburg wird auch Forschung betrieben, die dazu signifikant beitragen könnte.

Literaturauswahl

M. Ciorga, C. Wolf, A. Einwanger, M. Utz, D. Schuh, D. Weiss, AIP Advances 2011, 1, S. 22113: Local spin valve effect in lateral (Ga,Mn)As/GaAs spin Esaki diode devices, American Institute of Physics.

S.-H. Jhang, M. Marganska, Y. Skourski, D. Preusche, B. Witkamp, M. Grifoni, H. van der Zant, J. Wosnitza, C. Strunk, Spin-orbit interaction in chiral carbon nanotubes probed in pulsed magnetic fields. In: Physical Review B 2010, 82, S. 041404 1–4, American Physical Society.

P. Liljeroth, J. Repp, and G. Meyer, Current-Induced Hydrogen Tautomerization and Conductance Switching of Naphthalocyanine Molecules. In: Science 2007, 317, S. 1203–1206, Washington DC/American Association for Advancement of Science.

Chemische Synthese in einer Welt ohne Öl

Kohlenhydrate als Rohstoffquelle

Burkhard König, Werner Kunz, Oliver Reiser

Die Basis unserer Rohstoffe ist in einem rapiden Wandel begriffen, da fossile Ressourcen zu Ende gehen und durch regenerative Rohstoffe ersetzt werden müssen. Dies erfordert ein Umdenken in der Chemie, das durch Grundlagenforschung erarbeitet werden muss. Viele Produkte und Materialien unseres täglichen Lebens werden durch chemische Synthese aus dem fossilen Rohstoff Öl gewonnen. Rund drei Prozent des gefördert Öls wird dafür genutzt, der weitaus größte Teil dient zur Erzeugung von Energie. Aber unsere Ölreserven sind endlich. Je nach globaler wirtschaftlicher Entwicklung verfügen wir noch über ökonomisch förderbare Ölreserven für 35–60 Jahre. Trotz des geringen Anteils der chemischen Synthese am Ölverbrauch besteht eine direkte Abhängigkeit: Der Rohstoff Öl lässt sich nicht für die Chemie reservieren; die Nutzung und der Ölpreis werden auf den globalen Märkten im Wettbewerb entschieden. Die chemische Synthese muss sich daher rechtzeitig an Veränderungen der Rohstoffsituation anpassen.

Dies geschieht nicht zum ersten Mal. In der Entwicklung chemischer Synthesen und Verfahren haben sich die Ausgangsmaterialien in den vergangenen 150 Jahren mehrfach verändert. So entwickelte sich die Farbenchemie aus den Rückständen der Leuchtgasherstellung, die zum Betrieb von Gaslaternen nötig war. Später wurde über das Reppe-Verfahren die Grundchemikalie Benzol aus Acetylgas zugänglich, welches wiederum aus Kohle hergestellt werden kann. So war ein Weg vom Roh-

stoff Kohle in die Aromatenchemie gefunden. Mit diesen Verfahren gelang es jeweils, aus einem gut und preiswert verfügbaren fossilen Rohstoff wichtige Grundchemikalien zugänglich zu machen, die Ausgangsmaterialien für chemische Folgeprodukte darstellen. Die Frage nach Energieeffizienz, Umweltschutz und nachhaltiger Ressourcenschonung wurde meist nur aus wirtschaftlicher und regulatorischer Sicht beantwortet: Die Verfahren mussten unter den gegebenen gesellschaftlichen Rahmenbedingungen wirtschaftlich erfolgreich sein.

Der in den nächsten Jahren erneut nötige Wandel der Rohstoffbasis in der Synthesechemie muss sich dagegen dem Kriterium der nachhaltigen Entwicklung stellen. Neue Verfahren werden nur dann eine breite gesellschaftliche Akzeptanz finden, wenn sie neben wirtschaftlichem Erfolg auch umweltschonend und nachhaltig sind. Es ist daher nicht nur eine technisch machbare Lösung gefordert, sondern der Aufbau effizienter geschlossener chemischer Stoffkreisläufe: Ausgangsmaterialien für die Synthese müssen aus gut verfügbaren Ressourcen ohne Konkurrenz zur Nahrungserzeugung umweltschonend gewonnen werden und über intermediäre Feinchemikalien effizient in chemische Produkte umgewandelt werden, die nach ihrer Nutzung gefahrlos recycelt oder abgebaut werden, um den Stoffkreislauf zu schließen.

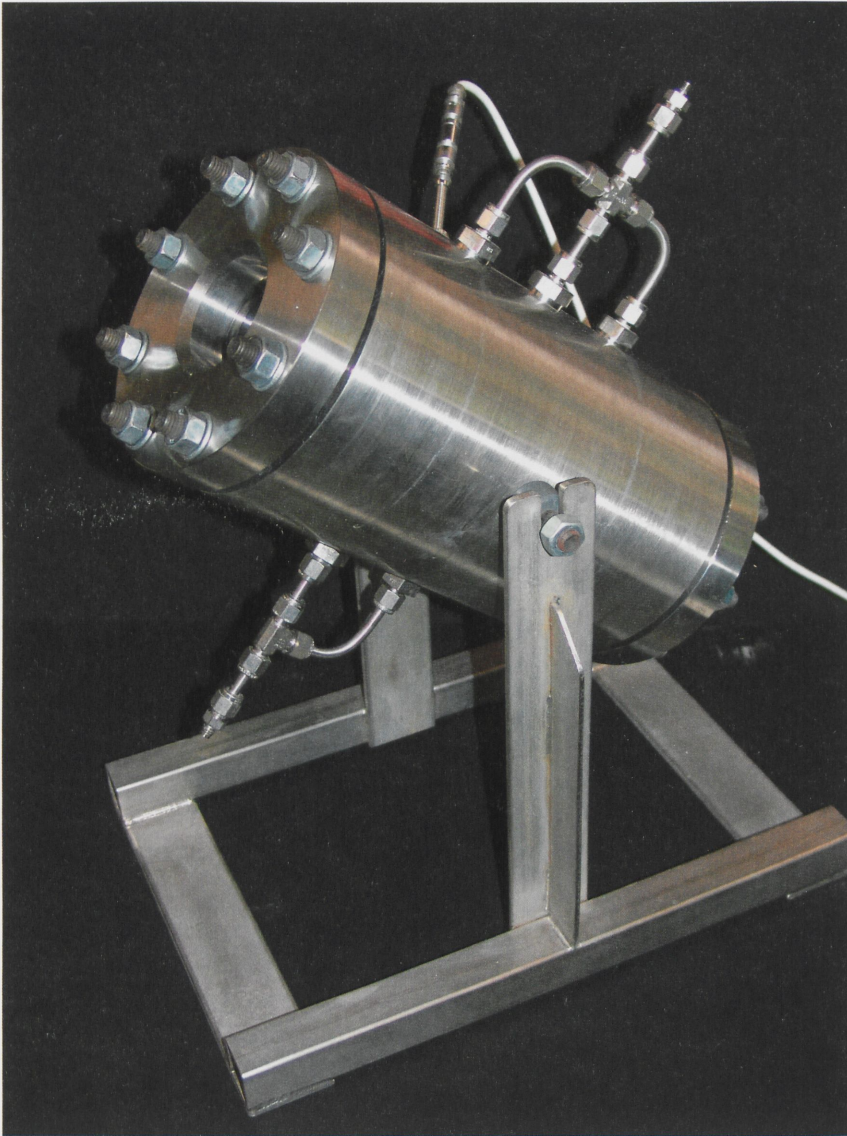
Während sich die Notwendigkeit chemischer Kreisläufe bei seltenen Metallen bereits jetzt stellt, beruht die auf Kohlenstoffverbindungen basierende organische Synthese noch weitgehend auf der Nut-

zung von fossilen Kohlenstoffquellen, überwiegend Öl. Die Syntheseprodukte gehen nach der Nutzung durch Abbau oder Verbrennung in Kohlendioxid über. Um den Kohlenstoffstrom von diesem offenen System in einen Kreislauf zu überführen, ist es nötig, gut verfügbare pflanzliche Kohlenstoffquellen direkt für die chemische Synthese zu nutzen und so den Umweg über die fossilen Kohlenstoffquellen Öl und Kohle zu umgehen.

Wir diskutieren in diesem Beitrag mit Bezug zu unserer Forschungstätigkeit drei zentrale Herausforderungen aus dem Bereich der Grundlagenforschung, die bewältigt werden müssen, um das Ziel einer nachhaltigen organischen Synthesechemie zu erreichen.

Lösen von Biomolekülen

Im Unterschied zu Erdöl sind nachwachsende Rohstoffe oft von einer hohen Komplexität. Pflanzen enthalten nicht nur Fette, sondern eine Vielzahl von kompliziert aufgebauten chemischen Substanzen und auch von natürlichen, sehr langkettigen Molekülen, den Biopolymeren wie Eiweißen, Stärke, Chitin, Lignin, Suberin und viele andere mehr. Das Problem ist, dass man diese Moleküle oft mit nicht sehr umweltschonenden Verfahren (hohe Temperatur, Zusatz von mehr oder weniger giftigen Stoffen) zunächst zerkleinern oder chemisch verändern muss, um sie weiter verarbeiten zu können. So ist etwa die Herstellung von Zellstoff und Papier trotz vieler Fortschritte kein „grüner“ Prozess.



