



# Blick in die Wissenschaft | 22

Forschungsmagazin der Universität Regensburg

## Gedächtnis

Wie sich unser Gedächtnis unerwünschte Erinnerungen vom Leibe hält

## Sehen und Verstehen

Text und Bild, Sehen und Erkennen bei Konrad von Megenberg

## Essay

Lob des Nichtwissens

## Computational Science

Weltweit energieeffizientester Supercomputer an der Uni Regensburg entwickelt

## Antike Rechtsgeschichte

Freundschafts- und Kreditnetzwerke in der römischen Republik

## Alte Geschichte

Aufstieg und Niedergang Roms in einer neuen Perspektive

## Chemische Ökologie

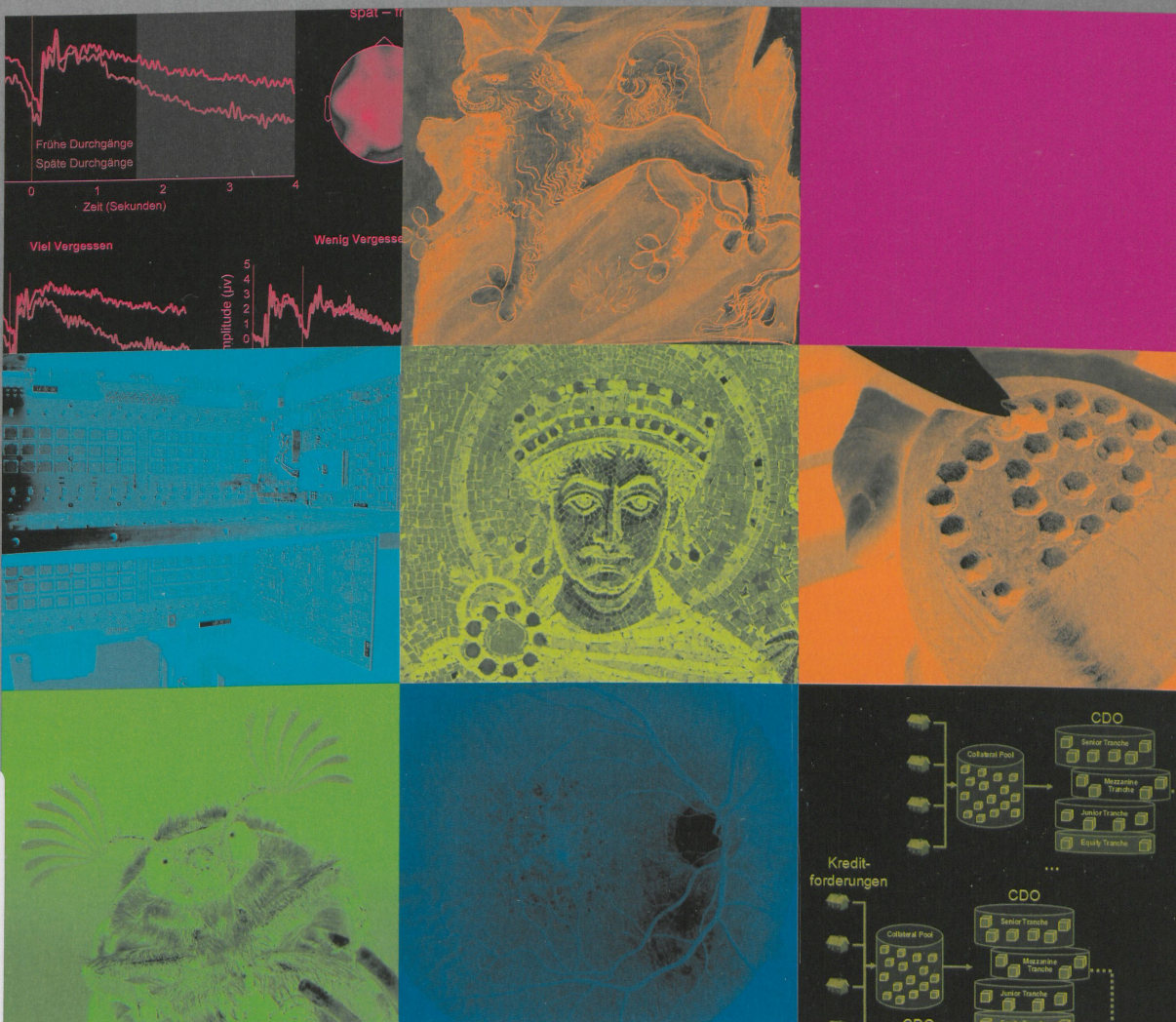
Bei Insekten sind Duftstoffe oft entscheidend für die Partnerwahl

## Humangenetik

Volkskrankheit altersabhängige Makuladegeneration (AMD)

## Risikoanalyse

Fatale Fehleinschätzung der Risiken von strukturierten Kreditprodukten



229  
AZ  
28441  
-22

Mont 22 | 15. Jahrgang 2010 | 150 | ISSN 0342-528X





# 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, Geneart 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 m<sup>2</sup> 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 BioRegion Regensburg vor Ort bereichern.

Informieren Sie sich unter [www.bioregio-regensburg.de](http://www.bioregio-regensburg.de) oder Tel. 0941 920 460

Mitglied von

CLUSTER  
BIOTECHNOLOGIE  
BAYERN



**BIO PARK**  
REGENSBURG GMBH

Univ.-Bibliothek  
Regensburg



**Blick in die Wissenschaft**  
Forschungsmagazin  
der Universität Regensburg  
ISSN 0942-928-X, Heft 22/19. Jahrgang

**Herausgeber**

Prof. 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 Rott

Universität 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**

Silvia Dechant  
s.dechant@univerlag-regensburg.de

**Anzeigenverwaltung**

Ingrid Potsch  
i.potsch@univerlag-regensburg.de

**Herstellung**

Erhardi Druck GmbH, Regensburg  
info@erhardi.de

**Einzelpreis € 7,50**

**Jahresabonnement**

€ 5,50 / ermäßigt € 4,00  
für Schüler, Studenten und Akademiker  
im Vorbereitungsdienst (inkl. 7% MwSt)  
zzgl. Versandkostenpauschale € 1,64; Be-  
stellung beim Verlag

Für Mitglieder des **Vereins der Ehemaligen Studierenden der Universität Regensburg e.V.** und des **Vereins der Freunde der Universität Regensburg e.V.** ist der Bezug des Forschungsmagazins im Mitgliedsbeitrag enthalten.

**Layout und Titeldesign**

Florian Knörl

## Editorial

Wissenschaft ist der Wahrheitsfindung sowie dem zukunftsorientierten Nutzen verpflichtet. Wissenschaft ist fortschrittsorientiert. Sie ist dabei auch, wie es Max Weber in seinem Vortrag „Wissenschaft als Beruf“ bemerkte, „eingespannt in den Ablauf des Fortschritts“. Wissenschaft ist somit fortlaufenden Veränderungen unterworfen und wandelt sich beständig selbst.

Die wissenschaftliche Arbeit an einer Universität muss sich darauf einstellen. Vor dem Hintergrund des zunehmenden Wettbewerbs der Hochschulen untereinander und aufgrund des demografischen Wandels gilt es deshalb, sich als Universität ein scharfes Forschungsprofil zu geben und dies nach außen sichtbar zu machen. An der Universität Regensburg wurde mit der Bildung von interdisziplinären und fakultätsübergreifenden Themenverbünden im letzten Jahr ein wichtiger Schritt in die richtige Richtung gegangen, den es nun beherzt fortzusetzen gilt.

Die Beiträge im vorliegenden Heft geben einen Einblick in diese Aktivitäten. Abermals haben dabei ausgewählte Persönlichkeiten der Universität Regensburg, die zugleich zu den führenden Wissenschaftlern ihrer jeweiligen Disziplin gehören, ihre aktuellen Forschungsprojekte für ein breites Publikum aufbereitet. Damit kommt die Universität einer ihrer wichtigsten Aufgaben nach: der Kommunikation ihrer Ergebnisse an ihre Stakeholder – an ihre Studierenden und an die anderen Universitätsmitglieder, an Ehemalige, Freunde, Sponsoren sowie, „last but not least“, an eine interessierte Öffentlichkeit. Denn nicht nur die Spezialisten eines jeden Faches haben Interesse an diesen Forschungsergebnissen und das Recht, darüber zu erfahren, sondern auch die Wegbegleiter der Universität als Einrichtung. Die einzelnen Beiträge sind dabei als Mosaiksteine, als exemplarische Fallstudien im Rahmen größerer Themen der Universität Regensburg zu verstehen.

Die Themen dieses Heftes reflektieren die Ergebnisse von herausragender Grundlagenforschung. Die darin beschriebenen Erkenntnisse sind für die Umsetzung be-



stimmt und stellen somit auch eine Vorausschau auf die Zukunft dar. Zusammen stehen die Beiträge für die große Leistungsdichte unserer Universität.

Damit diese Beiträge vertrauensbildend für den wissenschaftlichen Standort Regensburg wirken können, präsentiert sich der vorliegende 19. Jahrgang der Zeitschrift „Blick in die Wissenschaft“ im neuen Corporate Design der Universität. Dass Wissenschaft ständig im Wandel begriffen ist, wird somit auch über ein „neues Gesicht“ unterstrichen.

Die Artikel in diesem Heft wären aber in einem leeren Raum nichts wert. Anerkennung erlangen die Beiträge erst durch Sie, die Leserinnen und Leser. Erst durch Ihre Rezeption können die dargestellten Forschungsergebnisse Früchte tragen. Und so wünsche ich Ihnen, dass die Ideen des vorliegenden Bandes bei Ihnen auf Interesse stoßen und auf vielfältige Weise anregend wirken.

Möge das vorliegende Heft also den Diskurs über die Wissenschaft beflügeln. In diesem Sinne wünsche ich Ihnen, liebe Leserinnen und Leser, eine spannende und ertragreiche Lektüre.

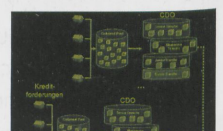
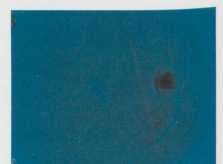
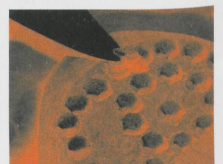
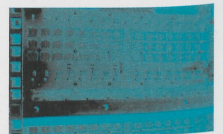
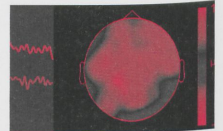
*T. Strothotte*

Prof. Dr. Thomas Strothotte  
Rektor der Universität Regensburg



# Inhalt

Gedächtnis	3	<b>Warum Vergessen wichtig ist</b> Wie sich unser Gedächtnis unerwünschte Erinnerungen vom Leibe hält <i>Karl-Heinz T. Bäuml</i>
Sehen und Verstehen	10	<b>Blicke ins »Buch« der Natur</b> Text und Bild, Sehen und Erkennen bei Konrad von Megenberg <i>Edith Feistner, Christoph Wagner</i>
Essay	18	<b>Dummheit und Witz</b> Lob des Nichtwissens <i>Achim Geisenhanslüke</i>
Computational Science	21	<b>Grüne Supercomputer</b> Weltweit energieeffizientester Supercomputer an der Uni Regensburg entwickelt <i>Tilo Wettig</i>
Antike Rechtsgeschichte	28	<b>Inter amicos. Unter Freunden</b> Freundschafts- und Kreditnetzwerke in der römischen Republik <i>Inge Kroppenber</i>
Alte Geschichte	36	<b>Klimawandel, Bevölkerungsexplosion und Ressourcenverbrauch</b> Aufstieg und Niedergang Roms in einer neuen Perspektive <i>Josef Löffl</i>
Chemische Ökologie	41	<b>Die Chemie muss stimmen</b> Bei Insekten sind Duftstoffe oft entscheidend für die Partnerwahl <i>Joachim Ruther</i>
Humangenetik	48	<b>Volkskrankheit altersabhängige Makuladegeneration (AMD)</b> Die Erforschung genetischer Faktoren als Voraussetzung für gezielte Therapiekonzepte <i>Ulrike Friedrich, Lars G. Fritsche, Bernhard H.F. Weber</i>
Risikoanalyse	55	<b>„Giftmüll-Papiere“ und Finanzkrise</b> Fatale Fehleinschätzung der Risiken von strukturierten Kreditprodukten <i>Alfred Hamerle</i>





# Warum Vergessen wichtig ist

## Wie sich unser Gedächtnis unerwünschte Erinnerungen vom Leibe hält

Karl-Heinz T. Bäuml

Gedächtnisinhalte konkurrieren miteinander um das Erinnern. Der zielgerichtete Gebrauch unseres Gedächtnisses erfordert es deshalb, dass der Zugriff auf unerwünschte oder veraltete Inhalte erschwert und so der Abruf erwünschter oder aktueller Informationen erleichtert wird. Es ist eine alte und prominente Idee, dass im menschlichen Gedächtnis inhibitorische Prozesse aktiv sind, die genau diese Funktion erfüllen. In diesem Artikel werden einige neuere kognitive und neurokognitive Befunde zusammengefasst, die direkte Hinweise auf die Existenz einer Vielfalt solcher inhibitorischer Gedächtnisprozesse liefern. Die Befunde weisen darauf hin, dass diese willentlich oder auch automatisch (nicht willentlich) aktiviert werden können. Das Vergessen wurde und wird immer wieder als eine Schattenseite unseres Gedächtnisses angesehen. Die Befunde zeigen jedoch, dass es (auch) eine wichtige und hilfreiche Fähigkeit unseres Gedächtnisses ist.

### Zwischen Gedächtnisinhalten herrscht Konkurrenz

Wir erleben viel im Laufe eines Tages und speichern viel davon in unserem Gedächtnis. Manche der Erfahrungen eines Tages sind hervorstechend und führen zum Speichern sehr spezifischer Details. Die meisten Erfahrungen beinhalten jedoch auch Details, die sie mit anderen Erfahrungen teilen. So speichern wir etwa viele Erlebnisse im Laufe eines Urlaubs in unserem Gedächtnis ein, um doch für all diese Erlebnisse das gemeinsame Merkmal zu kodieren, dass sie Teil genau dieses Urlaubs sind.

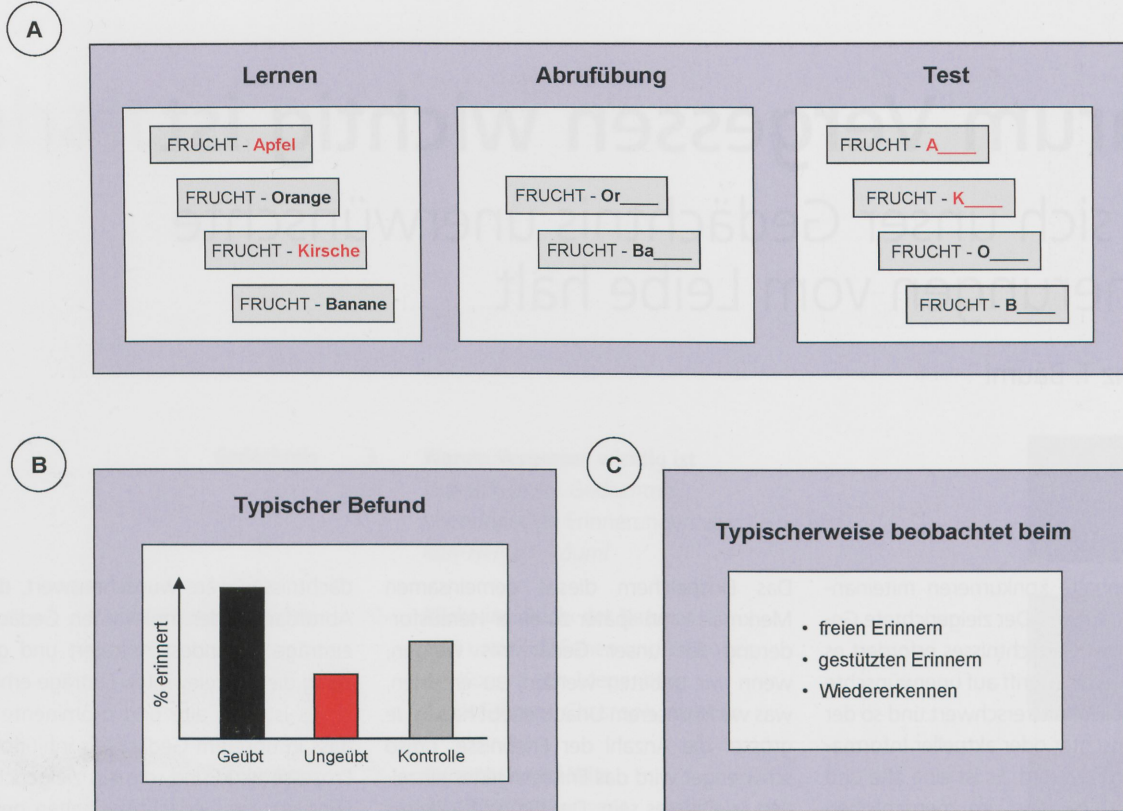
Das Einspeichern dieses gemeinsamen Merkmals kann später zu einer Herausforderung für unser Gedächtnis werden, wenn wir gebeten werden, zu erzählen, was wir in unserem Urlaub erlebt haben. Je grösser die Anzahl der Erlebnisse, umso schwieriger wird das Erinnern jedes einzelnen Erlebnisses sein. Der Grund für dieses Erinnerungsproblem ist ein Abrufwettbewerb. Abrufwettbewerb bezeichnet den Befund, dass Gedächtnisinhalte, die sich ein gemeinsames Merkmal teilen (z. B. alle Erlebnisse eines bestimmten Urlaubs), um das bewusste Erinnern konkurrieren, sobald die mit dem Merkmal verbundenen Inhalte erinnert werden sollen („Erzähl doch mal, was du so alles in deinem Urlaub erlebt hast!“). Diese Konkurrenz zeigt sich meist in reduzierten Erinnerungsquoten oder zumindest in einem verzögerten Erinnern für die einzelnen Inhalte.

Abrufwettbewerb stellt eine Herausforderung für den zielorientierten Gebrauch unseres Gedächtnisses dar. Im täglichen Leben teilen sich relevante und irrelevante Gedächtnisinhalte nämlich oftmals ein gemeinsames Merkmal und konkurrieren so um das Erinnern. Dies gilt etwa für die relevanten und irrelevanten Dinge, die sich im Laufe eines Tages im Büro ereignen haben, das abgelaufene und das aktuelle Passwort unseres Computers oder die veraltete und aktuelle Telefonnummer eines Freundes. Wenn wir dann versuchen, die aktuelle Information aus unserem Gedächtnis abzurufen, so kann das Erinnern misslingen, weil wir statt der relevanten und aktuellen Information (das aktuelle Passwort) die irrelevante oder veraltete Information (das alte Passwort) erinnern. Eine effektive Aktualisierung unseres Ge-

dächtnisses wäre wünschenswert, die die Abrufbarkeit der irrelevanten Gedächtniseinträge zumindest reduziert und gleichzeitig die der relevanten Einträge erhöht.

Es ist eine alte und prominente Idee, dass in unserem Gedächtnis inhibitorische Prozesse aktiv sind, die ein zielgerichtetes Erinnern von Gedächtnisinhalten gewährleisten, und dabei die Abrufbarkeit irrelevanter Inhalte reduzieren und die von relevanten Inhalten erhöhen. Solche inhibitorischen Prozesse können einerseits willentlich, andererseits automatisch (nicht willentlich) initiiert werden. So haben Forschungen der letzten Dekaden gezeigt, dass bereits der Hinweis, gerade Gelerntes wieder vergessen zu können und stattdessen neue, wichtigere Inhalte einzuspeichern, zu einem willentlichen Vergessen von Gedächtnisinhalten führen kann. Auch die Aufforderung an Probanden, eine unerwünschte Erinnerung nicht ins Bewusstsein kommen zu lassen, kann zu einem Vergessen der unterdrückten Informationen führen. Schließlich kann Vergessen auch durch den selektiven Abruf verwandter Gedächtnisinhalte induziert werden, und dies auch ohne den Wunsch, die Inhalte zu vergessen. In all diesen Fällen wird die Aktivität inhibitorischer Prozesse vermutet, die den zielgerichteten Gebrauch des Gedächtnisses unterstützt. Ich werde im Folgenden Befunde zu drei experimentellen Paradigmen vorstellen, mit deren Hilfe inhibitorische Prozesse beim menschlichen Erinnern untersucht worden sind. Diese experimentellen Paradigmen spezifizieren Versuchsanordnungen, die auf der Grundlage von inhibitorischen Theorien des menschlichen Gedächtnisses entwickelt wurden.

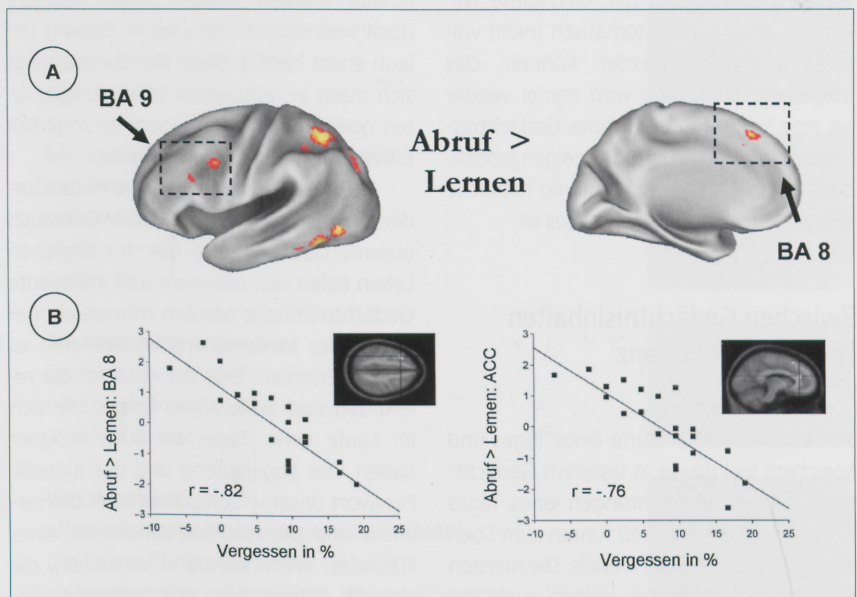




**1** Abrufinduziertes Vergessen. (A) Das experimentelle Paradigma. Probanden lernen eine kategorisierte Wortliste. In einer darauf folgenden Abrufübungsphase wird die Hälfte der Items aus der Hälfte der gelernten Kategorien wiederholt aus dem Gedächtnis abgerufen. Beim abschließenden Test sollen dann alle gelernten Items erinnert werden. (B) Der typische Befund. Geübte Items werden besser (schwarzer Balken) und ungeübte Items aus geübten Kategorien werden schlechter (roter Balken) erinnert als Kontrollitems aus ungeübten Kategorien (grauer Balken). (C) Beispiele von Gedächtnistests, in denen der Effekt bisher beobachtet wurde.

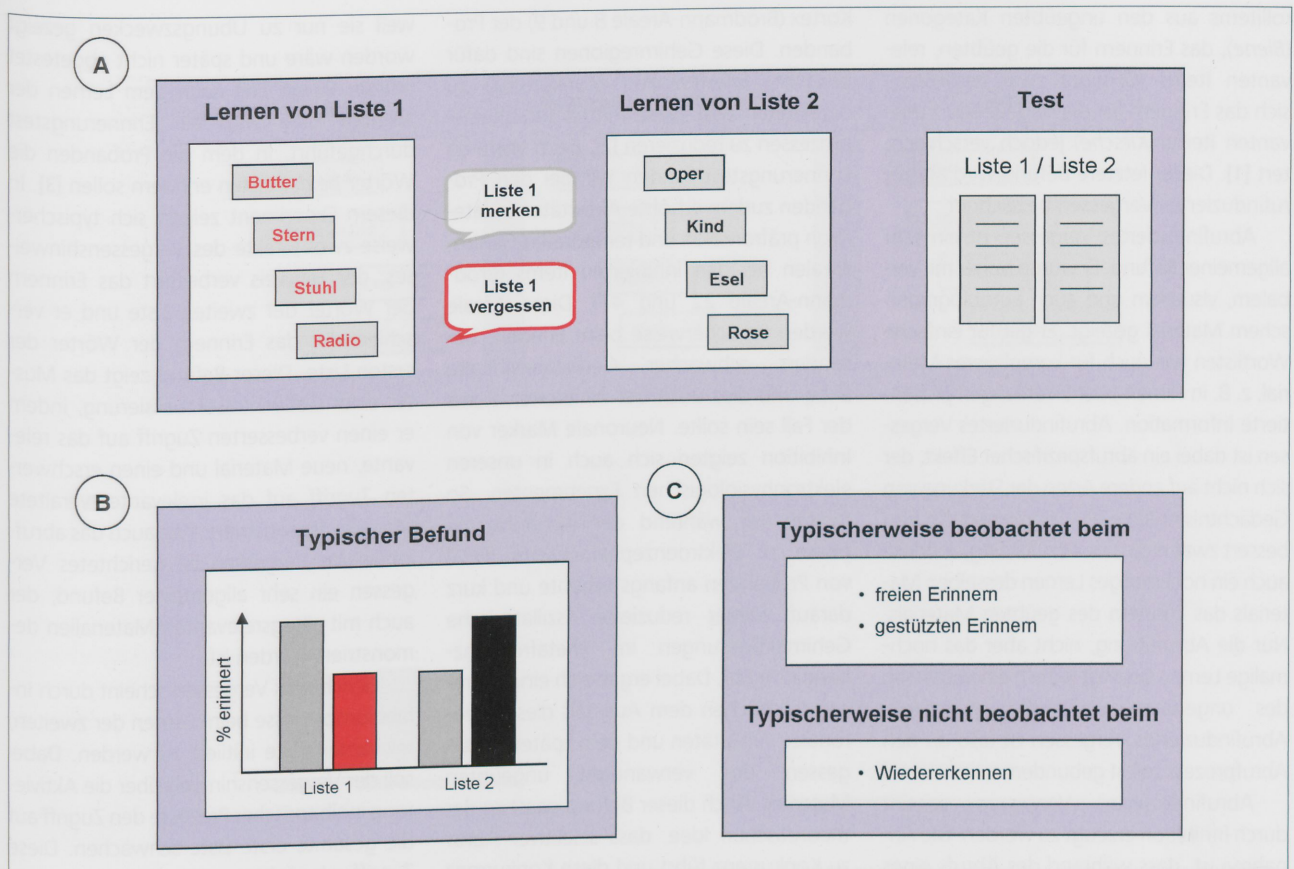
## Selektiver Abruf kann Vergessen erzeugen

Das Erinnern relevanter Gedächtnisinhalte lässt sich dadurch verbessern, dass diese Inhalte immer wieder mal aus dem Gedächtnis abgerufen werden. Dieser wiederholte Abruf verbessert jedoch nicht nur das Erinnern des relevanten Materials, er reduziert zugleich das Erinnern verwandter irrelevanter Gedächtnisinhalte. Dieses Phänomen wird abrufinduziertes Vergessen genannt und mithilfe des Abrufübungsparadigmas untersucht. In diesem Paradigma lernen Probanden etwa Wörter aus unterschiedlichen semantischen Wortkategorien (z. B. FRUCHT-Orange, FRUCHT-Kirsche, INSEKT-Biene). In einer darauf folgenden Übungsphase rufen sie dann wiederholt die Hälfte der Wörter aus der Hälfte der Kategorien ab (z. B. FRUCHT-Or\_\_\_). Einige Zeit später wird dann die Gedächtnisleistung für alle anfangs gelernten Wörter getestet. Der typische Befund in diesem Experiment ist, dass sich, relativ zu den Kont-

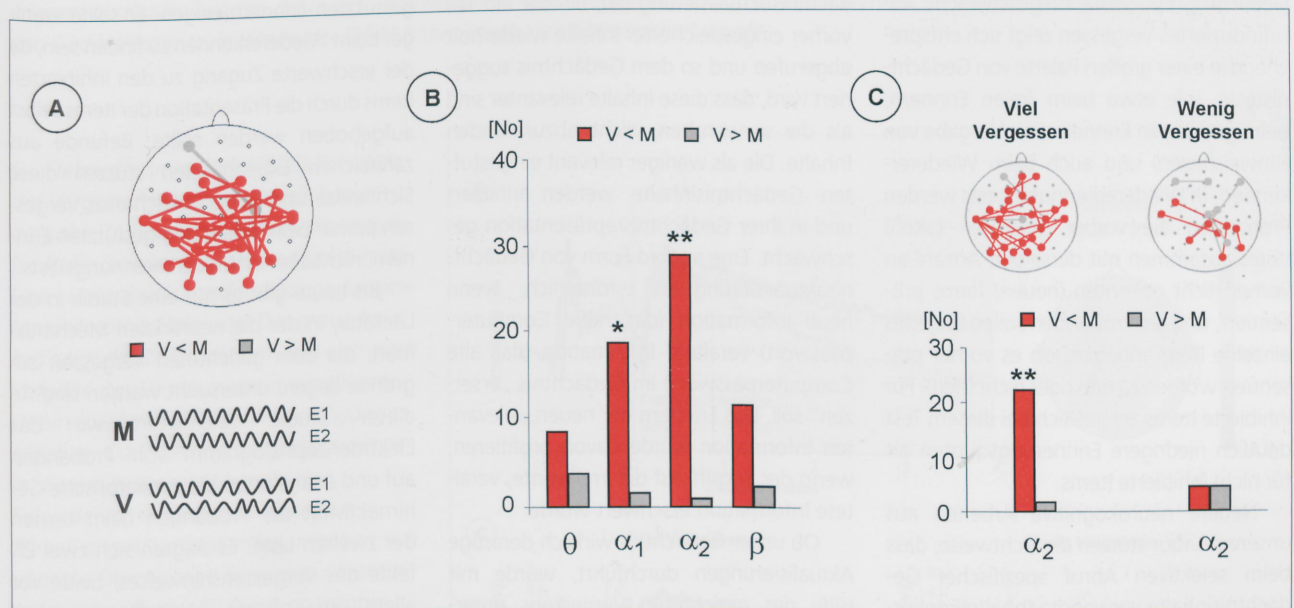


**2** (A) Häodynamische (fMRI) Korrelate des abrufinduzierten Vergessens. Während der Abrufübung zeigen sich im Vergleich zu einem nochmaligen Lesen derselben Wörter (Lernen) erhöhte Aktivitäten im lateralen und medialen präfrontalen Kortex (Brodmann-Areale 8 und 9) der Probanden. (B) Diese erhöhten kortikalen Aktivitäten, wie auch die erhöhten Aktivitäten im anterioren cingulären Kortex (ACC), korrelieren mit dem späteren Vergessen ( $r$  = Korrelationskoeffizient).





3 Gerichtetes Vergessen. (A) Das experimentelle Paradigma. Probanden lernen zwei Wortlisten und erhalten nach dem Lernen der ersten Liste den Hinweis, sich die Liste zu merken oder aber sie wieder zu vergessen. Nach dem Lernen der zweiten Liste findet ein Erinnerungstest aller vorher gelernten Items statt. (B) Der typische Befund. Verglichen mit der Merkebedingung (die beiden grauen Balken) ist in der Vergessensbedingung das Erinnern der Items der ersten Liste verschlechtert (roter Balken) und das Erinnern der Items der zweiten Liste verbessert (schwarzer Balken). (C) Beispiele von Gedächtnistests, in denen der Effekt bisher (nicht) beobachtet wurde.



4 Elektrophysiologische (EEG) Korrelate des gerichteten Vergessens. (A) In der Vergessensbedingung [V] zeigen sich im Vergleich zur Merkebedingung [M] reduzierte Phasenkoppelungen zwischen einzelnen Elektrodenpaaren (rote Linien). Der Effekt reduzierter Phasenkoppelung auf das elektrophysiologische Signal ist skizzenhaft für zwei Elektroden E1 und E2 gezeigt. (B) Anzahl von reduzierten Phasenkoppelungen in den einzelnen Frequenzbändern. Der Effekt zeigt sich primär im oberen Alphafrequenzband (11-13 Hz) und weniger in niedrigeren und höheren Frequenzbändern. (C) Der Effekt korreliert mit dem Vergessen beim Test und zeigt sich vor allem bei den Probanden, die später viel Vergessen zeigen.



rollitems aus den ungeübten Kategorien (*Biene*), das Erinnern für die geübten, relevanten Items (*Orange*) zwar verbessert, sich das Erinnern für die ungeübten, irrelevanten Items (*Kirsche*) jedoch verschlechtert [1]. Dieser letztere Befund wird als abrufinduziertes Vergessen bezeichnet.