1 Anlage zur Extraktion mit überkritischem Kohlendioxid

Wir widmen uns deshalb der Frage, wie man Naturstoffe und vor allem Polymere aus Pflanzen auf umweltfreundliche Weise heraus und in eine flüssige Lösung hinein bringen kann, um sie dann weiter zu verarbeiten.

Wie aktuell dieses Thema ist, zeigt, dass zum Beispiel die BASF ein neues Verfahren gerade zur Produktionsreife entwickelt hat, in dem Zellulose in einer sogenannten Ionischen Flüssigkeit gelöst wird. Eine Ionische Flüssigkeit ist ein Salz, das nicht wie die meisten anderen Salze, etwa Kochsalz, erst bei mehreren hundert Grad schmilzt, sondern schon unter hundert Grad und deshalb als Lösungsmittel verwendet werden kann. Allerdings ist das von der BASF favorisierte Salz nur bedingt umweltfreundlich, da es was die Bioabbaubarkeit betrifft, nicht als „grün“ eingestuft werden kann. Immerhin ist der Pro-

zess so konzipiert, dass die Ionische Flüssigkeit vollständig recycelt werden soll und somit (in der Theorie) nie in die Umwelt gelangt.

Sehr viel interessanter werden solche neuartigen Lösungsmittel immer dann, wenn sie sowohl Biopolymere lösen können als auch selber umweltfreundlich sind. Dies gilt zum Beispiel für Cholinhexanoat, ein Salz, das nur wenig oberhalb der Raumtemperatur schmilzt. Das Cholin ist ein Nahrungsmittelzusatzstoff (in vielen Supermärkten rezeptfrei als „Gehirnbooster“ erhältlich) und das Hexanoat eine einfache, natürliche Fettsäure. In diesem flüssigen Salz lösen sich zum Beispiel wertvolle Korkabfälle, die man zu interessanten neuen Produkten weiter verarbeiten kann. Eine weitere Möglichkeit, neue „Biolösungsmittel“ mit geeigneten Lösungseigenschaften für wertvolle Biomoleküle herzustellen, besteht darin, Feststoffe

zu mischen, die in der Mischung einen wesentlich niedrigeren Schmelzpunkt aufweisen, sogenannte „tiefe eutektische Gemische“. Darauf wird im folgenden Abschnitt näher eingegangen.

Neben der Herausforderung, Biomoleküle mit solchen natürlichen Solventien der weiteren Verarbeitung zugänglich zu machen, ist der allgemeine Ersatz erdölbasierter Lösungsmittel ein weiteres wichtiges Forschungsfeld. Jedes Jahr werden in Deutschland viele Tausend Tonnen Lösungsmittel in die Umwelt ausgebracht, etwa durch die Ausdünstung von Farben, Lacken, Klebern, Prozesslösungsmittel und vieles andere mehr, Stichwort VOC (Volatile Liquid Compounds). Auch wenn in den letzten Jahrzehnten ein Umdenken gerade in Deutschland eingesetzt hat hin zu effizienten Filtern und dem möglichst weitgehenden Recycling von Lösungsmitteln oder dem Vermeiden von Lösungsmitteln (Stichwort Wasserbasierte Lacke), bleibt hier noch viel zu tun. Zwei Beispiele aus unserer aktuellen Forschung mögen dies illustrieren. Zur Zeit werden die meisten wertvollen Essenzen und ätherischen Öle für die Parfüm- und Aromaindustrie mit Hilfe von Hexan aus den Pflanzen extrahiert. Sosehr dieses Lösungsmittel chemisch zum Extrahieren geeignet ist, sosehr ist es toxikologisch bedenklich, da es das Nervensystem schädigen kann. Deshalb entwickeln wir in Kooperation mit der Industrie neue umweltfreundlichere Verfahren. Zum einen kann man absolut unbedenkliches überkritisches Kohlendioxid (bei über 31 °C und einem Druck von über 74 bar) mit geeigneten weiteren umweltfreundlichen Zutaten als Alternative zu Hexan verwenden, zum andern kann sich aber auch Wasser bei Temperaturen über einhundert Grad in Mischung mit natürlichen, öligen Substanzen für Extraktionsprozesse eignen. Überhaupt ist Wasser im Temperaturbereich zwischen 100 und 250 °C ein noch wenig untersuchtes Lösungsmittel. Natürlich ist das Aufheizen energieintensiv und damit nicht ganz und gar umweltfreundlich, auf der anderen Seite ist es vom chemischen Standpunkt her das ideale „grüne“ Lösungsmittel.

Schließlich sei noch erwähnt, dass auch Ionische Flüssigkeiten wie das erwähnte Cholinhexanoat helfen können, die VOC-Problematik, also das Ausbringen von leicht flüchtigen organischen Substanzen in die Umwelt zu verringern. Ionische Flüssigkeiten haben nämlich praktisch keinen Dampfdruck, das heißt, es sind Flüssigkeiten, die

nicht verdampfen und somit keinerlei schädliche Gase in die Umwelt abgeben.

Noch ein anderer Aspekt zum Thema Nachhaltigkeit und Extraktion aus Pflanzen soll hier angesprochen werden. Die europäische und besonders die deutsche Landwirtschaft sind auf die Erzeugung von Nahrungsmitteln fokussiert, und das ist im Großen und Ganzen auch gut so, auch wenn das viele Milliarden Euro an Subventionen kostet. Allerdings wäre sicherlich Platz, um einige wenige Prozent der Anbaufläche für Pflanzen zu reservieren, aus denen man mit modernen und umweltfreundlichen Extraktionsprozessen sehr wertvolle Chemikalien wie etwa Aromen und Arzneien oder deren Vorstufen gewinnen kann. Erste Denkansätze in dieser Richtung wollen wir mit der hiesigen Landwirtschaft diskutieren. So könnte man sich vorstellen, bestimmte Schwertliliensorten (*Iris germanica*) hier zu züchten, um aus deren Wurzel wertvolle ätherische Öle (das Kilo zu 15.000 Euro) mit umweltfreundlichen Lösungsmitteln zu extrahieren. Es ist nicht einzusehen, dass die europäische

Landwirtschaft fast ausschließlich auf hochsubventionierte Produkte mit sehr wenig Wertschöpfung setzt, während andere europäische Industriezweige schon lange dem Zwang zur Erzeugung von hochpreisigen Waren unterliegen, um international konkurrenzfähig zu sein.

Chemische Reaktionen in Zuckerschmelzen

Kohlenhydrate (Zucker) sind in reiner Form und großen Mengen als Ausgangssubstanzen für chemische Prozesse aus landwirtschaftlicher Produktion verfügbar und daher ein guter Ansatzpunkt für eine neue Rohstoffbasis der Chemie. Um eine Konkurrenz zur Nahrungsmittelherstellung zu vermeiden, sollten vorrangig nicht essbare Kohlenhydrate genutzt werden. Es stellt sich aber zunächst ein viel grundlegendes Problem: Chemische Reaktionen verlaufen typischerweise nur dann mit guter Kontrolle und in ausreichender Geschwindigkeit



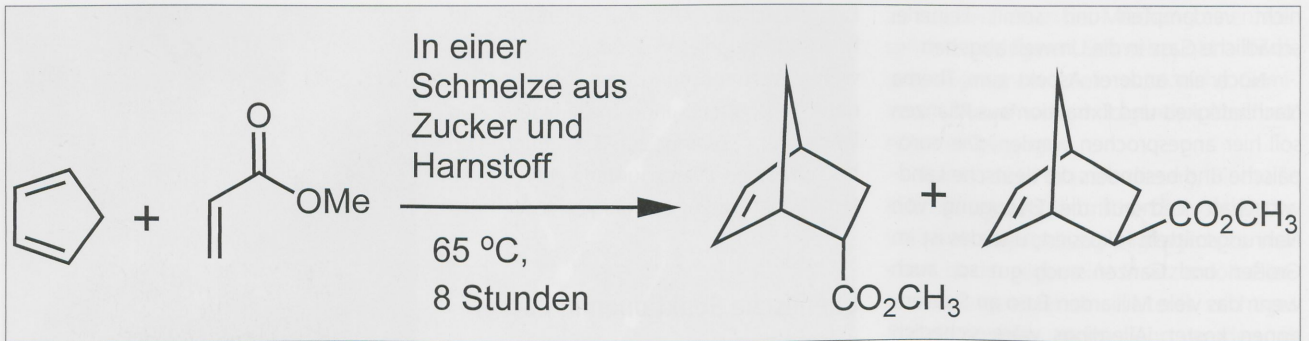
3 Eine stabile Zuckerschmelze aus Glucose und Harnstoff

ab, wenn die Reaktionspartner beide in einem Lösungsmittel gelöst vorliegen. Die hohe Polarität von Kohlenhydraten schränkt hier das Spektrum geeigneter Lösemittel stark ein. Zucker lösen sich in Wasser. In wässrigen Lösungen können aber nur wenige organische Reaktionen durchgeführt werden, womit die Anzahl möglicher chemischer Transformationen eher gering ist. Zudem wird viel Energie benötigt, um das Wasser nach erfolgter Reaktion z.B. durch Destillation oder Gefriertrocknung, wieder zu entfernen. Daher wurde bislang meist ein sehr polares organisches Lösemittel, Dimethylsulfoxid, in dem sich Zucker ebenfalls lösen, für chemische Umwandlungen verwendet. Dimethylsulfoxid ist ein teures Lösemittel und zudem toxikologisch bedenklich, da es den Transport von Substanzen durch die Haut ermöglicht. Folglich sind Produkte, die in Dimethylsulfoxidlösung hergestellt werden, teuer und für eine Nutzung in Lebensmitteln, Kosmetika oder Arzneimitteln ungeeignet.

Aber es geht auch viel einfacher: Schon im ersten Semester des Studiums lernen Chemiestudierende, dass der Schmelzpunkt einer chemischen Substanz sinkt, wenn Verunreinigungen enthalten sind. Für die Zucker gilt es hier, die Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Zuckermolekülen möglichst effektiv zu unterbrechen, denn diese sind für den hohen Schmelzpunkt verantwortlich. Durch den Zusatz von Harnstoff gelingt dies und der Schmelzpunkt der Glucose sinkt von über



2 Getrocknete Schwertlilienswurzeln, der Rohstoff für wertvolle Aromastoffe



4 Diels-Alder Reaktion in der Schmelze

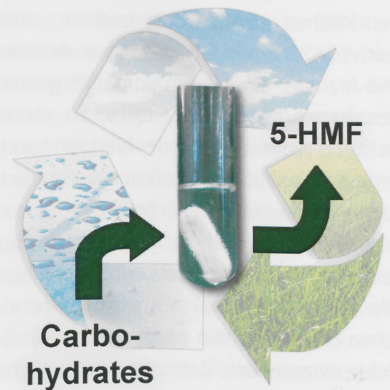
100 °C auf 65 °C. Ganz wesentlich ist dabei, dass durch den nun geringeren Schmelzpunkt die schnelle unspezifische Abspaltung von Wasser und Folgereaktionen, die zum in der Küche so geschätzten Karamellaroma führen, vollständig vermieden werden. Es entstehen stabile klare Schmelzen, die bis zu 50 % aus reinem Zucker bestehen. Damit gelingt es, Zucker ohne jegliche Lösungsmittel zu verflüssigen und für chemische Reaktionen in homogener Lösung zugänglich zu machen.

Die Zuckerschmelzen können nun genutzt werden, um organische Lösemittel, z.B. in Reinigungs- und Extraktionsprozessen oder in chemischen Synthesen zu ersetzen. Ihre Polarität entspricht in etwa den Lösemitteln Glycol oder Dimethylsulfoxid. Da sich alle Komponenten der Schmelze in Wasser auflösen, können extrahierte oder synthetisierte Produkte sehr leicht isoliert werden. Wird Wasser zugesetzt, trennt sich die organische Produktphase von den wasserlöslichen Bestandteilen. Ein Beispiel ist die Durchführung der Diels-Alder Reaktion, einer wichtigen Additionsreaktion von Alkenen und Dienen, für die typischerweise organische Lösemittel wie Toluol, genutzt werden, in der Zuckerschmelze. Die erzielten chemischen Ausbeuten und Selektivitäten sind vergleichbar.

Die Nutzung von Zuckerschmelzen als Ersatz für organische Lösemittel ist nur

eine Anwendung. Interessanter noch ist die direkte chemische Umwandlung des Zuckers in der Schmelze in ein Folgeprodukt. Eine sehr wichtige Umwandlung von Kohlenhydraten ist die Bildung von Hydroxymethylfurfural (HMF), die bereits technisch genutzt wird. Bei diesem Prozess entsteht durch Wasserabspaltung und Zyklisierung der heteroaromatische Furanring. HMF wird als mögliche Plattformchemikalie der Zukunft diskutiert, da aus dieser Substanz viele verschiedene Grundchemikalien für die chemische Synthese zugänglich sind. In einer Schmelze aus Cholinchlorid, einem weiteren Naturstoff, und dem Zucker gelingt die Umwandlung in Gegenwart geringer Mengen eines sauren Katalysators. Das Verfahren verläuft so bei sehr hohen Konzentrationen, weitgehend ohne Nebenprodukte und ausschließlich mit nachwachsenden, nicht-toxischen Substanzen.

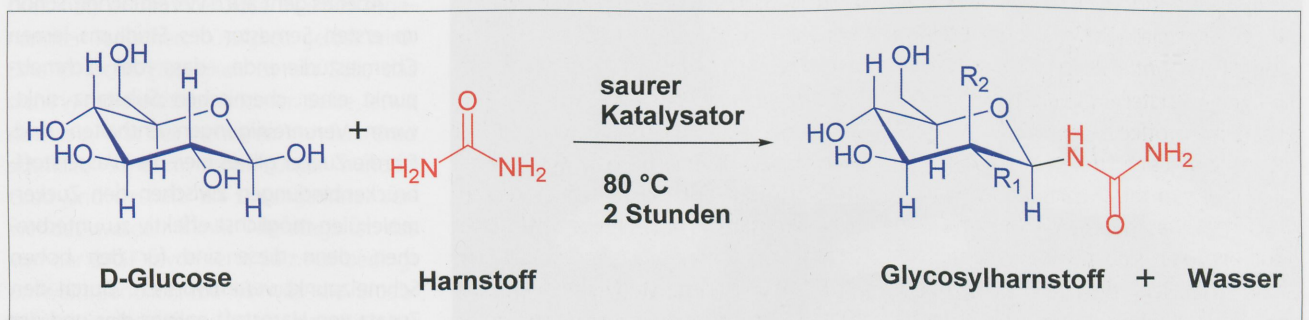
In einer Schmelze aus Zucker und Harnstoff läuft eine andere interessante Reaktion ab: Beide Komponenten der Mischung reagieren unter Abspaltung von Wasser miteinander. Hinzugesetzt wird eine katalytische Menge eines sauren Ionenaustauschers, der nach vollständiger Umsetzung zurückgewonnen werden kann. Das Produkt der Kondensationsreaktion sind Glycosylharnstoffe, die als Spezialdünger und Gefrierschutzmittel Verwendung finden.



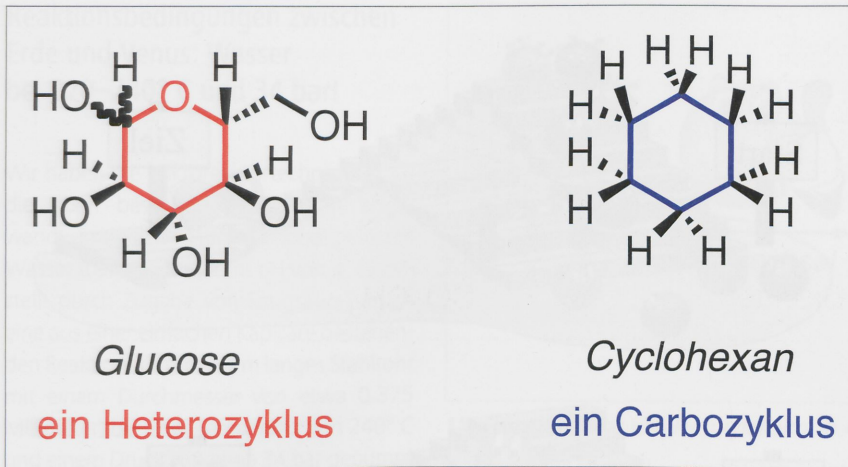
5 Herstellung von Hydroxymethylfurfural (HMF)

Aber nicht nur Kohlenhydrate lassen sich so umsetzen. In ganz ähnlicher Weise konnten Dihydropyrimidone, die interessante Grundstrukturen für pharmazeutische Wirkstoffe darstellen, durch die Reaktion von aromatischen Aldehyden, Ketoestern und Harnstoff in einer Schmelze mit Weinsäure in exzellenten Ausbeuten erhalten werden. Die Weinsäure als Teil der Schmelze dient als Katalysator für die Reaktion; alle anderen Inhaltsstoffe der Schmelze sind an der Reaktion zum Produkt beteiligt.

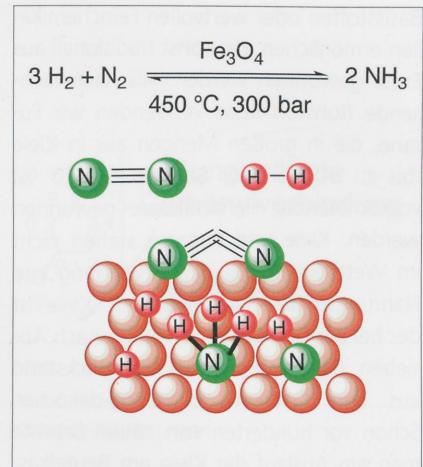
Für die effiziente Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen als Ausgangsmaterial in chemischen Synthesen sind neue,



6 Synthese von Glycosylharnstoffkondensation und Dihydropyrimidonen



7 Strukturformel von Glucose, Baustein von Zellulose und Stärke, und von Cyclohexan, ein wichtiger Bestandteil im Erdöl



8 Haber-Bosch-Prozess, in dem Stickstoff und Wasserstoff zu Ammoniak, einem wichtigen Grundstoff für Stickstoffdünger, umgesetzt wird

zum Teil ungewöhnliche Reaktionsformen wie die direkte Umwandlung in Schmelzen sinnvoll. Unser Verständnis der molekularen Struktur dieser Schmelzmischungen ist gegenwärtig noch sehr gering, was die Vorhersage von Eigenschaften, wie Viskosität oder Schmelzpunkt, erschwert. Durch theoretische Verfahren und spektroskopische Untersuchungen könnte dies aber in Zukunft gelingen, so dass dann Reaktionsmischungen oder Flüssigkeiten mit bestimmten Eigenschaften gezielt aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden können.