Abrufinduziertes Vergessen ist ein sehr allgemeiner Befund. Er wurde bisher mit verbalem, visuellem und auch autobiographischem Material gezeigt. Er gilt für einfache Wortlisten wie auch für komplexeres Material, z. B. in Filmen oder Erzählungen präsentierte Information. Abrufinduziertes Vergessen ist dabei ein abrufspezifischer Effekt, der sich nicht auf andere Arten der Stärkung von Gedächtnisinhalten verallgemeinert. So verbessert zwar nicht nur Abrufübung, sondern auch ein nochmaliges Lernen desselben Materials das Erinnern des geübten Materials. Nur die Abrufübung, nicht aber das nochmalige Lernen bedingt jedoch ein Vergessen des ungeübten verwandten Materials. Abrufinduziertes Vergessen ist also an den Abrufprozess selbst gebunden.

Abrufinduziertes Vergessen scheint durch Inhibition erzeugt zu werden. Die Annahme ist, dass während des Abrufs eines Teils früher gelernten Materials verwandte Inhalte um das Erinnern konkurrieren. Um diese Konkurrenz zu reduzieren und ein erfolgreiches Erinnern des abzurufenden Materials zu gewährleisten, werden die konkurrierenden Inhalte inhibiert und in ihrer Gedächtnisrepräsentation geschwächt. Abrufinduziertes Vergessen zeigt sich entsprechend in einer großen Palette von Gedächtnistests, wie etwa beim freien Erinnern, beim gestützten Erinnern (mit Vorgabe von Hinweisreizen) und auch beim Wiedererkennen. In Wiedererkennungstests werden Probanden die vorher gelernten (alten) Items zusammen mit derselben Anzahl an vorher nicht gelernten (neuen) Items präsentiert, und die Probanden sollen für jedes einzelne Item angeben, ob es vorher präsentiert worden ist (alt) oder nicht (neu). Für inhibierte Items zeigen sich bei diesem Test deutlich niedrigere Erinnerungsquoten als für nicht inhibierte Items.

Neuere neurokognitive Arbeiten aus unserem Labor stützen die Sichtweise, dass beim selektiven Abruf spezifischer Gedächtnisinhalte verwandte Inhalte konkurrieren und diese Konkurrenz durch Inhibition reduziert wird. In Experimenten mit bildgebenden Verfahren etwa fanden wir während der Abrufübung erhöhte Aktivitäten im anterioren cingulären Kortex und im lateralen und medialen präfrontalen

Kortex (Brodmann-Areale 8 und 9) der Probanden. Diese Gehirnregionen sind dafür bekannt, Interferenzen (Konkurrenz) zu detektieren und diese mittels Inhibitionsprozessen zu reduzieren [2]. Beim späteren Erinnerungstest fanden wir bei den Probanden zudem erhöhte Aktivitäten in lateralen präfrontalen und temporalen Gehirnarealen bei den inhibierten Items (Brodmann-Areale 22 und 47). Diese Areale werden typischerweise beim Erinnern besonders schwacher Gedächtnisinhalte aktiv, wie dies auch bei inhibierten Items der Fall sein sollte. Neuronale Marker von Inhibition zeigten sich auch in unseren elektrophysiologischen Experimenten. So fanden wir während der Abrufübungsphase im Elektroenzephalogramm (EEG) von Probanden anfangs erhöhte und kurz darauf wieder reduzierte oszillatorische Gehirnaktivierungen im Thetafrequenzband (5-9 Hz). Dabei ergab sich eine Korrelation zwischen dem Ausmaß dieser neuronalen Aktivitäten und dem späteren Vergessen des verwandten ungeübten Materials. Auch dieser Befund passt zu der theoretischen Idee, dass selektiver Abruf zu Konkurrenz führt und diese Konkurrenz inhibitorische Prozesse aktiviert.

## Vergessen auf Befehl

Selektiver Abruf stellt eine Form von Gedächtnisaktualisierung dar, bei der ein Teil vorher eingespeicherter Inhalte wiederholt abgerufen und so dem Gedächtnis suggeriert wird, dass diese Inhalte relevanter sind als die verwandten, nicht abzurufenden Inhalte. Die als weniger relevant eingestuftes Gedächtnisinhalte werden inhibiert und in ihrer Gedächtnisrepräsentation geschwächt. Eine andere Form von Gedächtnisaktualisierung ist erforderlich, wenn neue Information (das neue Computerpasswort) veraltete Information (das alte Computerpasswort) im Gedächtnis „ersetzen“ soll. Das Erinnern der neuen, relevanten Information würde davon profitieren, wenn der Zugriff auf die irrelevante, veraltete Information erschwert würde.

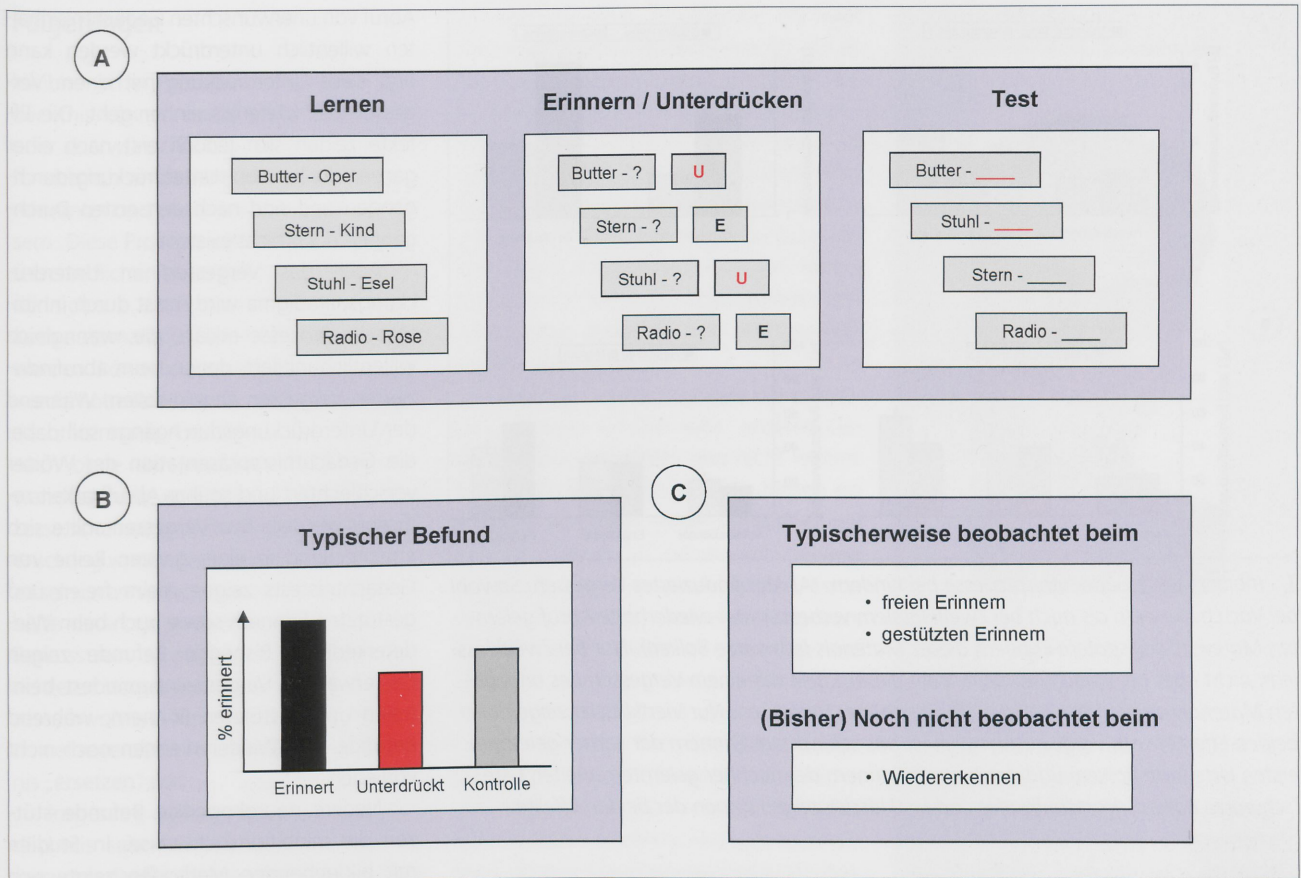
Ob unser Gedächtnis wirklich derartige Aktualisierungen durchführt, wurde mit Hilfe des gerichteten Vergessens untersucht. Bei dieser willentlichen Vergessensform lernen Probanden zwei Wortlisten. Nach dem Lernen der ersten Liste erhalten sie den Hinweis, sich diese Liste weiter zu merken, oder aber sie erhalten den Hinweis, diese Liste wieder zu vergessen, etwa

weil sie nur zu Übungszwecken gezeigt worden wäre und später nicht abgetestet würde. Einige Zeit nach dem Lernen der zweiten Liste wird ein Erinnerungstest durchgeführt, in dem die Probanden die Wörter *beider* Listen erinnern sollen [3]. In diesem Experiment zeigen sich typischerweise zwei Effekte des Vergessenshinweises: der Hinweis verbessert das Erinnern der Wörter der zweiten Liste und er verschlechtert das Erinnern der Wörter der ersten Liste. Dieser Befund zeigt das Muster einer Gedächtnisaktualisierung, indem er einen verbesserten Zugriff auf das relevante, neue Material und einen erschwerten Zugriff auf das irrelevante, veraltete Material demonstriert. Wie auch das abrufinduzierte Vergessen ist gerichtetes Vergessen ein sehr allgemeiner Befund, der auch mit alltagsrelevanten Materialien demonstriert worden ist.

Gerichtetes Vergessen scheint durch Inhibitionsprozesse beim Lernen der zweiten, relevanten Liste initiiert zu werden. Dabei soll der Vergessenshinweis über die Aktivierung inhibitorischer Prozesse den Zugriff auf die gesamte erste Liste schwächen. Diese Zugriffsschwächung soll zum einen den späteren Abruf der einzelnen Items dieser Liste erschweren, zum anderen, bedingt durch die so reduzierte Konkurrenz zwischen den beiden Listen, den Zugriff auf die Items der zweiten Liste erleichtern. Der Vergessenseffekt sollte sich so vor allem beim freien und gestützten Erinnern zeigen. Er sollte weniger beim Wiedererkennen zu finden sein, da der erschwerte Zugang zu den inhibierten Items durch die Präsentation der Items selbst aufgehoben werden sollte. Befunde aus zahlreichen Experimenten stützen diese Sichtweise und zeigen gerichtetes Vergessen primär beim freien und gestützten Erinnern, nicht aber in Wiedererkennungstests.

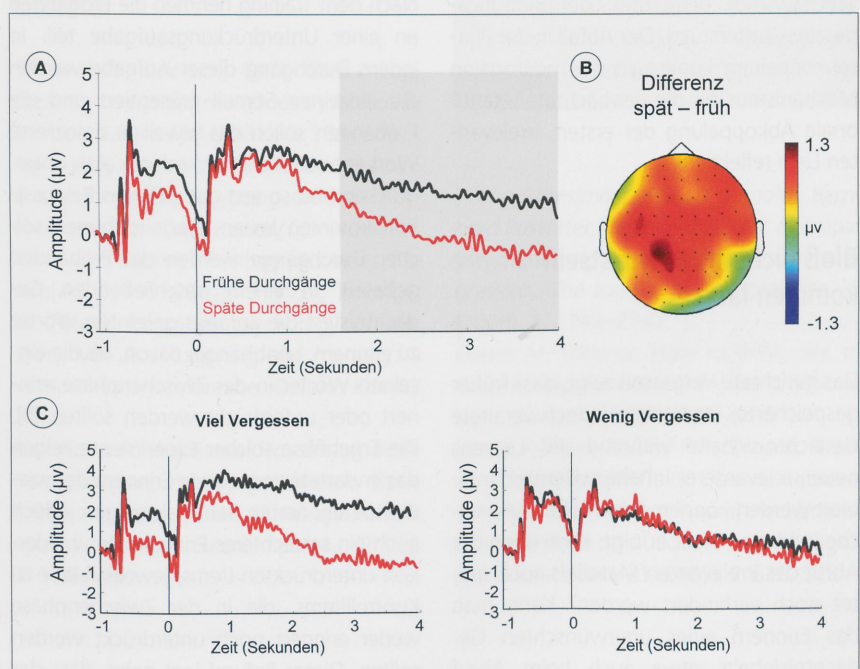
Bis heute gibt es nur eine Studie in der Literatur, in der die neuronalen Mechanismen, die dem gerichteten Vergessen zugrunde liegen, untersucht worden sind. In dieser Studie zeichneten wir das Elektroenzephalogramm von Probanden auf und analysierten die oszillatorische Gehirnaktivität der Probanden beim Lernen der zweiten Liste. Es zeigten sich zwei Effekte des Vergessenshinweises, beide vor allem im oberen Alphafrequenzband (11-13 Hz): Zum einen führte der Vergessenshinweis zu einer Erhöhung der Amplitude in diesem Frequenzband, zum anderen zu einer Reduktion in der Phasenkoppelung zwischen einzelnen Elektrodenpaaren [4]. Während die Zunahme in der



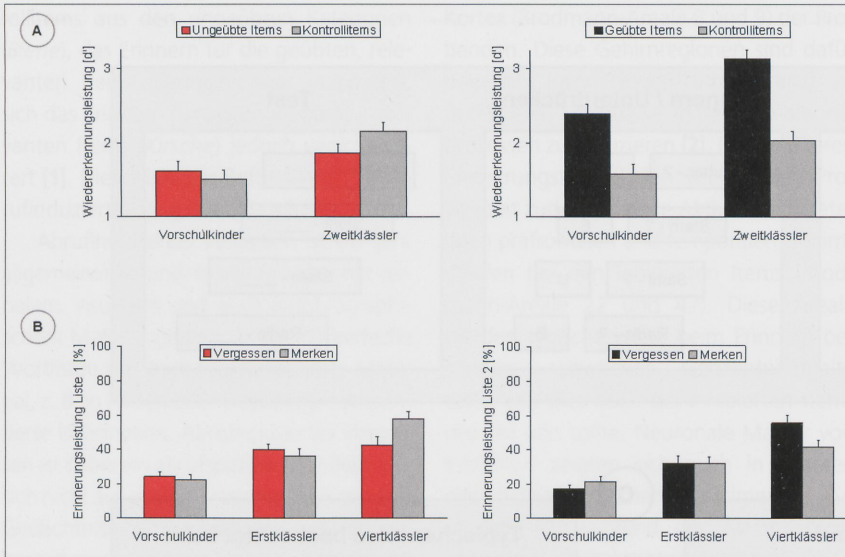


**5 Vergessen in der Unterdrückungsaufgabe.** (A) Das experimentelle Paradigma. Probanden lernen assoziierte Wortpaare. Nach dem Lernen findet eine Unterdrückungsaufgabe statt. In jedem Durchgang dieser Aufgabe werden die einzelnen Stimuli eines Wortpaares präsentiert und die Probanden sollen das jeweilige assoziierte Wort entweder erinnern [E] oder es aktiv unterdrücken [U] und so erst gar nicht ins Bewusstsein kommen lassen. Nach mehreren solcher Durchgänge werden die Probanden dann gebeten, in einem abschließenden Gedächtnistest alle assoziierten Wörter unter Vorgabe ihrer jeweiligen Stimuli zu erinnern. (B) Der typische Befund. Zu erinnernde Wörter werden besser (schwarzer Balken) und zu unterdrückende Wörter werden schlechter (roter Balken) erinnert als Kontrollwörter, die in der Zwischenphase weder erinnert noch unterdrückt werden sollten (grauer Balken). (C) Beispiele von Gedächtnistests, in denen der Effekt bisher (noch nicht) beobachtet wurde.