Chemische Umwandlungen von Zuckern in Basis- und Feinchemikalien

Zucker sind chemisch gesehen Wasseradukte des Kohlenstoffs, daher der Name Kohlenhydrate. So hat die Glucose die Summenformel $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ oder anders geschrieben $\text{C}_6(\text{H}_2\text{O})_6$. Miteinanderverknüpfte Glucosemoleküle findet man in großen Mengen im Holz oder in der Stärke, so dass sie prinzipiell wie Erdöl eine attraktive Basis für die Synthese von Kohlenstoffverbindungen darstellen: Beide enthalten bereits Kohlenstoffketten bzw. -ringe, doch unterscheiden sich Zucker- von Erdölmolekülen in ihrem molekularen Aufbau ganz wesentlich: Das besondere Merkmal von Erdölmolekülen sind C,H-Bindungen, von Zuckermolekülen dagegen C,O-Bindungen. Beide Bindungstypen sind außerordentlich stabil, doch während die Chemie

in den letzten 150 Jahren gelernt hat, wie man die Bindungen in den Molekülen des Erdöls bricht und die Fragmente zu neuen Einheiten – etwa zu Kunststoffen, Medikamenten, Agrochemikalien, Kosmetika – zusammensetzt, konnten analoge Werkzeuge ausgehend von Zuckermolekülen bislang nur sehr eingeschränkt entwickelt werden.

So ist eine der herausragenden Reaktionen mit Zuckern, die auch im Multitonnenmaßstab durchgeführt werden kann, die Umwandlung von Stärke in Ethanol – sogenanntes Bioethanol. Stärke ist aber der Pflanzenbestandteil, der auch zur Gewinnung von Lebensmitteln genutzt wird: So wird Bioethanol überwiegend aus Gerste, Mais oder Zuckerrüben hergestellt, steht also in Konkurrenz mit der Nahrungsmittelproduktion, eine Problematik, die mit Slogans wie *Teller oder Tank* und *Food for Fuel* thematisiert wird. Hierbei sind eine ganze Reihe von Aspekten zu berücksichtigen. Zum einen sind die auf der Erde zum Anbau von solchen Nutzpflanzen benötigten Flächen begrenzt und können nur unter Aufgabe von wertvollen Habitats – etwa dem tropischen Regenwald, wo nach wie vor in großem Stil Brandrodungen für die Gewinnung neuen Ackerlands durchgeführt werden – erweitert werden. Zum anderen müssen diese Flächen gedüngt werden. Für die hierfür benötigten Stickstoffverbindungen benötigt man Ammoniak, der mittels des nach den Entdeckern benannten Haber-Bosch-Verfahrens aus Stickstoff und Wasserstoff gewonnen wird. Hierfür werden ungeheure Mengen an Energie benötigt, so beträgt der Anteil am

Weltenergieverbrauch, der für den Haber-Bosch Prozess eingesetzt wird, stolze 1.7 %. Eine gute Investition, denn künstliche Stickstoffdüngung ernährt etwa die Hälfte der Menschheit. Gleich dreimal wurde für Entwicklungen dieses Prozesses der Nobelpreis verliehen, 1914 an Fritz Haber, 1931 an Carl Bosch und Friedrich Bergius, und schließlich 2007 an Gerhard Ertl, doch ist nach wie vor die Suche nach besseren Katalysatoren, die die Herstellung von Ammoniak bei niedrigeren Temperaturen erlauben und somit den Energieverbrauch reduzieren würden, eine große Herausforderung. Berücksichtigen muss man auch, dass durch die zusätzliche Düngung von Agrarflächen zunehmend Stickoxide (NO_x) freigesetzt werden, die ein vielfach höheres Treibhauspotential haben als Kohlendioxid.

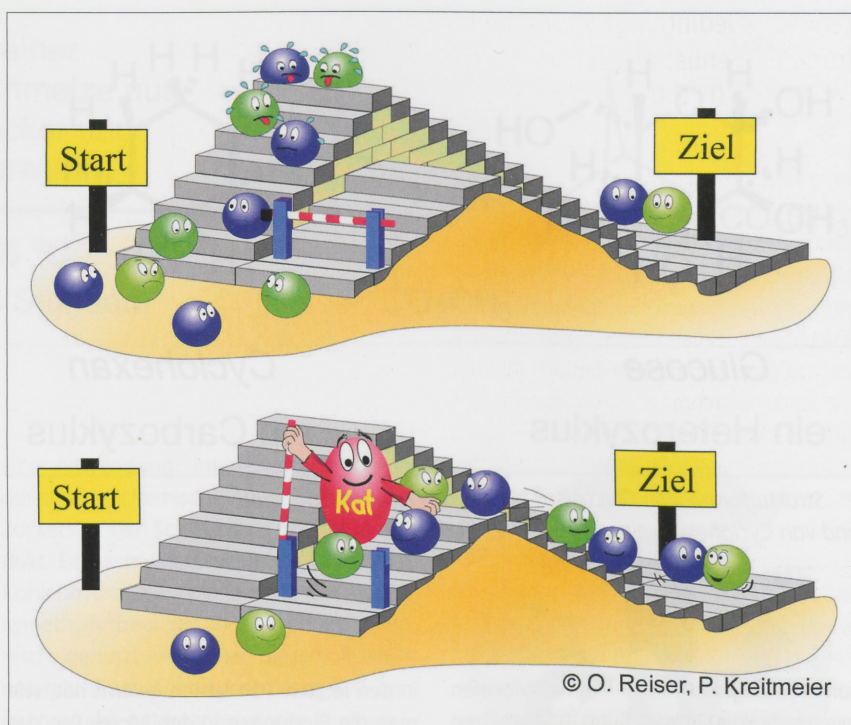
Katalyse und die chemische Umwandlung nachwachsender Rohstoffe gehen Hand in Hand, eine Thematik, die an der Universität Regensburg unter anderem durch die Deutsche Bundesumweltstiftung und die Deutsche Forschungsgemeinschaft gefördert wird. Effiziente Katalysatoren erlauben den Ablauf von Reaktionen bei milden Bedingungen und sparen somit Energie, gleichzeitig entstehen weniger Nebenprodukte und reduzieren somit anfallenden chemischen Abfall. Katalyse hat sich als eine Schlüsseltechnologie in der Chemie entwickelt, für die allein in den letzten zehn Jahren gleich vier mal (2001, 2005, 2007 und 2010) der Nobelpreis verliehen wurde.

In Regensburg entwickeln wir katalytische Prozesse, die aus nachwachsenden Rohstoffen einen Zugang zu chemischen

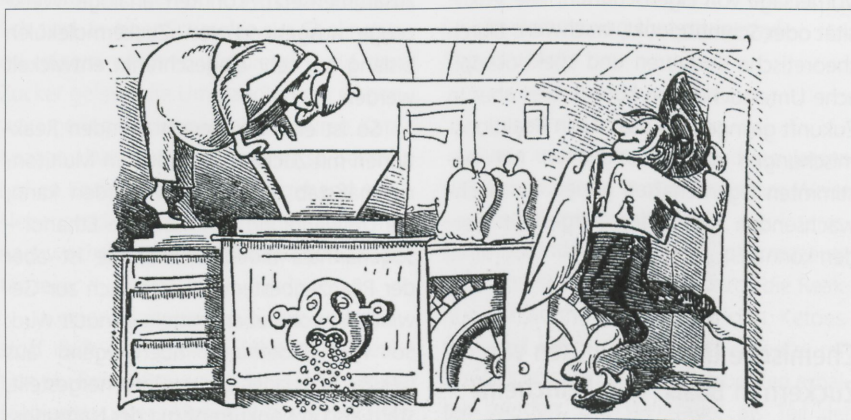
Basisstoffen oder wertvollen Feinchemikalien ermöglichen, die sonst traditionell aus Erdöl gewonnen werden. Als nachwachsende Rohstoffklasse verwenden wir Furan, die in großen Mengen aus Kleie (bis zu 80 %) oder Bagasse (20–30 %) vorkommender Hemicellulose gewonnen werden. Kleie und Bagasse stehen nicht im Wettbewerb mit der Gewinnung von Nahrungsmitteln, im Gegenteil: Kleie ist der bei der Getreideverarbeitung nach Absieben des Mehls anfallende Rückstand aus den Schalen der Getreidekörner. Schon vor hunderten von Jahren brachte man am Auslauf der Kleie am Beutelkasten einer Mühle Masken an, die die Geringschätzung dieses Stoffs zum Ausdruck brachten – sogenannte Kleiekotzer, die man im Wilhelm Buschs Max und Moritz bewundern kann.

Heutzutage weiß man einen gewissen Anteil an Kleie als Ballaststoff in der Nahrung dagegen zu schätzen. Bagasse sind die faserigen Überreste aus Zuckerrohr bei der Zuckerfabrikation, und wird heutzutage vor allem als Festbrennstoff oder auch zur Herstellung von Pappen (Verpackungsmaterial) genutzt. Bagasse und Kleie fallen jährlich in gigantischen Mengen von mehr als 100 Millionen Tonnen an und stellen damit ein ideales Ausgangsmaterial dar, parallel zur Nahrungserzeugung auch chemische Basisstoffe und Treibstoffe herzustellen.

Eine wichtige, seit etwa 25 Jahren bekannte Reaktion ausgehend von Furfurylalkohol ist dessen Umwandlung in 4-Hydroxycyclopentenon, das als Ausgangsmaterial unter anderem industriell Verwendung findet in der Synthese von Prostaglandinen, die etwa in der Gynäkologie zur Geburtshilfe breit eingesetzt werden. Diese Reaktion ist auch deswegen interessant, da sie einen heterozyklischen (enthalten im Ring ein Heteroatom, hier Sauerstoff) Zuckerbaustein in einen carbozyklischen Ring (besteht nur aus Kohlenstoffatomen) überführt und so eine Brücke zu den stets carbozyklischen Komponenten des Erdöls schlägt. Die Synthese von 4-Hydroxycyclopentenon ist prinzipiell sehr einfach: Durch Erhitzen in leicht saurem Wasser bei 100° C für 1–2 Tage wandelt sich Furfurylalkohol in die gewünschte Verbindung um. Doch neben den langen Reaktionszeiten, die für diese Transformation notwendig sind und dem damit verbundenen hohen Energieaufwand, waren auch die Produktausbeuten von 40–50 % nicht zufriedenstellend.



9 Katalysatoren eröffnen Reaktionswege unter milden Bedingungen für Moleküle, bei denen weniger Abfall anfällt.



10 Masken am Auslauf der Kleie am Beutelkasten einer Mühle, sogenannte Kleiekotzer, Abbildung aus: Wilhelm Busch, Max und Moritz, 1865

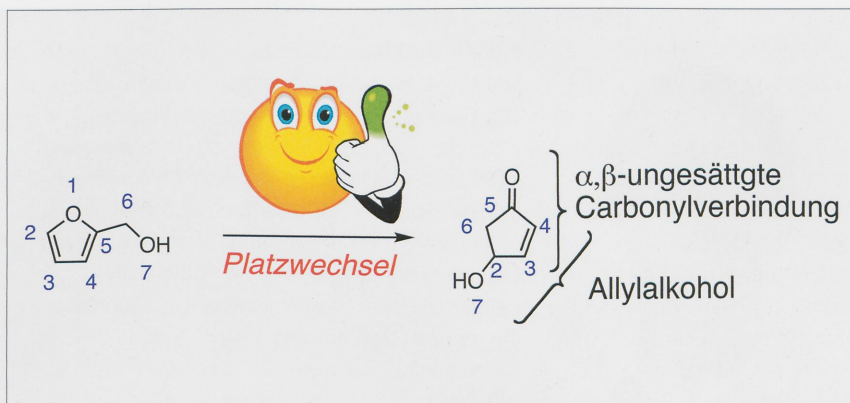
Kleine Reaktoren ganz groß – Extreme Reaktionsbedingungen und kurze Reaktionszeiten in Mikroreaktoren

Eine wichtige Technik, die sich momentan in der Synthesechemie etabliert, ist der Einsatz von sogenannten Mikroreaktoren. Man pumpt die Reaktionskomponenten durch eine Reaktionskammer hindurch, die oft nur wenige Milliliter oder gar Mikroliter groß ist. In der Reaktionskammer werden die Komponenten in hoher Konzentration äußerst effektiv durchmischelt. Außerdem kann man ohne großen Auf-

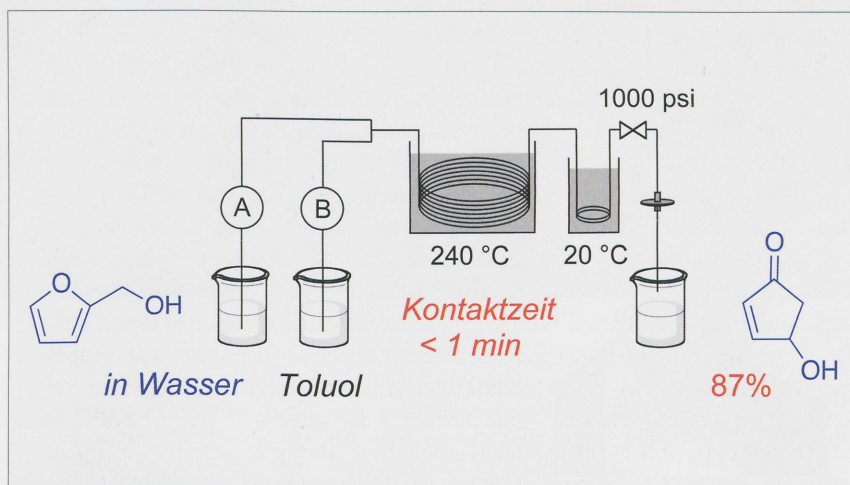
wand extreme Temperatur- und Druckbedingungen in der Kammer erzeugen, so dass chemische Reaktionen mit ungleich größerer Geschwindigkeit ablaufen können, als in einem normalen Reaktionskolben. Da die Verweilzeit der Reaktionskomponenten in der Reaktionskammer nur sehr kurz ist, treten trotz der extremen Reaktionsbedingungen auch weniger Nebenreaktionen auf. Außerdem kann man über beliebige Zeiträume mit Hilfe der Durchflusstechnik den Mikroreaktor kontinuierlich und praktisch in jeder Größenordnung betreiben, andererseits können auch eine Vielzahl von solchen Mikroreaktoren parallel betrieben werden.

Reaktionsbedingungen zwischen Erde und Venus: Wasser bei 220–240° C und 34 bar!

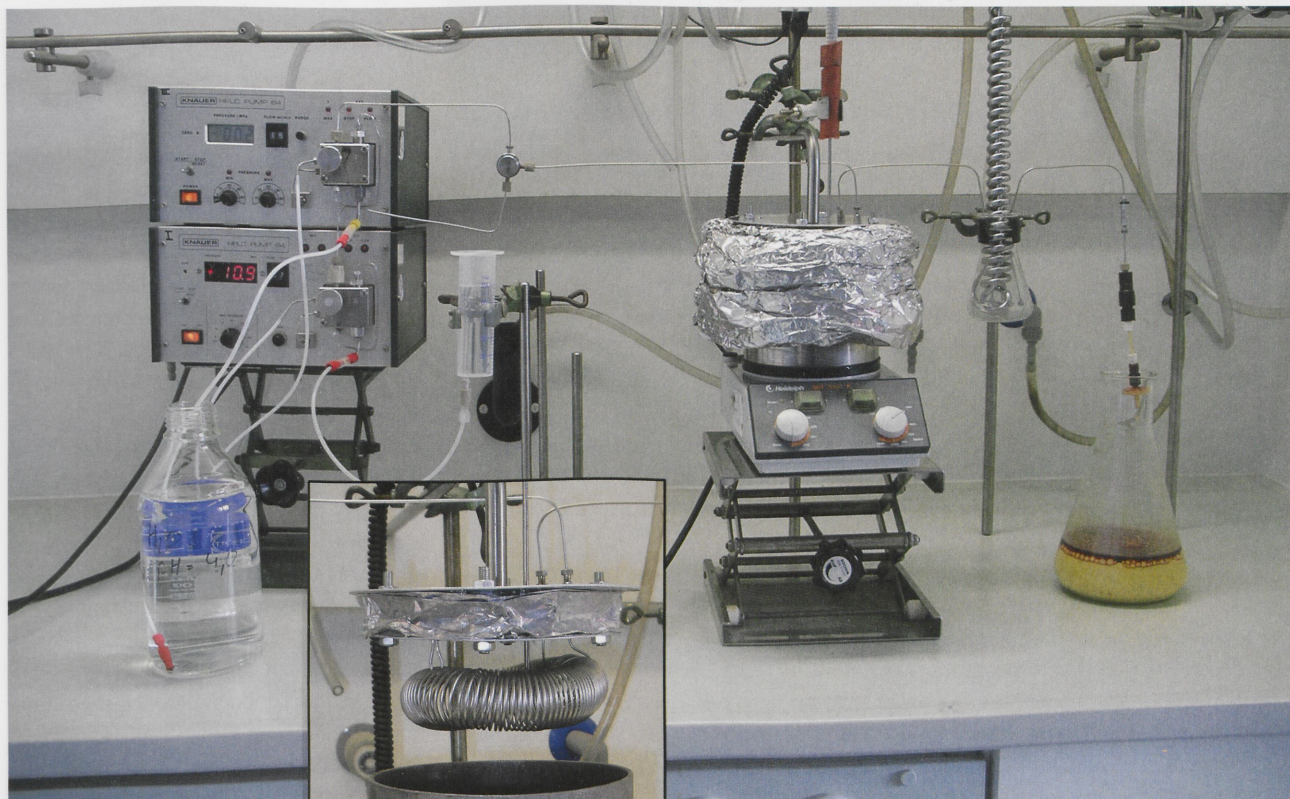
Wir haben die Mikroreakorteknik nun für die oben beschriebene Reaktion angewandt, in dem wir Furfurylalkohol gelöst in Wasser (bei einem saurem pH von 4, eingestellt durch Zugabe von Essigsäure) durch eine aus einer einfachen Kapillare bestehenden Reaktionskammer (4 m langes Stahlrohr mit einem Durchmesser von etwa 0.375 Millimeter) bei einer Temperatur von 240° C und einem Druck von etwa 34 bar gepumpt haben. Unter solchen, zwar nicht mehr erdähnlichen, aber auch noch nicht auf der Venus herrschenden Druck- und Temperaturbedingungen, gelingt die Umwandlung von Furfurylalkohol in 4-Hydroxycyclopentenon mit 87 % Ausbeute in einer Reinheit von 97 %: Das ist in etwa doppelt so gut wie unter konventionellen Reaktionsbedingungen. Um den Durchfluss über eine lange Zeit aufrecht erhalten zu können, erwies es sich als notwendig, etwas Toluol mit durch die Reaktionskammer zu pumpen, um in geringen Mengen auftretende polymere Nebenprodukte, die die Kapillare verstopfen könnten, herauszuschwemmen. Unter dem Aspekt einer grünen Reaktionsführung ist die Verwendung von einem aromatischen Lö-