**6 Elektrophysiologische (EEG) Korrelate des Vergessens in der Unterdrückungsaufgabe.** (A) Ereigniskorrelierte Potentiale für frühe (schwarze Linie) und späte (rote Linie) Unterdrückungsdurchgänge für eine repräsentative Elektrode. Der graue Balken zeigt das Zeitfenster, in dem sich nach Vorgabe des Stimuluswortes signifikante Unterschiede zwischen den Durchgängen ergaben. Da Unterdrückungsdurchgänge in diesem Experiment bereits eine Sekunde vor Vorgabe der einzelnen Stimuli angekündigt wurden, ergaben sich über die Durchgänge hinweg auch antizipatorische Effekte. (B) Die Topographie des Effekts. Rote Farben zeigen eine reduzierte Positivierung über die Durchgänge hinweg an. (C) Der Effekt korreliert mit dem Ausmaß des Vergessens und zeigt sich vor allem bei den Probanden, die später viel Vergessen zeigen.







**7 Inhibitorische Gedächtnisprozesse bei Kindern.** (A) Abrufinduziertes Vergessen. Sowohl bei Vorschulkindern als auch bei Zweitklässlern verbessert der wiederholte Abruf gelernten Materials das spätere Erinnern dieses Materials (schwarze Balken). Nur bei Zweitklässlern, nicht aber bei Vorschulkindern, geht dieser Effekt mit einem Vergessen des ungeübten Materials einher (rote Balken). (B) Gerichtetes Vergessen. Nur Viertklässler zeigen die beiden Effekte eines Vergessenshinweises, das schlechtere Erinnern der vorher gelernten ersten Liste (rote Balken) und das bessere Erinnern der nachher gelernten zweiten Liste (schwarze Balken). Vorschulkinder und Erstklässler zeigen keinen der beiden Effekte.

Amplitude das spätere verbesserte Erinnern der Items der zweiten, relevanten Liste vorhersagte, sagte die reduzierte Phasenkoppelung das schlechtere Erinnern der Items der ersten, irrelevanten Liste vorher. Die Phasenkoppelung zwischen Elektroden wird oft als Maß für die Synchronizität zwischen entfernten neuronalen Einheiten angesehen und kohärentes Feuern zwischen entfernten neuronalen Populationen als Mechanismus betrachtet, der Bindungsprozesse unterstützt. Der Abfall in der Phasenkoppelung könnte so den neuronalen Mechanismus für die beobachtete intentionale Abkoppelung der ersten, irrelevanten Liste reflektieren.

## Bloß nicht ins Bewusstsein kommen lassen

Das gerichtete Vergessen zeigt, dass früher gespeicherte, inzwischen jedoch veraltete Gedächtnisinhalte während des Lernens neuer, relevanterer Inhalte willentlich inhibiert werden können. Wenn aber eine solche Inhibition nicht erfolgt, kann dann der Abruf des irrelevanten Materials auch später noch verhindert werden? Kann man das Erinnern eines unerwünschten Gedächtnisinhalts etwa auch beim Abruf

selbst noch stoppen und so verhindern, dass der Inhalt seinen Weg in unser Bewusstsein findet? Diese Frage wird seit einigen Jahren mit Hilfe des Unterdrückungsparadigmas untersucht.

In diesem Paradigma lernen Probanden Wortpaare (z. B. *Butter-Oper*) und werden dabei trainiert, mit dem passenden assoziierten Wort (*Oper*) zu antworten, wenn der dazugehörige Stimulus (*Butter*) erscheint. Nach dem Training nehmen die Probanden an einer Unterdrückungsaufgabe teil. In jedem Durchgang dieser Aufgabe werden die einzelnen Stimuli präsentiert und die Probanden sollen das jeweilige assoziierte Wort entweder erinnern oder es aktiv unterdrücken und so erst gar nicht ins Bewusstsein kommen lassen. Nach mehreren solcher Durchgänge werden die Probanden gebeten, in einem abschließenden Gedächtnistest die anfangs gelernten Wörter zu erinnern, unabhängig davon, ob die einzelnen Wörter in der Zwischenphase erinnert oder unterdrückt werden sollten [5]. Die Ergebnisse solcher Experimente zeigen das erwartete verbesserte Erinnern der wiederholt erinnerten Items, sie zeigen jedoch auch ein schlechteres Erinnern der wiederholt unterdrückten Items, jeweils relativ zu Kontrollitems, die in der Zwischenphase weder erinnert noch unterdrückt werden sollten. Dieser Befund legt nahe, dass der

Abruf von unerwünschten Gedächtnisinhalten willentlich unterdrückt werden kann und diese Unterdrückung mit einem Vergessen des Materials einher geht. Die Effekte zeigen sich jedoch erst nach einer ganzen Reihe von Unterdrückungsdurchgängen und sind nach den ersten Durchgängen noch nicht existent.

Auch das Vergessen im Unterdrückungsparadigma wird meist durch inhibitorische Prozesse erklärt, die, wenngleich willentlich initiiert, denen beim abrufinduzierten Vergessen ähneln sollen. Während der Unterdrückungsdurchgänge soll dabei die Gedächtnisrepräsentation der Wörter verschlechtert und so ihre Abrufbarkeit reduziert werden. Das Vergessen sollte sich entsprechend in einer ganzen Reihe von Gedächtnistests zeigen, beim freien und gestützten Erinnern sowie auch beim Wiedererkennen. Bisherige Befunde zeigen das erwartete Vergessen zumindest beim freien und gestützten Erinnern, während Befunde zum Wiedererkennen noch nicht vorliegen.

Neuere neurokognitive Befunde stützen die Inhibitionssichtweise. In Studien mit bildgebenden Methoden zeigte sich etwa während der Unterdrückungsdurchgänge eine erhöhte Aktivität im lateralen präfrontalen Kortex sowie eine reduzierte Aktivität im Hippocampus von Probanden. Die Aktivitäten im präfrontalen Kortex scheinen dabei Kontrolle über die Hippocampusaktivitäten auszuüben und so das Erinnern der unerwünschten Gedächtnisinhalte zu verhindern. Beide neuronalen Aktivitäten korrelierten über die Probanden hinweg mit dem Ausmaß des späteren Vergessens. Wir untersuchten elektrophysiologische Aktivitäten von Probanden während der Unterdrückungsdurchgänge. Dabei fanden wir in den anfänglichen Unterdrückungsdurchgängen eine über frontale und parietale Elektroden hinweg lang anhaltende ereigniskorrelierte Positivierung, die in späteren Unterdrückungsdurchgängen deutlich reduziert war [6]. Diese Reduktion kehrt den vielfach bestätigten elektrophysiologischen Effekt erfolgreichen Abrufs um, der besagt, dass eine stärkere langanhaltende Positivierung mit einem erfolgreichen Abruf von Gedächtnisinhalten einhergeht. Der Befund legt somit nahe, dass der Abruf der unerwünschten Gedächtnisinhalte im Laufe der Durchgänge willentlich unterdrückt werden kann und so ein späteres Vergessen der unerwünschten Inhalte erzeugt.



## Folgerungen

Inhibitorische Prozesse in unserem Gedächtnis können das Erinnern irrelevanter oder unerwünschter Gedächtnisinhalte offensichtlich verhindern und so das Erinnern relevanter und erwünschter Inhalte verbessern. Diese Prozesse operieren in recht unterschiedlichen Situationen und unterscheiden sich u. a. darin, dass sie willentlich oder auch automatisch (nicht willentlich) initiiert werden können. So aktiviert bereits der wiederholte selektive Abruf spezifischer Gedächtnisinhalte inhibitorische Prozesse auch ohne den expliziten Wunsch, verwandte Inhalte zu inhibieren. Ähnliche Prozesse scheinen bei der willentlichen Unterdrückung von Gedächtnisinhalten am Werk zu sein, wenn unerwünschte Gedächtnisinhalte daran gehindert werden sollen, ins Bewusstsein zu gelangen. Auch beim gerichteten Vergessen sind inhibitorische Prozesse involviert, wenn eine neue Information eine veraltete Information im Gedächtnis „ersetzen“ soll.

Insgesamt scheint es, dass unser Gedächtnis sehr flexibel operiert, wenn es versucht, das Erinnern unerwünschter oder zumindest irrelevanter Gedächtnisinhalte zu verhindern. Die dabei jeweils aktiven Mechanismen sind angepasst an die Bedürfnisse der jeweiligen Situation. Nicht ein einzelner, allgemeiner Inhibitionsmechanismus, sondern eine Vielfalt an spezifischen Mechanismen ist am Werk, um so dem Erinnern irrelevanter Inhalte über eine möglichst große Bandbreite an Situationen hinweg entgegen zu wirken.

Verfügen alle Menschen über solche inhibitorischen Gedächtnisprozesse? Sowohl Kindern als auch älteren Erwachsenen wird oftmals ein allgemeines Inhibitionsdefizit zugeschrieben, das diese Personen in mehr oder weniger allen kognitiven Aufgaben (Gedächtnisaufgaben, Aufmerksamkeitsaufgaben, Entscheidungsaufgaben etc.) daran hindern soll, irrelevante Informationen zu unterdrücken. Kürzliche Experimente aus unserem Labor zum abrufinduzierten Vergessen und zum gerichteten Vergessen stützen diese Sichtweise für Kinder. Wir fanden, dass Vorschulkinder und auch Erstklässler im Allgemeinen noch nicht über diese inhibitorischen Gedächtnisprozesse verfügen, so dass es ihnen oftmals schwer fällt, irrelevante Gedächtnisinhalte zu unterdrücken. Erst Zweitkläss-

ler, und vor allem Viertklässler, verfügen über intakte Inhibitionsprozesse [7]. Bei älteren Erwachsenen fanden wir keine Defizite bei inhibitorischen Gedächtnisfunktionen, so dass inhibitorische Prozesse im Gedächtnis sich von inhibitorischen Prozessen in anderen kognitiven Bereichen zu unterscheiden scheinen. Inhibitorische Defizite zeigen sich jedoch bei einigen Patientengruppen, wie etwa schizophrenen Personen oder Personen mit posttraumatischem Stresssyndrom.

Vergessen wurde und wird immer wieder als eine Schattenseite unseres Gedächtnisses angesehen, und nicht wenige Menschen wünschten sich, am besten nie etwas zu vergessen. In der Tat kennen wir alle Situationen, in denen wir gewisse Dinge lieber nicht vergessen hätten. Trotzdem kann es wenig Zweifel daran geben, dass Vergessen (auch) eine wichtige und hilfreiche Leistung unseres Gedächtnisses ist. Wissenschaftlich ist diese Erkenntnis noch relativ neu. Théodule Ribot (1839–1916) erschien diese Erkenntnis jedoch bereits Ende des 19. Jahrhunderts offensichtlich. Seine Einschätzung, dass „Vergesslichkeit [...] keine Krankheit des Gedächtnisses, sondern eine Voraussetzung für seine Gesundheit [ist]“, wird durch die modernen wissenschaftlichen Befunde eindrucksvoll bestätigt. Sie demonstrieren, dass das effektive Erinnern aktueller oder erwünschter Gedächtnisinhalte erst durch die Inhibition der veralteten oder unerwünschten Erinnerungen ermöglicht wird.

## Literatur

Michael C. Anderson, Collin Green, Suppressing unwanted memories by executive control. *Nature* 410 (2001), S. 366–369.  
 Alp Aslan, Karl-Heinz Bäuml, Retrieval-induced forgetting in young children. *Psychonomic Bulletin & Review* (im Druck).  
 Karl-Heinz Bäuml, Inhibitory processes. Kapitel 13, S. 195–220. In: Henry L. Roediger III (Hrsg.), *Cognitive psychology of memory*, Vol. 2 of *Learning and memory: A comprehensive reference*. Oxford: Elsevier 2008.  
 Karl-Heinz Bäuml, Simon Hanslmayr, Bernhard Pastötter, Wolfgang Klimesch, Oscillatory correlates of intentional updating in episodic memory. *NeuroImage* 41 (2008), S. 596–604.



Prof. Dr. **Karl-Heinz T. Bäuml**, geb. 1960 in Weiden/Opf., Studium der Psychologie an den Universitäten Regensburg und Erlangen, 1989 Promotion und 1997 Habilitation an der Universität Regensburg, Forschungsaufenthalte an der Stanford University/USA, seit 2004 Inhaber des Lehrstuhls für Psychologie am Institut für Experimentelle Psychologie der Universität Regensburg. Abgelehnte Rufe an die Carl-von-Ossietzky-Universität Oldenburg und an die Universität des Saarlandes.

**Forschungsschwerpunkte:** Kognitive, neuronale und emotionale Mechanismen des menschlichen Gedächtnisses, insbesondere Selektives Erinnern, Willentliches Vergessen, Emotion und Vergessen, Gedächtnis über die Lebensspanne.

Simon Hanslmayr, Philipp Leibold, Bernhard Pastötter, Karl-Heinz Bäuml, Anticipatory signatures of voluntary memory suppression. *The Journal of Neuroscience* 29 (2009), S. 2742–2747.

Daniel M. Wegner, How to think, say, or do precisely the worst thing for any occasion. *Science* 325 (2009), S. 48–51.

Maria Wimber, Roland Rutschmann, Mark W. Greenlee, Karl-Heinz Bäuml, Retrieval from episodic memory: Neural mechanisms of interference resolution. *Journal of Cognitive Neuroscience* 21 (2009), S. 538–549.



# Blicke ins ›Buch‹ der Natur

## Text und Bild, Sehen und Erkennen bei Konrad von Megenberg

Edith Feistner  
Christoph Wagner

Der vielseitige Gelehrte Konrad von Megenberg, 1309 geboren, kam 1348 nach europäischen Bildungsstationen in Erfurt, Paris und Wien nach Regensburg. Mit seiner Aufnahme in das dortige Domkapitel hatte er, fast vierzigjährig, nach ‚befristeten‘ Lern- und Lehrtätigkeiten eine ‚Lebenszeitstelle‘ erhalten. Anlässlich seines 700. Geburtstagsjubiläums veranstaltete der Lehrstuhl für germanistische Mediävistik im Jahr 2009 zusammen mit der Oswald von Wolkenstein-Gesellschaft e.V. eine interdisziplinäre Tagung, an der im Sinne der europäischen Lebensspuren des Jubilars und der geographischen Reichweite, aus der seine lateinischen Vorlagen stammten, auch Wissenschaftler aus England, Frankreich, Italien und Österreich teilnahmen. Die Tagung „Konrad von Megenberg

(1309–1374) – ein spätmittelalterlicher ‚Enzyklopädist‘ im europäischen Kontext“ thematisierte zusammen mit einer Konrad von Megenberg gewidmeten Handschriften- und Inkunabelausstellung in der Bischöflichen Zentralbibliothek Regensburg das alle Fachdisziplinen der damaligen Zeit umspannende Bildungs- und Wirkungsinteresse des Domherrn. Dabei spielte auch sein Interesse, Bildung über die Wissenschaftssprache des Lateins hinaus so anschaulich wie begrifflich prägnant in die Volkssprache zu übertragen, eine wichtige Rolle. Insbesondere mit seiner als *Buch der Natur* bekannten Naturenzyklopädie, einem ‚Bestseller‘ in Handschrift und Druck, war Konrad von Megenberg über 200 Jahre lang im gesamten deutschen Sprachraum eine Autorität. Am Beispiel

dieser ersten auf Deutsch verfassten Naturenzyklopädie soll hier ein Aspekt weiterverfolgt werden, der bei der Tagung mehrfach zur Sprache kam: die Frage nach dem Zusammenhang zwischen Bildern von der Natur und Vorstellungen über Bildverarbeitung im menschlichen Gehirn sowie die Frage nach dem Verhältnis zwischen Text und Bild als unterschiedlichen Medien der Wissensvermittlung, die in den Überlieferungszeugen des *Buchs der Natur* zusammenreffen. Damit liegt zugleich ein Anschluss an den derzeit aufgebauten Themenverbund der Regensburger Universität vor, der sich unter den Leitbegriffen „Sehen und Verstehen“ mit Funktionen, Wahrnehmungsprozessen, Visualisierungsformen und kulturellen Bild- und Textstrategien befasst.