11 Umwandlung von Furfurylalkohol in 4-Hydroxycyclopentenon



12 Reaktionsschema ...



13 ... und Reaktionsaufbau zur Umwandlung von Furfurylalkohol in 4-Hydroxycyclopentenon



Prof. Dr. **Burkhard König** promovierte 1991 an der Universität Hamburg. Es folgten Postdokorate bei M.A. Bennett in Canberra, Australien, und bei B. M. Trost, Stanford, U.S.A. Seine Habilitation schloss er 1996 an der Technischen Universität Braunschweig ab. Seit 2000 ist er Professor für Organische Chemie an der Universität Regensburg. Er ist Sprecher des Graduiertenkollegs „Chemische Photokatalyse“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft und koordiniert das Projekt Nachhaltiges Organisches Praktikum (www.oc-praktikum.de) der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, in dem Lehrmaterial für eine zeitgemäße Laborausbildung unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten angeboten wird.

Forschungsschwerpunkte: Zwischenmolekulare Wechselwirkungen und die Entwicklung nachhaltiger Synthesemethoden in der Chemie.



Prof. Dr. **Werner Kunz** promovierte 1988 an der Universität Regensburg und ging danach für fast zehn Jahre nach Frankreich, um dort an verschiedenen Forschungsinstituten zu arbeiten. Nach seiner Habilitation 1992 in Paris nahm er eine Professur an der Université de Technologie de Compiègne an und war dort ab 1995 als Forschungsdekan tätig. 1997 folgte seine Berufung auf einen Lehrstuhl für Physikalische Chemie an der Universität Regensburg. 1999 gründete er die SKH GmbH als Spin-Off und Aninstitut der Universität und im Jahr 2004 den Europäischen Master of Science COSOM zusammen mit Universitäten in Frankreich und Italien. Neben verschiedenen Gastprofessuren in Frank-

reich, Belgien und Australien ist er auch korrespondierendes Mitglied der Europäischen Akademie der Wissenschaften.

Forschungsschwerpunkte: Erforschung und Optimierung komplexer Flüssigkeiten und Lösungen, vor allem von Salzen, Emulgatoren und Polymeren und deren technischer und industrieller Umsetzung.



Prof. Dr. **Oliver Reiser** promovierte 1989 nach Studium an den Universitäten Hamburg, Jerusalem und UC Los Angeles an der Universität Hamburg. Es folgten Postdokorate am IBM Research Center Almaden, San Jose, U.S.A., und bei Prof. D. A. Evans, Harvard University, U.S.A. Seine Habilitation schloss er 1995 an der Universität Göttingen ab und wechselte 1996 auf eine Professur an die Universität Stuttgart. Seit 1997 ist er Professor für Organische Chemie an der Universität Regensburg. Er ist Mitglied des Graduiertenkollegs „Chemische Photokatalyse“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft und „NANOCAT“ des Elitenetzwerks Bayern und koordiniert ein Netzwerk „GLOBUCAT“

zwischen der Deutschen und Französischen Forschungsgemeinschaft (DFG und ANR) und einen Dual Degree Bachelor Studiengang „Atlantis“ zwischen der Europäischen Union und dem Department of Education, USA. Weiterhin ist er Gründer des Internetportals www.chemie-im-alltag.de, das umfassende Informationen und Beratung zu allen Themen der Chemie bietet.

Forschungsschwerpunkte: Synthese von Naturstoffen und Feinchemikalien mit besonderem Fokus auf die Anwendung von Katalyse.

sungsmittel wie Toluol nicht ganz optimal. Glücklicherweise trennen sich aber Wasser und Toluol in zwei Phasen, und da das gewünschte Produkt sich in der wässrigen, die polymeren Nebenprodukte in der Toluolphase befinden, ist eine bequeme Abtrennung möglich. In unserer Laboranlage konnten wir auf diese Weise in etwa vier Stunden 10 Gramm des Cyclopentenons herstellen, die Reaktionskomponenten waren dabei weniger als eine Minute den extremen Bedingungen in der Reaktionskammer ausgesetzt. Zusammen mit dem Institut für Mikrotechnik Mainz und BTS Ehrfeld werden wir nun diesen Reaktionsansatz in eine Pilotanlage übertragen, um auf diese Weise den Prozess im Multikilogrammmaßstab durchzuführen. Dank der zu Grunde liegenden Durchflusstechnik sollte dies, wie oben erläutert, keine Probleme mit sich bringen.

Es ist noch ein weiter Weg, bis wir nachwachsende Rohstoffe für chemische und energetische Prozesse genauso effizient nutzen können wie fossile Rohstoffe. Auch wirft die Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen in großem Umfang eine Reihe von Problemen auf, etwa ökologischer oder ethischer Natur. Dennoch wird die Zukunft der Chemie bei nachwachsenden Rohstoffen als Quelle für viele Stoffe liegen, die wir heute noch mit trügerischer Selbstverständlichkeit aus dem Erdöl beziehen.

Literatur

C. Ruß, F. Ilgen, C. Reil, C. Luff, A. Haji Begli, B. König, *Green Chem.* 2011, 13, S. 156–161: Efficient preparation of β -d-glucosyl and β -d-mannosyl ureas and other N-glucosides in carbohydrate melts. London/Royal Society of Chemistry.

K. Ulbrich, P. Kreitmeier, O. Reiser, *Synlett* 2010, 2037–2040: Microreactor assisted conversion of furfuryl alcohols to 4-hydroxy-2-cyclopentenones. Stuttgart/Thieme Verlag.

F. Ilgen, B. König, *Green Chem.* 2009, 11, S. 848–854: Organic Reactions in Low Melting Mixtures based on Carbohydrates and L-Carnitine – A Comparison. London/Royal Society of Chemistry.

R. Klein, D. Touraud, W. Kunz, *Green Chem.* 2008, 10, S. 433–435: Choline Carboxylate Surfactants: Biocompatible and Highly Soluble in Water. London/Royal Society of Chemistry.

Webportale der Autoren:

www.sustainable-chemistry.de

www.chemie-im-alltag.de

Fraunhofer-Einrichtung für Modulare Festkörper-Technologien EMFT



Fraunhofer EMFT entwickelt produktionsunterstützende und zukunftsweisende Herstellungstechnologien die klassische **Silizium- und MEMS-Technologien** mit der **Biosystemintegration** und der **Polytronik** verbinden. Systemkomponenten werden mit optimaler Prozesstechnologie anwendungsspezifisch gefertigt und erreichen dadurch signifikante Verbesserung bei Funktionalität, Flexibilität und Wirtschaftlichkeit, um die modulare Integration innovativer Funktionalität und neuer Komponenten in bestehende Standardtechnologien zu unterstützen und Produkte der Mikrosystemtechnik kleiner, leistungsfähiger und energieeffizienter zu gestalten.