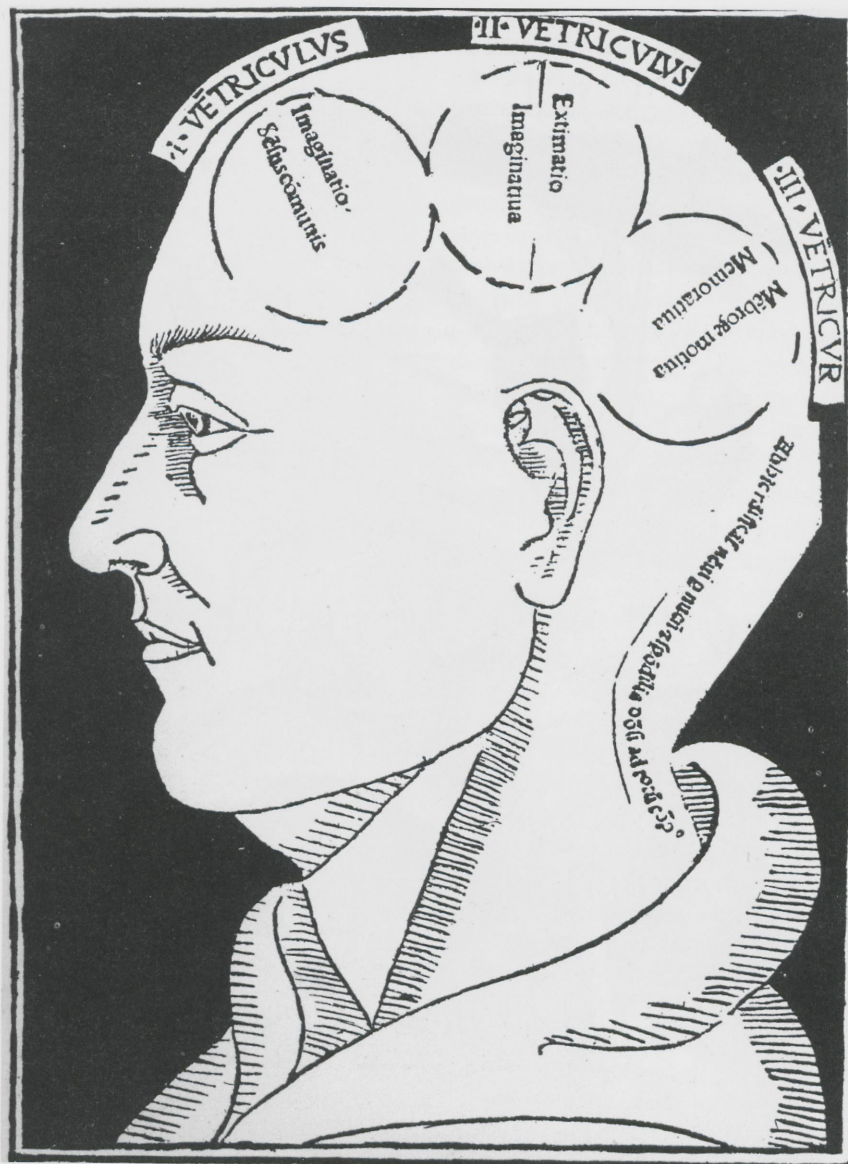
Arpia ist ein vogel vnd wonet in den landen an der stat, die strepidis heizt in der wosten by der jonicum, als adelinus sprichett. Der vogel hat ein grymmen hunger vnd wirt nymer satt. Er hat gar scharphe klagen, geschicht zu rissen vnd zu fahen. Der vogel hat eins menschen antlitz vnd hat kein menschlich tugent an jme, wan er ist so gryme, daz er unmezzlichen yzst. Der vogel erdoit den ersten menschen, der er ansichtig wirt in der wosten. Darnach, wan er von geschicht komet zu eime wazzer vnd sicht sin antlitz darinne, so truret er nit ein kleines. Er truret etwan bizß in den doitt, dar vmb daz er sins glichen erdottet hatt vnd weint alzytt die wil er lebt vmb den doitt vnd umb den mort. Der vogel, wan er gezemet wirt, so rett er menschlich stymme. Aber er hat nit menschlich vernünfft.

1 Arpia, Cod. Pal. germ. 311, fol. 114v, Universitätsbibliothek Heidelberg



## Text und Bild: heutige Erwartungen

Schlägt man in einer gängigen Enzyklopädie die Informationen über eine Tier- oder Pflanzenart nach, so findet man heute in der Regel eine Darstellung in Text und Bild. Man geht von einem direkten Korrespondenzverhältnis zwischen beiden Medien aus: Was der sprachliche Text erklärt, wird im Bild illustriert, und umgekehrt. Schon der Begriff „Illustration“ legt dies nahe. Überprüft man jedoch solch selbstverständlich scheinende Vorannahmen, wird rasch deutlich, dass sich das Verhältnis von Text und Bild weitaus komplexer gestaltet. Was im Text formuliert ist, wird durchaus nicht alles abgebildet, ja kann (zumindest fotografisch) gar nicht ohne weiteres abgebildet werden – man denke nur an zahlenförmig-exakte Größenangaben, Messdaten, Frequenzen –, und manches, was abgebildet wird, ist, wenn man an den Unterschied zwischen Fotografie und Röntgenaufnahme oder Fotografie und Computertomografie denkt, zumindest nicht in gleicher Weise sichtbar. Auch umgekehrt gilt: Was im Bild „illustriert“ wird, steht durchaus nicht alles im Text. Einfaches Beispiel dafür ist die Tatsache, dass man sich allein vom Text her, d.h. ohne die übliche fotografische Abbildung, wie sie uns heute in einschlägigen Enzyklopädieeinträgen begegnet, kaum auch nur annähernd ein Bild davon machen könnte, wie ein Tier oder eine Pflanze aussieht. Hier wird zum einen auf kulturelles Vorwissen und zum anderen auf ein arbeitsteiliges Zusammenwirken der Medien von Text und Bild gesetzt.



2 Hirnventrikel-Schema aus einem Druck der *Philosophia naturalis* des Albertus Magnus, Brixen, Bapt. de Farfegno 1490, aus: Walther Sudhoff, *Die Lehre von den Hirnventrikeln in textlicher und graphischer Tradition des Altertums und Mittelalters*. Leipzig: Barth, 1913, S. 61.

## Historische Befunde (1): Nebeneinander und Miteinander zweier Medienkulturen

Noch deutlicher treten Komplexität und kulturelle Bedingtheit, aber auch der mögliche Facettenreichtum von Text-Bild-Bezügen vor Augen, wenn man in die Geschichte blickt. So war es etwa im Mittelalter keineswegs selbstverständlich, dass ein Rezipient Text und Bild überhaupt gleichermaßen dechiffrieren konnte. Das gilt zumal im Blick auf Handschriften, deren volkssprachliche, d.h. nicht in der mittelalterlichen Schriftsprache des Lateins verfasste Texte auch für ein nicht oder nur teilweise

lesefähiges Publikum gedacht waren, das ggf. die Illustrationen betrachtete, sich den schriftlichen Text aber vorlesen ließ, ihn also in Form eines vom Schriftbild gelösten mündlichen Vortrags hörte. Es ist klar, dass dies Folgen für das Verhältnis zwischen Text und Bild hatte und für die Aufgabe, die das Bild im Vergleich zur Schrift, ja buchstäblich als eigener ‚Schauplatz‘ neben der Schrift, zu erfüllen hatte. Zur Zeit Konrads von Megenberg war die Alphabetisierung immerhin bereits so weit fortgeschritten, dass er daran gehen konnte, den lateinischen Prosatext seiner Vorlage – eine Redaktion des *Liber de natura rerum* von Thomas de Cantimpré (1201–1272), das als Standardlehrbuch im

Lehrbetrieb benutzt wurde – in deutsche Prosa zu übertragen. Er musste dabei auch nicht mehr den in der mittelhochdeutschen Literatur verbreiteten Weg über die Versform gehen, die jahrhundertlang gleichsam das Echo der mündlichen Vortragsform in die schriftliche Überlieferung transponierte. Der deutsche Naturenzyklopädist verband die ursprünglich in der Latinität beheimatete Kultur des Lesens enger mit der Volkssprache und lieferte auf diese Weise mit seinem *Buch der Natur* nun selbst eine Vorlage für die Aktualisierung von Text-Bild-Zusammenhängen, die (unabhängig davon, wie seine eigenen Vorstellungen ausgesehen haben mögen) je nach Bildungsgrad und Interesse der Auf-





3 Diebold Lauber, *Der Löwe*, Cod. Pal. germ. 300, fol. 101r

traggeber oder Käufer von Handschriften des Werkes bzw. je nach der Marktstrategie von Verlegern variieren konnten. Und selbst dort, wo die Überlieferungsgeschichtliche Untersuchung zeigt, dass sich gerade auch Lateinkundige für Konrads deutsche Naturenzyklopädie als ‚Lesehilfe‘ interessierten, bleibt zu fragen, ob nicht zusammen mit der Volkssprachlichkeit des Textes auch hier Spuren eines alten Nebeneinanders zweier Kultur- und Medientraditionen, d.h. der auf Flüchtigkeit und kommunikative Flexibilität ausgelegten (volksprachlichen) mündlichen Tradition und der auf Verbindlichkeit und Stabilität ausgelegten (lateinischen) schriftlichen Tradition, auf das Verhältnis von Schrift und Bild weiterwirkten.

### Historische Befunde (2): Sichtweisen der Natur in Text und Bild

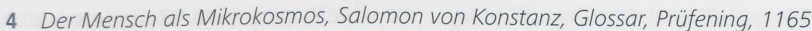
Im Zusammenhang mit der Frage nach dem Verhältnis von Text und Bild stellt sich auch die Frage, welche Grundannahmen im Hinblick auf die Natur vorausgesetzt werden. Heute treffen sich in einschlägigen Enzyklopädieeinträgen Text und Bild bei einer naturwissenschaftlich-distanzierten Sichtweise, die Stör- und Fehleranfälligkeit sowie Reichweitengrenze des menschlichen Auges zu überwinden oder zumindest durch technische Apparaturen zu kontrollieren sucht. Für das Mittelalter ist hingegen von einer umgekehrten Blickrichtung aus-

zugehen: Anstatt vom Menschen möglichst abzusehen, war der Blick auf die Natur hier ganz und gar auf den Bezug zum Menschen, genauer gesagt: auf den Bezug des Menschen als Mikrokosmos der Schöpfung zu Gott, dem Schöpfer, eingestellt. Schon das bei Konrad von Megenberg begegnende Bauprinzip der Naturenzyklopädie, die nicht dem ABC folgt, sondern programmatisch mit dem menschlichen Organismus beginnt und erst von da aus Kosmos, Fauna, Flora und Mineralien behandelt, zeigt dies. Die Begrenztheit des menschlichen Seh- und Erkenntnisvermögens, insbesondere die für unüberwindlich geltende Grenze des nur zeichenhaft vermittelten, indirekten Zugangs zu den Wundern der Schöpfung als Signum menschlicher Unzulänglichkeit, wurde dabei nicht nur mit eingeschlossen, sondern gerade zum Thema gemacht. Man hat die Natur deshalb auch gerne in Metaphern der Vermitteltheit gefasst wie dem ‚Spiegel‘, in den der Mensch blickt, oder dem ‚Buch‘, in dem er liest. Wenn Konrad von Megenberg seine deutsche Naturenzyklopädie ein „Buch von den natürlichen Dingen“ nennt, so schwingt diese metaphorische Bedeutung im Sinn der christlichen Hermeneutik noch mit. Sie weist den „natürlichen Dingen“ den Status von Bedeutungsträgern zu, verlangt also zur Entschlüsselung der ihnen zugeschriebenen Bedeutungen (*significationes*) einen Akt des ‚Lesens‘. Im Unterschied zu älteren, auch in die Volkssprache übertragenen naturkundlichen Werken in der Tradition der christlichen Hermeneutik, etwa dem *Physiologus*, nimmt Konrad – wie schon seine lateinische Vorlage – aber auch Beobachtungen auf, die nicht mehr unmittelbar der Deutung dienstbar gemacht werden, und schiebt vermehrt zwischen die von der menschlichen Naturbetrachtung auf Gott ausgerichtete Deutungsperspektive die des innerweltlich-gesellschaftlichen Verhältnisses der „natürlichen Dinge“ zum Menschen ein. Vor allem die Tierwelt, und hier wiederum die den einzelnen Tierarten zugeschriebenen Eigenschaften, werden so zum moralischen Spiegel für den Menschen.

### Das Beispiel des Vogels *arpia*

Das Beispiel der *arpia* (vgl. *Buch der Natur* III. B.2) bietet geradezu eine Schlüsselstelle, die zeigt, wie sehr das tropologisch-moralische Deutungsinteresse dominierte. Die *arpia* wird als großer Greifvogel mit gewaltigen Krallen und entsprechendem





von Megenberg selbst interessiert der Vogel aber nicht nur als moralisches Analogon, sondern als Anschauungsbeispiel für den Unterschied zwischen Mensch und Tier auf dem Gebiet der kognitiven Wahrnehmung, d.h. also auch als (durchaus im modernen Sinn) naturkundlich relevantes ‚Bild‘.

Während das Tier, so heißt es zum Vogel *arpiä*, aufgrund seiner „unvernünftigen“ Natur sich nur dann selbst sehen kann, wenn ihm ein äußerer „Zufall“ den ent-

Blick in die Wissenschaft 22 ■ 13





5 Diebold Lauber, *Buch der Natur, Aderlaßmännlein*, Cod. Pal. germ. 300, fol. 003v



6 Diebold Lauber, *Der Birnbaum*, Cod. Pal. germ. 300, fol. 257v

## Bilder ‚lesen‘ – Bilder ‚sehen‘?

So wichtig die Integrität der Sehorgane ist, auch das zeigt Megenbergs Unkenbeispiel, so kommt es doch weniger darauf an zu sehen, wie etwas aussieht, als darauf, welches Bild man sich davon macht bzw. welches Bild man sich innerhalb geltender Normen machen kann und darf. Der Text des *Buchs der Natur* vermittelt solche Bilder im Medium der Sprache, er ‚beschreibt‘ Bilder. Illustrierte Handschriften oder Drucke stellen den sprachlich vermittelten, mündlich oder schriftlich rezipierten Bildern auch im Medium der Pikturalität Bilder zur Seite. Das Verhältnis zwischen diesen beiden Arten der Visualisierung ist auch heute noch eine wissenschaftlich aktuelle Frage, die interdisziplinär herausfordert. Im Blick aufs Mittelalter wird sie dadurch noch pointiert, dass hier schon die Beziehung zwischen schriftlich fixierter Textualität und pikturaler Textualität im Auge des Betrachters als solche in Frage steht.

Es wurde viel spekuliert, warum Konrad sein Buch nicht schon zu seinen Lebzeiten mit Bildern versehen ließ: Dass Konrad

grundsätzlich eine Abneigung gegen Illustrationen gehabt haben könnte, bleibt eine Spekulation, die schon durch den Bilderreichtum seiner Sprache wie auch den Bilderreichtum der seit dem 15. Jahrhundert nachfolgenden Illustrationen seiner Schrift in Frage gestellt wird. Die überwältigende Rezeptionsgeschichte mit ihren nicht weniger als 53 mehr oder weniger illustrierten Codices zu Konrads Schrift belegt jedenfalls, dass das *Buch der Natur* offenbar geradezu zur Illustration herausforderte. Dabei führt jedoch eine Bestimmung von „Illustration“, die den Primat des Textes gegenüber den Bildern voraussetzt, an der Eigenart der Illustrationen zu Konrads *Buch der Natur* vorbei. Denn die meisten dieser Illustrationen sind nicht im engen Sinne als „Illustrationen“ anzusprechen. Vielmehr handelt es sich um Visualisierungsformen im Sinne von Bildbeifügungen, die einzelne Stichworte und Motive des bilderreichen Textes aufnehmen und eigenständig fortführen. Die Bilder sind eher als visueller Kommentar, als Bildtext zum sprachlichen Text, nicht aber als ikonographische Verdoppelung oder ‚wörtliche‘ Übersetzung zum Text angelegt.