Mit heterogener Technologieintegration werden unsere Forschungs- und Entwicklungsergebnisse – unter anderem für den Einsatz in **medizinischer Diagnostik, Biotechnologie, Umweltanalytik, Lebensmittelkontrolle, Textilindustrie, Prozesscharakterisierung, Produktauthentifizierung** – aus diesen Anwendungsbereichen in intelligente Systeme umgesetzt:

- Multifunktionale On-Top Technologien und 3D-Systemintegration
- Silizium-basierte Technologien, Nanomaterialien und Bauelemente
- Mikro-Elektro-Mechanische Systeme
- Mikrofluidik und Mikropumpen
- Biosystemintegration und Biosensorik
- Polytronische Technologien und Mikrosysteme
- Analyse und Test Integrierter Systeme
- Herstellungs und Handhabungstechniken für sehr dünne Halbleitersubstrate
- Oberflächenstrukturierung und Selbstassemblierung
- Sensormaterialien
- Fluoreszente Nanopartikel

Bildnachweis

Autorenfotos

Foto Prof. Rehli, Prof. Weber:

Fotoabteilung Universitätsklinikum
Regensburg

Foto Prof. Schäfer: Archiv des Autors

Foto Prof. Mack: Archiv des Autors

Alle übrigen Aufnahmen:

Referat Kommunikation, Axel Roitzsch
und Susanne Goldbrunner

Die erzählten Grenzen

1 und 2 Fakultät Ost- und Südeuro-
päische Geschichte

3, 5, 7, 8a, 8b und 9 aus: Wanderungen
durch die verschwundenen Ortschaf-
ten des Böhmisches Walds I. Kreis
Taus. Mit freundlicher Genehmigung
von Herrn Zdeněk Procházka

Dichternomaden und die Wissenschaft

- 1 Jüdisches Museum Prag (lizenziert an
Prof. Dr. Walter Koschmal)
- 2 Jüdischer Almanach (Public Domain)
- 3 Jüdisches Volksblatt Selbstwehr
(Public Domain)

Von molekularen Mechanismen zu komplexen biologischen Systemen

- 1 Gernot Längst, Institut für Biochemie,
Universität Regensburg
- 2 Gernot Längst, Institut für Biochemie,
Universität Regensburg
- 3 Gunter Meister, Institut für Biochemie,
Universität Regensburg
- 4 Anja Bosserhoff, Institut für Patholo-
gie, Universität Regensburg
- 5 Antje Zenker, Institut für Anatomie,
Universität Regensburg
- 6 Martin Gallenberger, Institut für Ana-
tomie, Universität Regensburg
- 7 Matthias Mack, Innere Medizin
(Nephrologie), Universitätsklinikum
Regensburg

Spins, Moleküle und Supercomputer

1–3, 6–8 Fakultät Physik, Universität
Regensburg

4 aus: S. H. Jhang, M. Marganska, Y.
Skourski, D. Preusche, B. Witkamp, M.
Grifoni, H. van der Zant, J. Wosnitza,
and C. Strunk, 'Spin-orbit interaction
in chiral carbon nanotubes probed in
pulsed magnetic fields'. In: *Phys. Rev.*
B 82, (Rapid Communications)
041404 (2010)

5 aus: P. Liljeroth, J. Repp und G. Meyer,
Current-induced hydrogen tautomeri-
zation and conductance switching of
naphthalocyanine molecules.
In: *Science* 317, 1203 (2007).

Chemische Synthese in einer Welt ohne Öl

- 1 Werner Kunz, Universität Regensburg
- 2 (Schwertlilienbild aus: Wikimedia
Commons; aufgenommen von
Danielle Langlois im Juli 2005 im
Forillon National Park, Quebec,
Canada
- 3 Burkhard König, Universität
Regensburg
- 5 Burkhard König, Universität
Regensburg
- 8 Oliver Reiser, Universität Regensburg
- 9 Peter Kreitmeier, Oliver Reiser,
Universität Regensburg
- 10 Wilhelm Busch: Max und Moritz aus
Wikimedia Commons
(Public Domain)
- 13 Peter Kreitmeier, Universität
Regensburg

Univ.-Bibliothek
Regensburg

Blick in die Wissenschaft – Bestellkarte

Bitte ausfüllen und einsenden oder kopieren und faxen an
(0941) 78785 16

Ja, ich möchte **Blick in die Wissenschaft**
ab Heft _____ / _____ bestellen!

Abonnement

Ich erhalte **Blick in die Wissenschaft** zweimal jährlich zum günstigen Abopreis von € 10,00 (statt € 14,00) zzgl. Versandkosten € 1,64 (Inland) pro Ausgabe. Ich spare damit ca. 28% gegenüber dem Bezug von Einzelheften.

Studentenabonnement

Ich bin Student/in und erhalte **Blick in die Wissenschaft** zweimal jährlich zum günstigen Abopreis von € 9,00 (statt € 14,00) zzgl. Versandkosten € 1,64 (Inland) pro Ausgabe. Ich spare damit ca. 35% gegenüber dem Bezug von Einzelheften. Eine Immatrikulationsbescheinigung lege ich bei.

Probeheft

Ich erhalte 1 Heft kostenlos. Wenn ich **Blick in die Wissenschaft** anschließend nicht weiterbeziehen möchte, teile ich Ihnen das innerhalb von 10 Tagen nach Erhalt der Ausgabe schriftlich mit. Wenn Sie nichts von mir hören, erhalte ich **Blick in die Wissenschaft** künftig zweimal pro Jahr zum Abopreis von € 10,00 (statt € 14,00) zzgl. Versandkosten € 1,64 (Inland) pro Ausgabe.

Absender/in

Name

Vorname

Straße

PLZ / Ort

_____ x
Datum/Unterschrift Bitte unbedingt hier unterschreiben

Widerrufsrecht: Ich bin darüber informiert, daß ich diese Bestellung innerhalb von 14 Tagen nach Absenden der Bestellkarte schriftlich beim Verlag widerrufen kann. Zur Wahrung der Frist genügt die rechtzeitige Absendung des Widerrufs. Dies bestätige ich mit meiner zweiten Unterschrift.

_____ x
zweite Unterschrift

Das Abonnement soll ein Geschenk sein. Bitte liefern Sie an

Name

Vorname

Straße

PLZ / Ort

Ja, ich möchte **Blick in die Wissenschaft**
ab Heft _____ / _____ bestellen!

Abonnement

Ich erhalte **Blick in die Wissenschaft** zweimal jährlich zum günstigen Abopreis von € 10,00 (statt € 14,00) zzgl. Versandkosten € 1,64 (Inland) pro Ausgabe. Ich spare damit ca. 28% gegenüber dem Bezug von Einzelheften.

Studentenabonnement

Ich bin Student/in und erhalte **Blick in die Wissenschaft** zweimal jährlich zum günstigen Abopreis von € 9,00 (statt € 14,00) zzgl. Versandkosten € 1,64 (Inland) pro Ausgabe. Ich spare damit ca. 35% gegenüber dem Bezug von Einzelheften. Eine Immatrikulationsbescheinigung lege ich bei.

Probeheft

Ich erhalte 1 Heft kostenlos. Wenn ich **Blick in die Wissenschaft** anschließend nicht weiterbeziehen möchte, teile ich Ihnen das innerhalb von 10 Tagen nach Erhalt der Ausgabe schriftlich mit. Wenn Sie nichts von mir hören, erhalte ich **Blick in die Wissenschaft** künftig zweimal pro Jahr zum Abopreis von € 10,00 (statt € 14,00) zzgl. Versandkosten € 1,64 (Inland) pro Ausgabe.

Absender/in

Name

Vorname

Straße

PLZ / Ort

_____ x
Datum/Unterschrift Bitte unbedingt hier unterschreiben

Widerrufsrecht: Ich bin darüber informiert, daß ich diese Bestellung innerhalb von 14 Tagen nach Absenden der Bestellkarte schriftlich beim Verlag widerrufen kann. Zur Wahrung der Frist genügt die rechtzeitige Absendung des Widerrufs. Dies bestätige ich mit meiner zweiten Unterschrift.

_____ x
zweite Unterschrift

Das Abonnement soll ein Geschenk sein. Bitte liefern Sie an

Name

Vorname

Straße

PLZ / Ort

Blick in die Wissenschaft



Forschungsmagazin der
Universität Regensburg

im Abonnement – Vorteile, die überzeugen:

- ✓ günstiger Abopreis (€ 10,00 statt € 14,00 für zwei Hefte im Jahr)
Sie sparen ca. 28% gegenüber dem Einzelbezug
- ✓ Sie versäumen keine Ausgabe
- ✓ Für Studierende noch günstiger (€ 9,00 für zwei Hefte im Jahr)



Entgelt
zahlt
Empfänger

Blick in die Wissenschaft



Forschungsmagazin der
Universität Regensburg

Antwort

Universitätsverlag Regensburg GmbH
Leibnizstraße 13

D-93055 Regensburg

Telefon: (09 41) 7 87 85-0

Telefax: (09 41) 7 87 85-16

E-Mail: bestellung@univerlag-regensburg.de

Internet: www.univerlag-regensburg.de



Entgelt
zahlt
Empfänger

Blick in die Wissenschaft



Forschungsmagazin der
Universität Regensburg

Antwort

Universitätsverlag Regensburg GmbH
Leibnizstraße 13

D-93055 Regensburg

Telefon: (09 41) 7 87 85-0

Telefax: (09 41) 7 87 85-16

E-Mail: bestellung@univerlag-regensburg.de

Internet: www.univerlag-regensburg.de



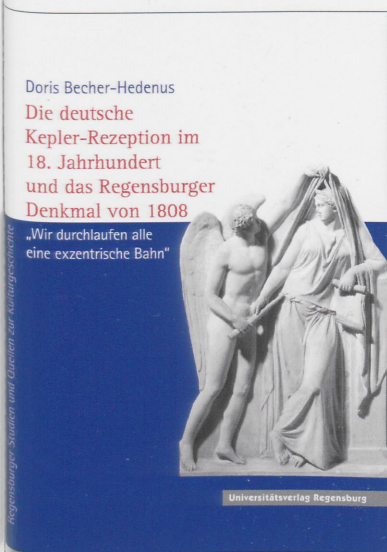
Ernst Stahl · Georg Wittmann (Hg.)