## ‚Iconic turn‘ im Mittelalter?

Unter diesen Vorzeichen ist zu fragen, was die Bilderflut der nachfolgenden Illustrationen über die Bildmacht der sprachlichen Beschreibung Konrads bzw. über die Naturvorstellungen seiner Rezipienten aussagt. Darf man trotz der fehlenden Illustrationen in den ersten Abschriften mit Blick auf Konrads *Buch der Natur* von einem ‚iconic turn‘ im Mittelalter sprechen? Klar ist, dass ein Maler wie Diebold Lauber und seine Werkstatt, die zwischen 1443 und 1451 in Hagenau Konrads *Buch der Natur* ‚illustrierten‘ (Codex Palatinus Germanicus 300, Universitätsbibliothek Heidelberg), nicht erst einzelne Naturmotive von Konrad ‚lernen‘ mussten: Selbstverständlich wusste Lauber, wie die Pflanzen und Tiere der alltäglichen Lebenswelt aussahen. Umgekehrt half es dem Maler wenig, bei Konrad von Elefanten oder Löwen zu lesen [3], wenn er selbst aus eigener Anschauung nicht wusste, wie solche Tiere genau darzustellen waren. Dann bediente sich Lauber selbstverständlich traditioneller Bildmuster, wie sie in der mittelalterlichen





7 Diebold Lauber (Werkstatt), *Die Lilie*, Cod. Pal. germ. 300, fol. 305r



8 Anonymus, *Fische*, Cod. Pal. germ. 311, fol. 168v

Kunst überliefert wurden. Dennoch ist zu klären, ob die Illustrationen zu Konrads Schrift insgesamt einen ‚visuellen Mehrwert‘, einen veränderten Blick auf die Natur, zu erkennen geben, der mit dem *Buch der Natur* selbst etwas zu tun haben könnte.

### Ein neuer Diskurs über die Natur

Zwar haben sich Lauber und seine Mitarbeiter – wie es in der Zeit üblich war – bei ihren Illustrationen auf Mustervorlagen und alte ikonographische Traditionslinien bezogen, aber sie haben diese Bildtraditionen auf eine Weise aufgerufen, die dem Leser und Betrachter des *Buchs der Natur* zugleich bewusst macht, dass es sich hier um eine neue Form der Annäherung an die Natur handelt: Die Pointe dieser Umwertung entsteht dadurch, dass Lauber und seine Werkstattmitarbeiter vielfach die traditionellen Bildformeln geradezu als Hintergrundfolie nutzten, um den von die-

sen Formeln abweichenden, neuen Diskurs über die Natur zu akzentuieren. Zunächst fällt auf, wie sehr in vielen Illustrationen zu Konrads *Buch der Natur* gerade die Dimension der sinnlichen Erfahrbarkeit der Natur vor den Aspekt ihrer symbolischen Kodierung in den Vordergrund tritt: Eine Frau ‚riecht‘ an einem Balsamstrauch, junge Männer ‚hören‘ und ‚sehen‘ einen Vogelschwarm auffliegen, und so weiter. Auf dem Wege dieser neuartigen Versinnlichung der Naturdinge entfaltet sich eine neue Beziehung des Menschen zur Natur, die sich aus den symbolischen Deutungsschemata der mittelalterlichen Kunst zu lösen beginnt. Es ist der einzelne, individuelle Mensch, der diese sinnlichen Erfahrungen mit der Vielfalt der Dinge in der Natur macht. Dieser gleichsam individualisierte Partikularismus der Naturbeobachtung ist typisch für die Naturdarstellung der Kunst im 15. Jahrhundert. Eine solche systematische Betrachtung der Natur ist geistesgeschichtlich in der Neubewertung des Einzelobjekts in Folge des Universalienstreits, ebenso in Konrads Ausführungen vorgezeichnet.

### Mikrokosmos – Makrokosmos

Diese Form der Naturdarstellung wendet sich grundsätzlich von der mittelalterlichen Naturdarstellung in Form eines emblematisch kodierten übergeordneten Systems ab, in das Mensch und Natur integriert werden. Im Hochmittelalter war es üblich, auch komplizierteste philosophische Systeme zur Welterklärung visuell zu veranschaulichen. Gemalte ‚Welt-Bilder‘ im wahrsten Sinne des Wortes entstanden, wenn etwa Salomon von Konstanz in einer Regensburger Handschrift von 1165 die Konkordanz zwischen dem Mikrokosmos des menschlichen Körpers und dem Makrokosmos der Welt in symbolisch-emblematischer Kodierung zu veranschaulichen versuchte [4]: Die Inschriften erläutern, dass die Füße der Erde, die Knochen den Steinen, die Nägel den Bäumen, das Haar dem Gras, die Brust der Luft, der Bauch dem Meer und der Kopf dem Himmel zuzuordnen sind. Ergänzt sind die vier Elemente und die vier Winde. Der das Haupt umgebende Kreis, der auf den ersten Blick wie ein Nimbus erscheinen könnte, ist le-

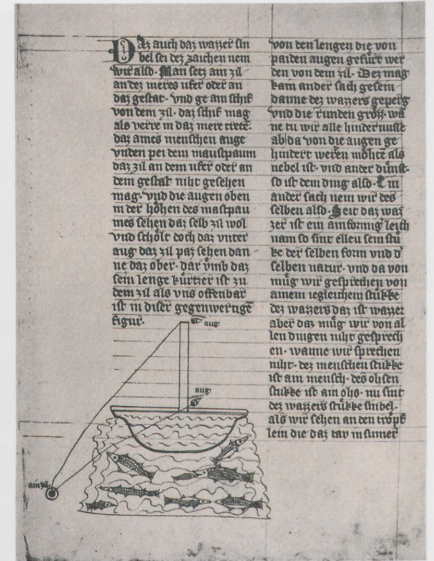


diglich eine diagrammatische Chiffre innerhalb dieser emblematischen Struktur. Üblicherweise hätte in dieser Analogisierung von Mikro- und Makrokosmos auch die Demonstration hinzugehört, dass der Mensch mit geöffneten Armen und Beinen in Höhe und Breite maßgleich sei, so wie es in einer Illustration der Kosmosvision von Hildegard von Bingen (1098–1179) zu sehen ist. Auch hier dominiert der symbolisch-emblematische Gehalt, der in vielen Punkten nur zu verstehen ist, wenn man die rein zeichenhaften Elemente der allegorisch-didaktischen Ikonographie der Visionen Hildegard von Bingens kennt. Betrachtet man vor diesem Hintergrund nun etwa das sogenannte Aderlassmännlein, das die Werkstatt Laubers zu Konrads *Buch der Natur* malte [5], so wird einerseits deutlich, wie sehr diese Illustration im Körpermotiv an den Bildtypus der Mikro-Makrokosmos-Ikonographie, darüber hinaus auch an den aus Alexandrinischer Überlieferung stammenden Bildtypus der „Fünfbilderserie“, der seit dem 11. Jahrhundert in Europa weit verbreitet war, anschließt. Andererseits aber wird auch erkennbar, wie sehr sie sich von der Bedeutungsstruktur dieser mittelalterlichen Bildformen grundsätzlich unterscheidet: Mit gespreizten Beinen und ausgebreiteten Armen steht der Aderlassmann mittensymmetrisch frontal im Bild. Die wichtigsten Lassstellen seines Körpers sind mit roten Blutflüssen markiert. Aber der menschliche Körper erscheint hier nicht mehr als symbolische Chiffre, sondern als konkretes medizinisches Studienobjekt. Indem der dargestellte Mensch in die Pose der emblematisch-symbolischen Chiffrentradition rückt, wird deutlich, dass er genau diese Bildtradition abstreift, um vor diesem Hintergrund einen neuen Blick auf den Menschen und eine neue Körperwahrnehmung freizulegen. Laubers Darstellung des Menschen zu Konrads *Buch der Natur* zeigt bei aller Stillierung eine neue Natürlichkeit.

## Vom Sündenfall zum Sinnengenuss

Ähnliche visuelle Umwertungen sind bei vielen anderen Darstellungen zu beobachten: Zweifelsfrei haben zeitgenössische Betrachter bei Laubers Darstellung eines Liebespaares unter dem Birnbaum im *Buch der Natur* [6] unwillkürlich an das verwandte Bildschema aus der Darstellung

des Sündenfalls gedacht: In der populären zeitgenössischen Druckgraphik war dieses Motiv verbreitet, die Vergleichsbeispiele reichen weit bis in die mittelalterliche Kunst zurück. Und dennoch würde kein Betrachter Laubers Bild konkret als Sündenfalldarstellung missverstehen, schon weil die Figuren bekleidet sind. Auch hier liegt die visuelle Pointe darin, dass Lauber das Bildschema des Sündenfalls bewusst nutzt, um den aus solchen symbolisch-religiösen Zuordnungen und typologischen Gegenüberstellungen entlassenen Menschen in seiner Annäherung an die Natur zu zeigen: Es ist weder der Baum der Erkenntnis noch die verbotene Frucht des Sündenfalls, sondern es ist ein Birnbaum, unter dem sich das Paar dem Sinnengenuss der Früchte hingibt! Damit wird der bis dahin – nicht zuletzt in den Illustrationen der *Biblia pauperum* der Zeit immer wieder eingeübte und wiederholte – visuelle Diskurs der Analogie zwischen neutestamentlichem Antitypus und alttestamentlichen Typus unterwandert und aufgebrochen, um einen neuen Blick auf Natur und Mensch zu gewinnen. Dieses augenzwinkernde Spiel mit der Typologie überlieferter Bildformen und -themen ist in zahlreichen Variationen zu studieren. So erscheinen im *Buch der Natur* Mann und Frau an einem Lilienbeet [7], im naheliegenden ikonographischen Anschluss an die Tradition der Verkündigungsdarstellungen: Aber Gabriel, Maria und das Symbol der Lilie sind nun durch die reale Lebenswelt ersetzt. Bis hinein in die sprechende Gestik der Hände seiner Figuren hat Lauber die Parallele zu den Figuren der Verkündigung unterstrichen. Dies geschieht nicht mit dem Ziel, im Sinne eines verdeckt symbolisch aufgeladenen Realismus – so wie es Erwin Panofsky im Begriff des „disguised symbolism“ analysierte – eine Verkündigungsdarstellung ins Weltliche zu verlagern, sondern um dem Betrachter umso deutlicher zu vergegenwärtigen, dass seine Figuren aus den symbolischen Zuordnungen dieses religiösen Geschehens heraustreten und *die Natur als Natur* zu betrachten beginnen. Das gilt in analoger Form auch für die Tierdarstellungen, etwa die der Fische, die ein anonymer Illustrator zu Megenbergs Schrift notierte (Cod. Pal. germ. 311, fol. 168v; [8]): Bei den Fischdarstellungen ist es müßig zu streiten, wie naturwissenschaftlich korrekt die Bilder sind. Unter zoologischen Vorzeichen wurde moniert, dass in dieser Darstellung lediglich die beiden Heringe links oben zu identifizieren wären. Bei solcher



9 Anonymus, Illustration zu *Die deutsche Sphaera* von Konrad von Megenberg, München Bayerische Staatsbibliothek, Cgm 156, 6v

Argumentation wird übersehen, dass hier – unabhängig von den Fragen einer naturwissenschaftlichen Detailtreue der Tierdarstellung – in neuer Weise die sinnliche Wahrnehmung der im Wasser schwimmenden Fische zum Tragen kommt. In einer Illustration zu Konrads Ausführungen in der *Deutschen Sphaera* [9] bildet der über das Wasser (mit den darin schwimmenden Fischen) schweifende Blick die modellhafte Wahrnehmungskonstellation, um die Abhängigkeit des wahrnehmenden Auges von den veränderlichen Betrachterpositionen zu demonstrieren: Je nachdem, ob der Beobachter („aug“) auf dem Schiff von den „Höhen des Mastbaumes“ oder von dessen Fuße über das Meer zum „zil“ am Ufer schaut, verändert sich die Wahrnehmung. Die mittelalterliche Tradition, in den Optiklehren den Sehstrahl diagrammatisch-symbolisch zu kennzeichnen, ist hier gleichsam durch die Darstellung des Wahrnehmungsphänomens selbst sinnlich angereichert.

## „Aufklärung“ im Mittelalter?

Ein Ablöseprozess von den Bildtraditionen der symbolisch-religiösen Ikonographie im Blick auf die Natur ist im Spätmittelalter schon in ersten Anfängen der Illustrationen zu Konrads *Buch der Natur* zu studieren. Ob man deshalb – mit Kurt Flasch – von einer „Aufklärung“ im Spätmittelalter sprechen möchte, ist ein anderes Thema.



Zweifellos aber haben sich die Visualisierungsformen bei der Darstellung der Natur, wie man in den Illustrationen im Anschluss an Konrads Naturbeobachtungen eindrücklich studieren kann, grundlegend verändert. Damit wird nicht gleich behauptet, dass Konrad von Megenberg in einer Reihe neben Hildegard von Bingen oder Albertus Magnus im Rang „einer der größten Naturforscher seiner Epoche“ zu nennen wäre. Doch hat er gerade durch seine in deutscher Sprache verfasste Naturdarstellung einen kultur- und kunstgeschichtlich folgenreichen neuen Blick auf die Natur popularisiert.

## Literatur

*Olaf Breidbach*, Bilder des Wissens. Zur Kulturgeschichte der wissenschaftlichen Wahrnehmung. München: Fink, 2005.

*Edith Feistner (Hrsg.)*, Konrad von Megenberg – ein spätmittelalterlicher ‚Enzyklopädist‘ im europäischen Kontext (Jahrbuch der Oswald von Wolkenstein-Gesellschaft 18). Wiesbaden: Dr. Ludwig Reichert, 2010 (im Druck).

*Gerold Hayer*, Konrad von Megenberg: Das Buch der Natur. Untersuchungen zu seiner Text- und Überlieferungsgeschichte (Münchener Texte und Untersuchungen zur deutschen Literatur des Mittelalters 110). Tübingen: Niemeyer, 1998.

Konrad von Megenberg: Regensburger Domherr, Dompfarrer und Gelehrter (1309–1374): zum 700. Geburtstag. Ausstellung in der Bischöflichen Zentralbibliothek Regensburg (27. August bis 24. September). Bischöfliches Zentralarchiv und Bischöfliche Zentralbibliothek Regensburg. Kataloge und Schriften, hrsg. von Paul Mai. Bd. 26). Regensburg: Schnell & Steiner, 2009.

*Ulrike Spyra*, Das Buch der Natur Konrads von Megenberg. Die illustrierten Handschriften und Inkunabeln (Pictura et Poesis 19). Köln/Weimar/Wien: Böhlau, 2005.

*Christoph Wagner*, Metaphern der Blindheit und des Sehens in der Dantezeit. Beobachtungen zur *Hellung des Blindgeborenen* in Duccios Maesta, in: FS Ch. Lenz, hrsg. von F. Billeter u.a. Frankfurt a.M.: Blick in die Welt, 1998, S. 15–28.



Prof. Dr. phil. **Edith Feistner**, geb. 1959 in Straubing. Studium der Germanistik und der Romanistik an den Universitäten München und Paris. Nach Promotion 1986 Assistentin am Institut für Deutsche Philologie der Ludwig-Maximilians-Universität München, seit der Habilitation 1994 an der Julius-Maximilians-Universität Würzburg Privatdozentin in Würzburg und Augsburg; 1996–1999 Heisenberg-Stipendium der DFG. 1998 Vertretung der Professur für germanistische Mediävistik an der Universität Kassel; Ruf auf die Professur für Ältere deutsche Literatur an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. Seit 1999 Lehrstuhl für Deutsche Philologie (Mediävistik) an der Universität Regensburg.

**Forschungsschwerpunkte:** Hagiographie, deutsch-französische Literaturbeziehungen, Geschichtsschreibung, Regensburg als mittelalterliche Literaturstadt; Kulturtheorie, Kulturgeschichte und Literatur des Mittelalters (Ausbildungen von Identitätsbewusstsein, Wahrnehmungsmuster, Gender, Literatur und Wissen).

Prof. Dr. phil. **Christoph Wagner**, geb. 1964 in Ottweiler. Studium der Kunstgeschichte, Musikwissenschaft und Vergleichenden Literaturwissenschaft an den Universitäten Saarbrücken, München und Wien. Nach Promotion 1993 Assistent am Institut für Kunstgeschichte an der Universität des Saarlandes. Habilitation 2004, 2006 Vertretung des Lehrstuhls für Kunstgeschichte an der Universität Bern. Seit 2007 Lehrstuhl für Kunstgeschichte an der Universität Regensburg. 1996 Preis der Akademie der Wissenschaften und der Literatur in Mainz. Rufe auf die Professuren für Kunstgeschichte an der Universität Leipzig (2006), an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz (2007), auf den Lehrstuhl für Kunstgeschichte an der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald (2008). 2008 Gastprofessor an der Ecole pratique des Hautes Etudes (Sorbonne) in Paris. Mitglied im Elitenetzwerk Bayern. Seit 2009 gewähltes Mitglied der *Academia Europaea*. *The Academy of Europe* (London). 2010 Aufnahme in das *Internationale Netzwerk für Kunstgeschichte* und Gastprofessor an der Graduate School, Institute of Advanced Study in the Humanities and the Social Sciences, Bern.

**Forschungsschwerpunkte:** Europäische Kunstgeschichte der Renaissance, der Frühen Neuzeit, der Moderne, Wahrnehmungsgeschichte, Verhältnis von Kunst- und Naturwissenschaften.



# Dummheit und Witz

## Lob des Nichtwissens

Achim Geisenhanslüke

### Der Wille zur Wahrheit

Als Friedrich Nietzsche sich 1886 in *Jenseits von Gut und Böse* kritisch mit den Vorurteilen der Philosophen auseinandersetzt, stellt er eine einfache Frage: „Was in uns will eigentlich zur ‚Wahrheit‘?“ Dass Nietzsche die philosophische Frage nach der Wahrheit in seinem Text in Anführungszeichen setzt, verrät schon, in welche Richtung seine Überlegungen gehen. Sie kulminieren in einer radikalen Infragestellung des Wertes der Wahrheit: „Gesetzt wir wollen Wahrheit: warum nicht lieber Unwahrheit? Und Ungewissheit? Selbst Unwissenheit?“ Nietzsches Kritik an den Vorurteilen der Philosophen geht mit einer außergewöhnlichen Abwertung der Wahrheit und einer ebenso außergewöhnlichen Aufwertung der Unwahrheit einher. An die Stelle des Willens zur Wahrheit setzt er den Willen zur Unwahrheit und Unwissenheit. Die Frage, die Nietzsche sich in *Jenseits von Gut und Böse* stellt, ist die, ob es so etwas wie einen positiv gewerteten Begriff des Nichtwissens geben könnte. Er rührt damit an eine lange Tradition, die sich mit dem Problem des Nichtwissens und seiner Überwindung auseinandergesetzt hat. Sie reicht von Sokrates über Erasmus von Rotterdam und Locke bis zu Freud und der Postmoderne. Die Aufgabe einer Poetik des Nichtwissens im Anschluss an Nietzsche besteht vor diesem Hintergrund vor allem darin, die Infragestellung von Wahrheit und Wissen weiterzuführen und auf das Verhältnis von Philosophie und Literatur zu übertragen. Schon Nietzsches Frage nach dem Willen zur Wahrheit orientiert sich nicht allein an Sokrates, sondern ebenso an der griechischen Tragödie, in

*Jenseits von Gut und Böse* vor allem an der Figur des Ödipus, in dem er ein Paradigma verhängnisvoller Wahrheitssuche erblickt. In was für einer Beziehung steht also die Literatur zum Thema Wahrheit und Wissen, und wie lässt sich die schöne Kunst der Lüge und Täuschung, die Nietzsche in der Literatur erkennen wollte, mit der philosophischen Suche nach der Wahrheit in Übereinstimmung bringen? Das sind die Fragen, denen die Poetik des Nichtwissens an prominenten Stationen der Geschichte nachgeht.

### Faust und der Zweifel am Wissen

Eine der prominentesten Stationen der Geschichte des Nichtwissens ist der Faustmythos. In ihm überlagern sich die Suche nach der Wahrheit, die Nietzsche der Philosophie unterstellt, und das Eingeständnis eigener Unwissenheit. „Habe nun, ach! Philosophie, / Juristerei und Medizin, / Und leider auch Theologie / Durchaus studiert, mit heißem Bemühn. / Da steh' ich nun, ich armer Tor, / Und bin so klug als wie zuvor!“ Wer kennt ihn nicht, den berühmten Stoßseufzer des gelehrten Doktors aller vier Fakultäten, der in tiefer Nacht am Ende seiner Laufbahn zugeben muss, dass er trotz all seiner Anstrengungen keinen nennenswerten Fortschritt des Wissens zu verzeichnen hat. Die Faustische Frage nach dem, was die Welt im Innersten zusammenhält, führt mitten hinein in das Problem des Nichtwissens, in die verzweifelte Einsicht des Gelehrten, „daß wir nichts wissen können!“ Formuliert worden ist das Problem nicht erst bei Goethe, sondern schon in der Antike. Die sokratische Ein-

sicht in die eigene Unwissenheit unterstellt die gesamte Geschichte der Philosophie der Frage nach dem Nichtwissen als einer scheinbar unaufhebbaren Grenze des Wissens. Zwischen der Ironie, mit der Sokrates seinen Kampf gegen die Sophisten als ignoranten Experten des Wissens führt, und der Verzweiflung Fausts ist aber einiges passiert. War das Nichtwissen für Sokrates noch eine Größe, die von der Philosophie anders als von der Rhetorik beherrscht zu werden vermag, so zweifelt der gelehrte Faust selbst noch an den Fähigkeiten der Philosophie, geschweige denn denen der Theologie. Wenn der philosophische Umgang mit dem Nichtwissen eine derart tiefe Melancholie zutage fördert, wie es bei dem suizidgefährdeten Professor Faust der Fall ist, dann stellt sich die Frage, ob das Nichtwissen nicht eine fundamentalere Größe sein könnte als Wissen, um das es der Philosophie geht. Das hat schon der englische Philosoph John Locke festgestellt: „Da unser Wissen, wie ich gezeigt habe, ziemlich beschränkt ist, werden wir vielleicht über den jetzigen Zustand unseres Geistes etwas Licht erhalten, wenn wir einmal nach der dunklen Seite blicken und unsere Unwissenheit überschauen. Diese ist nämlich unendlich viel größer als unser Wissen.“ Wie Locke in seinem *Versuch über den menschlichen Verstand* aus dem Jahre 1690 herausarbeitet, ist der Bereich des Nichtwissens stets größer als der des Wissens. Locke schaudert es vor dem „Abgrund von Finsternis, wo wir keine Augen zum Sehen und keine Fähigkeiten zum Wahrnehmen besitzen“, den das Reich des Unwissens für ihn verkörpert. Zugleich aber muss er anerkennen, dass es Bereiche gibt, die auch dem größten Scharfsinn ver-



geschlossen bleiben. Wenn das Nichtwissen einen derart dunklen und zugleich zentralen Ort markiert, dann stellt sich nicht nur für die Philosophie die grundsätzliche Frage, wie denn Licht in dieses Dunkel zu bringen ist.

## Dummheit und Witz

Was also kann eine Poetik des Nichtwissens leisten, was die philosophische Suche nach der Wahrheit nicht vermag? In einem ersten Schritt entfernt sich die Poetik des Nichtwissens von der spröden Entgegensetzung von Wissen und Nichtwissen, um sich konkreten Figurationen wie der Dummheit und dem Witz zuzuwenden, aber auch Begriffen wie der Hoffnung, der Neugierde und der Liebe. In ihnen sucht die Poetik des Nichtwissens eine Dialektik auf, die immer dann dem Blick entgeht, wenn sich die philosophische Begriffsbestimmung an einem Begriff des Wissens orientiert, ohne diesen zu problematisieren.

Dass man sich der Dummheit nicht in einem positiven Sinne verschreiben kann, hat schon Erasmus von Rotterdam gezeigt. Das Lob der Torheit, das er 1508 formuliert, kann gar nicht anders als ironisch sein. Das gilt nicht nur für den gelehrten Holländer, sondern ebenso für den Romanschriftsteller Jean Paul, der in ähnlich ironischer Weise wie sein Vorbild ein ‚Lob der Dummheit‘ im Ausgang des 18. Jahrhunderts anstimmte, das zugleich in Übereinstimmung mit einer Poetik des Witzes steht. Dass Dummheit und Witz etwas mit dem Gegensatz von Wissen und Nichtwissen zu tun haben, ist vielleicht nicht auf den ersten Blick ersichtlich. In Erinnerung zu rufen ist jedoch, dass sich die Bedeutung des Wortes Witz keineswegs auf das heutige Verständnis als Scherz beschränkt. Bis ins 18. Jahrhundert hinein meinte Witz vielmehr in ähnlicher Weise wie das französische *esprit* und das englische *wit* eine geistige Fähigkeit des Menschen, und so spricht Otto F. Best vom Witz auch als einem „Urwort des intellektuellen Bereichs“, und so konnte die Dummheit geradezu als Gegenteil des Witzes begriffen werden, als ein Mangel an geistigen Fähigkeiten. Am deutlichsten wird dies, vermittelt durch den Begriff der Urteilskraft, bei Kant. In der *Kritik der reinen Vernunft* gelangt dieser zu einer bemerkenswerten Bestimmung der Dummheit: „Der Mangel an Urteilskraft ist eigentlich das, was man

Dummheit nennt, und einem solchen Gebrechen ist gar nicht abzuhelpen.“ Bemerkenswert ist Kants Definition nicht allein, weil sie dazu beigetragen hat, dass die Dummheit wie das Nichtwissen vor allem als eine negative Erscheinung, als Abwesenheit oder Mangel verstanden worden ist. Bemerkenswert ist sie darüber hinaus, da sie den Witz und nicht etwa die Klugheit als den eigentlichen Gegensatz zur Dummheit begreift. Witz zu haben bedeutet für Kant nämlich, über die Urteilskraft zu verfügen, die dem Dummkopf abgeht, und so lobt er auch den Mutterwitz des Menschen als das eigentliche Gegenmittel zur Dummheit – ein Mittel allerdings, das nur demjenigen helfen kann, der schon über Urteilskraft verfügt. Wie der Dummheit gar nicht abzuhelpen sei, weil sie auf der Abwesenheit von Urteilskraft beruht, so ist der Witz bei Kant eine Naturgabe, die sich auf unterschiedliche Weise im logischen Scharfsinn des Philosophen und der ästhetischen Darstellungsweise des Poeten zeigt. Zwischen den Naturgaben der Dummheit und des Witzes errichtet Kant einen scharfen Gegensatz, der keine Zwischenformen zuzulassen scheint.

Wenn Kants Lob des Witzes auf der Urteilskraft gründet, die sich in ausgezeichneter Weise in Scharfsinn und Witz als den intellektuellen Vermögen des Menschen zeigt, die es ihm erlauben, sich über die Dummheit hinwegzusetzen, dann deutet sich bei Kant eine spezifisch ästhetische Bedeutung des Witzes an, die in der Moderne um eine politische Komponente ergänzt wird. Nicht allein die ästhetische, die politische Urteilskraft steht im 20. Jahrhundert in Frage. So hat Robert Musil in seiner Rede *Über die Dummheit* 1937 im gerade angeschlossenen Wien eine Barrikade gegen die politische Herrschaft der Unvernunft zu errichten versucht, die sich zu wesentlichen Teilen auf Witz und Ironie stützt. Der Held seines großen Romans *Der Mann ohne Eigenschaften* befindet sich, ähnlich wie die Figuren des französischen Romaniers Gustave Flaubert, in einem lebenslangen und letztlich erfolglosen Kampf gegen die Dummheit. Dass der Kampf gegen die Dummheit selbst für die Götter vergeblich sein muss, hatte schon Friedrich Schiller in der *Jungfrau von Orléans* festgehalten. Das Dumme ist nur: Gekämpft werden muss er doch. Wie Kant und Musil zeigen, geht die Poetik des Nichtwissens jedoch keineswegs mit einem Lob der Dummheit einher. Sie ist vielmehr als ein ästhetischer wie politischer Appell an die Vernunft zu

verstehen – aber an eine Vernunft, die um die Grenzen des Wissens weiß.

## Hoffnung, Neugier und Liebe. Eine kleine Geschichte des Nichtwissens

Nicht allein um den Gegensatz von Dummheit und Witz bemüht sich die Poetik des Nichtwissens. Auch in anderen Begriffen wie der Hoffnung, der Neugier und der Liebe geht sie der inneren Verschränkung von Wissen und Nichtwissen nach. Eine besondere Rolle spielt vor diesem Hintergrund der Zusammenhang zwischen Nichtwissen und Zeit. So ist die Hoffnung offenkundig etwas anderes als eine Form des gesicherten Wissens um die Zukunft. Das hat schon der antike Mythos über die Figur des Prometheus festgehalten. Dieser war mit der Vorausschau in die Zukunft begabt, ein Geschenk, um das ihn selbst sein Verbündeter und späterer Widersacher Zeus beneidete. Um den Menschen das Überleben zu sichern, so berichtet der Mythos, hat Prometheus ihnen nicht nur das Feuer gebracht. Er hat den Menschen zugleich die Hoffnung gegeben, um ihnen das Wissen um die Zukunft zu nehmen. „Ich habe in ihnen blinde Hoffnungen gegründet“, berichtet der stolze Menschenfreund bei Aischylos. Andernfalls, so die Überlegung des unsterblichen Titanen, würden die sterblichen Wesen verzweifeln und schnurstracks in den Tod rennen. Zwischen Wissen und Nichtwissen erscheint die Hoffnung als etwas Gutes und Schlechtes zugleich – als ein Gut, das dem Menschen zu überleben hilft, und als ein Übel, das ihn über das Ende seiner Existenz betrügt. Was die Hoffnung aufzeigt, ist ein fundamentaler Bezug zwischen dem Nichtwissen und der Zeit, der sich auch in anderen Begriffen wie der Neugier finden lässt.

Nicht nur die Hoffnung steht in einem ambivalenten Verhältnis zum Thema des Wissens und des Nichtwissens. Ähnlich verhält es sich mit der Neugier. Auch sie ist im Wesen zukunftsbezogen. Sie richtet sich auf die für möglich gehaltene und gewünschte Aufhebung des Nichtwissens in der Zukunft. Für die christliche Tradition war die Neugierde lange Zeit ein problematischer Fall, galt sie doch seit Augustinus als Verfallenheit an die „Augenlust“, als ein sinnliches Begehren, das den Geist beschmutzt. Erst Petrarca vermochte es, die Neugierde zu adeln. Als dieser am





Prof. Dr. **Achim Geisenhanslüke**, geb. 1965 in Osnabrück. Studium der Allgemeinen und Vergleichenden Literaturwissenschaft, der Germanistik, Romanistik und der Philosophie in Berlin und Paris. Promotion 1995 an der Freien Universität Berlin mit einer literaturtheoretischen Arbeit zu Michel Foucault. 1996–2004 Wiss. Assistent bzw. Oberassistent an der Universität Duisburg. Habilitation 2000. Seit 2004 Professur für Deutsche Philologie / Neuere deutsche Literaturwissenschaft am Institut für Germanistik der Universität Regensburg.

**Forschungsschwerpunkte:** Literaturtheorie und philosophische Ästhetik, Literatur- und Kulturwissenschaft, Europäische Literaturen vom 17. Jahrhundert bis in die Gegenwart.

26. April 1336 auf den Mont Ventoux hinaufstieg – ob er den Aufstieg wirklich vollzogen hat, oder es sich hier um eine Fiktion handelt, muss offen bleiben und spielt für das Selbstverständnis des Gelehrten auf der Schwelle vom Mittelalter zur Frühen Neuzeit auch gar keine Rolle –, befriedigte er seine Neugierde, das Land einmal von oben zu sehen, huldigt aber zugleich seinem Gott. Auf dem Gipfel des Berges schlägt er die Bekenntnisse des Augustinus auf und stellt so einen Kompromiss zwischen den Ansprüchen der Neugier und ihrem christlichen Verbot her. Seitdem gilt die Neugier als ein Antrieb zum Wissen, der die Neuzeit antreibt und zugleich in immer tiefere Abgründe des Nichtwissens verstrickt.