E-Commerce-Leitfaden
Erfolgreicher im elektronischen Handel

3. aktualisierte Auflage 2011, ca. 350 Seiten,
ca. 23 Farbabbildungen, 43 Diagramme,
21 x 29,7 cm, Hardcover, fadengeheftet

ISBN 978-3-86845-054-5
ca. € 59,95 [D] / SFr 84,90

Erscheint im September 2011



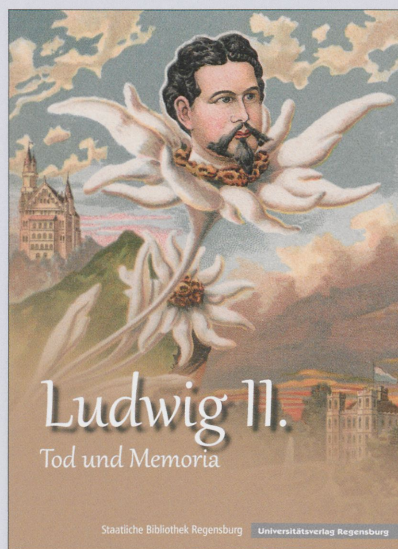
Doris Becher-Hedenus

**Die deutsche Kepler-Rezeption
im 18. Jahrhundert und das
Regensburger Denkmal von 1808**

Reihe: Regensburger Studien und Quellen
zur Kulturgeschichte, Bd. 19

1. Aufl. 2010, 368 Seiten, 22 Farb-, 10 s/w-Abb.,
17 x 24 cm, Efallin mit Schutzumschlag, fadengeh.

ISBN 978-3-86845-061-3
€ 39,90 [D] / SFr 59,90



Bernhard Lübbers (Hg.)
Marcus Spannberg (Mitherausgeber)

**Ludwig II.
Tod und Memoria**

Reihe: Kataloge und Schriften der
Staatlichen Bibliothek Regensburg, Bd. 4

1. Auflage 2011, 106 Seiten, 37 s/w-Abb.,
17 x 24 cm, Efallin mit Schutzumschlag,
fadengeheftet

ISBN 978-3-86845-075-0
€ 12,95 [D] / SFr 20,50

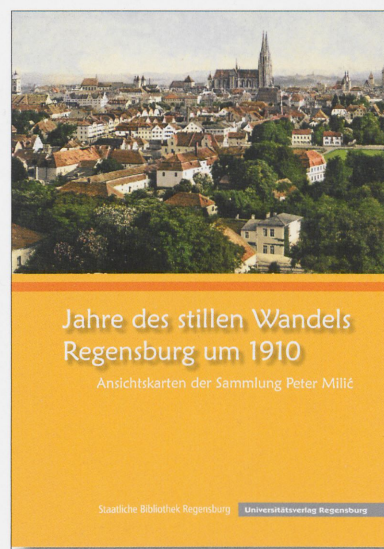


Christoph Wagner (Hrsg.) · Walter Ziegler
(Illustrator/Fotograf)

**Kunst auf dem Campus der
Universität Regensburg**

1. Auflage 2010, 224 Seiten, 178 Farbabbil-
dungen, 17 x 24 cm, Broschur, fadengeheftet

ISBN 978-3-86845-030-9
€ 16,90 [D] / SFr 25,90



Bernhard Lübbers · Georg Köglmeier (Hg.)

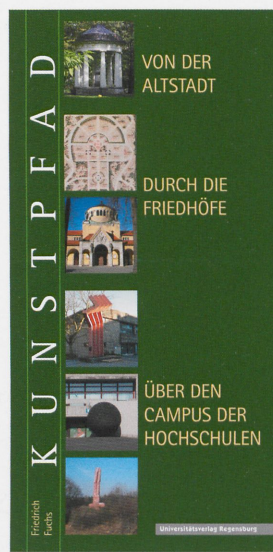
**Jahre des stillen Wandels
Regensburg um 1910**

Ansichtskarten der Sammlung Peter Millic

Reihe: Kataloge und Schriften der
Staatlichen Bibliothek Regensburg, Bd. 3

1. Auflage 2010, 172 Seiten, 117 Farbabb.,
17 x 24 cm, Broschur, klebegebunden

ISBN 978-3-86845-069-9
€ 12,90 [D] / SFr 20,50



Friedrich Fuchs
Kunstpfad

Von der Altstadt durch die Friedhöfe
über den Campus der Hochschulen

1. Auflage 2010, 48 Seiten, 30 Farbabb.,
3 Planausschnitte, 10 x 21 cm, geheftet

ISBN 978-3-86845-048-4
€ 5,00 [D] / SFr 8,50

Kunstführer fürs iPhone

Lyffhäuser +++ Die Wartburg +++ Asamkirche München +++ Limburger Dom +++ Veste Cobu



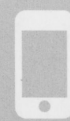
artguide



Inhalt

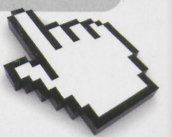
- Audioguide
- E-Book
- Interaktiver Grundriss
- Zeittafel
- Besucherinfos
- umfangreiches Bildmaterial

Download nur **3,99 Euro**



Available on the iPhone

App Store



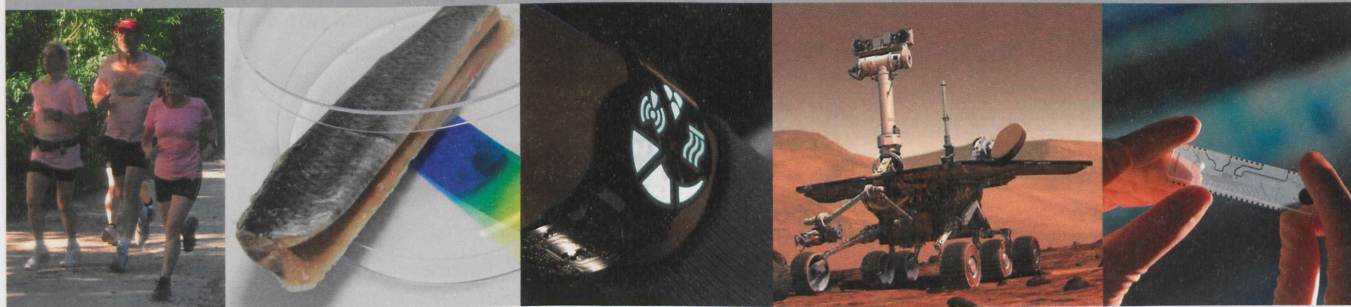
So funktioniert's

- App **Artguide**
kostenlos installieren
- in Artguide unseren
Kunstführer downloaden

el Verlag +++ Neue Verlage bei Artguide: Verlag Kunst+Reise und Stadtwandel Verlag +++ Neu

www.artguide.de

Fraunhofer-Einrichtung für Modulare Festkörper-Technologien EMFT



Fraunhofer EMFT entwickelt produktionsunterstützende und zukunftsweisende Herstellungstechnologien die klassische **Silizium- und MEMS-Technologien** mit der **Biosystemintegration** und der **Polytronik** verbinden. Systemkomponenten werden mit optimaler Prozesstechnologie anwendungsspezifisch gefertigt und erreichen dadurch signifikante Verbesserung bei Funktionalität, Flexibilität und Wirtschaftlichkeit, um die modulare Integration innovativer Funktionalität und neuer Komponenten in bestehende Standardtechnologien zu unterstützen und Produkte der Mikrosystemtechnik kleiner, leistungsfähiger und energieeffizienter zu gestalten.

Mit heterogener Technologieintegration werden unsere Forschungs- und Entwicklungsergebnisse – unter anderem für den Einsatz in **medizinischer Diagnostik, Biotechnologie, Umweltanalytik, Lebensmittelkontrolle, Textilindustrie, Prozesscharakterisierung, Produktauthentifizierung** – aus diesen Anwendungsbereichen in intelligente Systeme umgesetzt:

- Multifunktionale On-Top Technologien und 3D-Systemintegration
- Silizium-basierte Technologien, Nanomaterialien und Bauelemente
- Mikro-Elektro-Mechanische Systeme
- Mikrofluidik und Mikropumpen
- Biosystemintegration und Biosensorik
- Polytronische Technologien und Mikrosysteme
- Analyse und Test Integrierter Systeme
- Herstellungs und Handhabungstechniken für sehr dünne Halbleitersubstrate
- Oberflächenstrukturierung und Selbstassemblierung
- Sensormaterialien
- Fluoreszente Nanopartikel

www.emft.fraunhofer.de
contact@emft.fraunhofer.de