Seinen tiefsten Abgrund erreicht das Nichtwissen in der Liebe. Liebe kann alles Mögliche sein, ein Gefühl oder ein Code, glücklich oder unglücklich, leidenschaftlich oder platonisch, verboten oder gefordert. Liebe kann aber auch als eine – eben liebenswerte – Form der Verblödung beschrieben werden. Davon zeugt nicht nur der scheinbar unwiderstehliche Drang, dem Liebesobjekt Kosenamen zu geben, die meist an Kuscheltiere aus der Kindheit erinnern. Liebe als Verblödungsprozess und als Regression ins Kindesalter hat Shakespeare in seiner Komödie *Love's Labour's Lost* (*Verlorene Liebesmühn*) höchst vergnüglich beschrieben. In ihr schließen vier Höflinge, an ihrer Spitze der König von Navarra, einen Pakt, der sie dazu verpflichtet, sich allen Formen der Liebe zu versagen, um sich in ihrem unstillbaren Drang nach Wissen allein dem Studium zu überantworten. Es kommt, wie es kommen muss: Vier Hoffräulein, an ihrer Spitze die Tochter des Königs von Frankreich, rücken an und binnen einer Minute ist es um die

wissensbegierigen jungen Männer geschehen. Von Gelehrten auf der Suche nach einer von aller Sinnlichkeit freien Form der Wahrheit verwandeln sie sich in Tölpel, die verlegen um die vier Fräulein herum schwänzeln und zu deren Ärger noch schlechte Gedichte verfassen. Angesichts der Dummheit der Liebe vergeht den jungen Männern jeder Witz, was umgekehrt Shakespeare die Gelegenheit gibt, seinen überwältigenden Sprachwitz in der Komödie zu entfalten. Shakespeares Darstellung der Liebe führt so auf den Gegensatz von Dummheit und Witz zurück. Nicht nur scheinen Liebe und Witz sich wechselseitig auszuschließen. Liebe gründet geradezu auf Unwissenheit – wer alles über den Partner wüsste, der wäre keines Gefühls für ihn mehr fähig. Wenn Dummheit und Witz, Hoffnung und Neugier, ja selbst die Liebe es mit bestimmten Formen der Ignoranz zu tun haben, dann geht es der Poetik des Nichtwissens vor allem darum, die Literatur auf ihren Kampfplätzen gegen die Dummheit zu begleiten, um ihre wichtigste Waffe zu schärfen, den Witz als der ironischen Aufhebung der Dummheit.

## Literatur

*Achim Geisenhanslüke*, Poetik des Nichtwissens. Bielefeld: transcript, 2010.

*Achim Geisenhanslüke und Hans Rott (Hgg.)*, Ignoranz. Nichtwissen, Vergessen und Missverstehen in Prozessen kultureller Transformationen. Bielefeld: transcript, 2008.

*Avital Ronell*, Stupidity. Urbana and Chicago: Univ. of Chicago Press, 2002

*Uwe Wirth*, Diskursive Dummheit: Abduktion und Komik als Grenzphänomene des Verstehens. Heidelberg: Winter, 1999.





# Grüne Supercomputer

## Weltweit energieeffizientester Supercomputer an der Uni Regensburg entwickelt

Tilo Wettig

Viele wissenschaftliche Probleme lassen sich experimentell nur sehr schwer oder gar nicht studieren. Teilweise sind diese Probleme von großer gesellschaftlicher Relevanz, man denke z.B. an die Wettervorhersage oder den Klimawandel. Glücklicherweise ist es in vielen Fällen möglich, solche Probleme numerisch zu simulieren. Für hinreichend präzise Ergebnisse bzw. Vorhersagen sind sehr große Computer nötig, bei denen Tausende von Prozessoren gleichzeitig am Problem arbeiten. Die Rechenleistung solcher Supercomputer konnte in den letzten Jahrzehnten exponentiell gesteigert werden, ohne den dafür nötigen Energieverbrauch drastisch erhöhen zu müssen. Das wird aufgrund fundamentaler technologischer Grenzen in Zukunft nicht mehr möglich sein. Energieeffizientes Supercomputing ist daher eine der großen aktuellen Herausforderungen.

### Theorie, Experiment und numerische Simulationen

Traditionell hat die Wissenschaft zwei tragende Säulen: Experiment und Theorie. Diese befruchten sich gegenseitig. Einerseits verlangen experimentelle Befunde nach theoretischen Erklärungen, andererseits ergeben sich aus Theorien oft Vorhersagen für neue Effekte, die dann experimentell bestätigt (oder ausgeschlossen) werden. Dieses Wechselspiel hat über Jahrhunderte gut funktioniert. In vielen Gebieten der Wissenschaft sind die Theorien aber mittlerweile so kompliziert geworden, dass sie nicht mehr analytisch (d.h. mit Papier und Bleistift) gelöst werden

können. Gleichzeitig stoßen die Experimente in immer neue Grenzbereiche vor und werden entsprechend aufwendig und teuer. Dank der Fortschritte der Computertechnologie ist in den letzten Jahrzehnten eine weitere tragende Säule hinzugekommen: numerische Simulationen. In solchen Simulationen werden Theorien auf dem Computer implementiert. Mit Hilfe numerischer Methoden können dann beobachtbare Größen ausgerechnet werden. Letztere können mit experimentellen Ergebnissen verglichen werden, Vorhersagen für neue Experimente liefern oder Experimente sogar komplett ersetzen.

### Paralleles Rechnen

Computer sind mittlerweile schnell genug, um viele interessante Probleme in kurzer oder zumindest vertretbarer Zeit lösen zu können. Ein kleines Beispiel: Im Jahr 2009 hat ein Schachprogramm (Pocket Fritz 4), das auf einem Mobiltelefon lief, mit großem Vorsprung ein Schachturnier gegen diverse südamerikanische Großmeister gewonnen (wobei dies nicht gegen die Qualität der südamerikanischen Großmeister spricht, sondern für die Qualität des Schachprogramms und des Prozessors im Mobiltelefon). Es gibt aber eine ganze Reihe von wichtigen Problemen, deren Simulation so aufwendig ist, dass die Rechenleistung eines einzelnen Prozessors dafür nicht ausreicht. Ein offensichtlicher Ausweg aus diesem Dilemma besteht darin, das Problem in kleinere Einzelteile zu zerlegen und diese Einzelteile parallel zu simulieren, d.h. jedes Einzelteil zeitgleich auf seinem eigenen Prozessor. Da die Ein-

zelteile in der Regel voneinander abhängig sind, müssen die Prozessoren miteinander kommunizieren können, also durch ein Netzwerk miteinander verbunden sein. Damit haben wir einen sogenannten Parallelrechner, der, grob gesagt, aus einer Anzahl von Rechenknoten und einem Kommunikationsnetzwerk besteht. Von einem Supercomputer (oder massiv parallelem Rechner) spricht man, wenn die Anzahl der Rechenknoten sehr groß ist. Hochleistungsrechnen oder „High-Performance Computing“ (HPC) ist ein Sammelbegriff für alle Aktivitäten, die mit der Simulation wissenschaftlicher Probleme auf solchen Computern verbunden sind.

### „Grand challenge“ Probleme

Supercomputer sind in der Regel sehr teuer, so dass man genau überlegen muss, welche Probleme auf ihnen simuliert werden sollen. Zum einen sollte das Problem eine hohe wissenschaftliche und/oder praktische Relevanz haben. Einige Beispiele sind:

- Wettervorhersage
- Klimaentwicklung
- Turbulenz (z.B. bei der Entwicklung von Flugzeug-Tragflächen)
- Crash-Test-Simulationen in der Autoindustrie
- Fundamentale Theorien der Astro- und Teilchenphysik
- medizinische Anwendungen (z.B. „drug design“, Proteinfaltung)
- Vorhersage von Erdbeben



Zum anderen sollte die Theorie, die auf einem Supercomputer simuliert wird, hinreichend gefestigt sein, so dass man den berechneten Ergebnissen auch trauen kann (was auf die meisten der oben aufgelisteten Anwendungen zutrifft). Die Probleme, die diese beiden Kriterien erfüllen und weltweit auf Supercomputern erforscht werden, nennt man im HPC-Bereich auch „grand challenge problems“, also gewaltige Herausforderungen. Unsere Gruppe für Theoretische Elementarteilchenphysik in Regensburg arbeitet an der fundamentalen Theorie der starken Wechselwirkung, die z.B. erklärt, wie sich ein Proton aus kleineren Bausteinen, den Quarks und Gluonen, zusammensetzt. Diese Theorie heißt Quantenchromodynamik (QCD) und deren numerische Variante Gitter-QCD, denn auf dem Computer wird die kontinuierliche Raumzeit durch ein diskretes Gitter angenähert.

## Einige Grundbegriffe

Im Folgenden werden kurz einige wesentliche Begriffe erläutert, die für das Verständnis von Supercomputern nötig sind. Wir verwenden dabei auch die englischen Begriffe, die sich im deutschen Sprachraum durchgesetzt haben. Ein Computer kann zwei Arten von Rechenoperationen ausführen: solche mit ganzen Zahlen (z.B.  $2 + 7 = 9$ ) und solche mit reellen Zahlen (z.B.  $1,4 \cdot 2,3 = 3,22$ ). Für das wissenschaftliche Rechnen sind hauptsächlich letztere wichtig, die auch Gleitkomma-Operationen bzw. „floating-point operations“ (Flops) genannt werden. Als „peak performance“ bezeichnet man die maximal mögliche Rechenleistung eines Computers. Die meisten Prozessoren enthalten heutzutage mehrere (meist identische) Rechenkern. Für einen einzelnen Rechenkern errechnet sich die peak performance aus der Taktfrequenz und der Anzahl der Flops, die der Rechenkern pro Takt ausführen kann. Für den Prozessor ist dann mit der Anzahl der Rechenkern zu multiplizieren und für einen Parallelrechner mit der Anzahl der Prozessoren. Machen wir uns dies am Beispiel des Supercomputers Jaguar (einer Maschine vom Typ Cray XT5) deutlich, der zu dem Zeitpunkt, als dieser Artikel verfasst wurde, der schnellste Supercomputer der Welt war. Die Taktfrequenz ist 2.6 GHz, und jeder Rechenkern kann 4 Flops pro Takt ausführen, d.h. die Performance pro Kern ist 10,4 GigaFlops/sec. Jeder Prozessor hat

sechs Kerne, und der Computer enthält 37376 Prozessoren. Damit ist die „peak performance“ 2,33 PetaFlops/sec, d.h.  $2,33 \cdot 10^{15} = 2.330.000.000.000.000$  Gleitkomma-Operationen pro Sekunde. Die entscheidende Frage ist nun, welcher Bruchteil der „peak performance“ von einer wissenschaftlichen Anwendung wirklich ausgenutzt werden kann. Diesen Bruchteil bezeichnet man als Effizienz oder „sustained performance“, und offensichtlich sollte diese so groß wie möglich sein. Um zu verstehen, wie sich die Effizienz ergibt, ist es hilfreich, die Parallelisierung einer Anwendung genauer zu betrachten.

## Parallelisierung von Anwendungen

Nehmen wir als Beispiel die Gitter-QCD und den oben erwähnten Jaguar, von dem wir, um die Rechnung einfacher zu machen, nur  $2^{15} = 32768$  Prozessoren benutzen wollen. Wir möchten z.B. ein  $128^3 \times 192$  Gitter simulieren, d.h. 128 Punkte in jeder der 3 Raumrichtungen (x, y, z) und 192 Punkte in der Zeitrichtung (t). Der Jaguar hat ein dreidimensionales Netzwerk, wir müssen also zunächst überlegen, wie wir die vier Dimensionen unseres wissenschaftlichen Problems auf die drei Dimensionen der Maschine abbilden. Das geht am einfachsten, indem wir die 192 Punkte der Zeitrichtung komplett auf dem Prozessor lassen (also in dieser Dimension nur innerhalb des Prozessors über die Kerne parallelisieren) und die drei Raumdimensionen

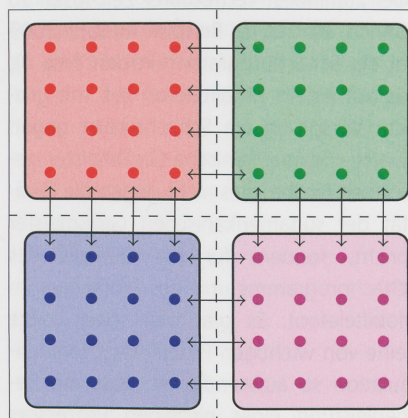
über die einzelnen Prozessoren hinaus parallelisieren. Damit erhalten wir pro Prozessor ein lokales räumliches Volumen von  $128^3/32768 = 64 = 4^3$ , also nur noch vier Gitterpunkte pro Raumrichtung und Prozessor. Jedem der sechs Prozessorkerne wird dann ein lokales vierdimensionales Volumen  $4^3 \times 32$  zugeordnet, denn  $192 = 32 \cdot 6$ . Da benachbarte Gitterpunkte miteinander in Wechselwirkung treten, müssen an den Rändern der lokalen Gitter Daten mit dem jeweiligen Nachbarn ausgetauscht werden, wie schematisch in Abbildung 1 gezeigt.

Diese Kommunikation zwischen Prozessoren (bzw. Prozessorkernen) kostet eine gewisse Zeit, während dieser die Rechnungen potentiell angehalten werden müssen, falls die benötigten Daten vom Nachbarn noch nicht angekommen sind. Als einfaches Beispiel kann man sich eine Anzahl von Wissenschaftlern vorstellen, die die Bearbeitung eines größeren Problems unter sich aufgeteilt haben, jeweils nur an einem Teilproblem arbeiten und ihre Zwischenergebnisse mit der Post an die Kollegen schicken. Falls einer der Wissenschaftler auf bestimmte Zwischenergebnisse angewiesen ist, diese mit der Post aber noch nicht angekommen sind, muss er eine Arbeitspause einlegen. Die Effizienz ergibt sich sowohl in diesem Beispiel als auch beim Parallelrechner aus der einfachen Formel

$$\text{Effizienz} = \frac{\text{Rechenzeit}}{\text{Rechenzeit} + \text{Totzeit}}$$

wobei die Totzeit neben der Zeit für die Kommunikation auch andere Effekte enthält, insbesondere den Zugriff der Prozessoren auf Daten im externen Arbeitsspeicher. Während wir dem Wissenschaftler im obigen Beispiel seine Pause durchaus gönnen mögen, sollte man bei einem Computer versuchen, die Totzeit zu minimieren, um eine möglichst hohe Effizienz zu erzielen. Das ist das Hauptziel bzw. das Hauptproblem bei der Parallelisierung einer Anwendung auf einem Supercomputer. Im Hinblick auf die Kommunikation kommt es dabei vor allem auf folgende Punkte an:

- Geschickte Wahl des Algorithmus: Oft kann dasselbe Problem mit verschiedenen Algorithmen simuliert werden, die spezifische Vor- und Nachteile haben. Welcher Algorithmus zur höchsten Effizienz führt, kann von Details der Hardware ab-



**1** Beispiel für eine Parallelisierung in zwei Dimensionen: ein  $8 \times 8$  Gitter wird auf 4 Prozessoren verteilt, d.h. jeder Prozessor bearbeitet ein lokales  $4 \times 4$  Gitter. An den Rändern der lokalen Gitter findet Datenaustausch (also Kommunikation) statt.



hängen, d.h. auf verschiedenen Supercomputern müssen unter Umständen verschiedene Simulationsalgorithmen gewählt werden.

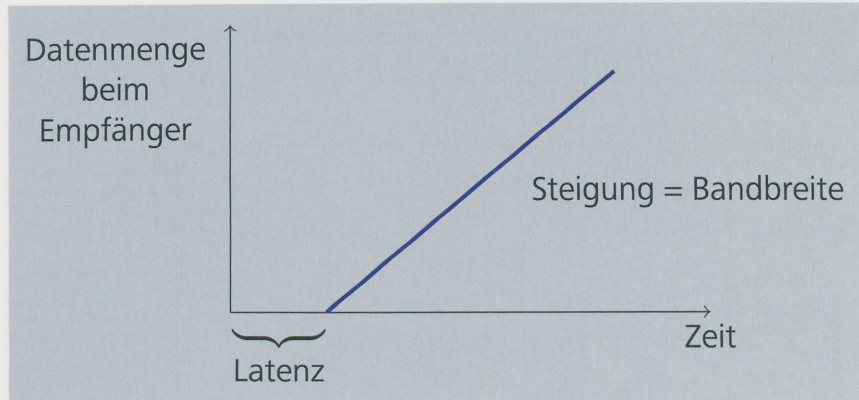
- **Leistungsfähige Netzwerk-Hardware:** Hier kommt es einerseits auf eine hohe Bandbreite an, d.h. möglichst viele Daten sollen in möglichst kurzer Zeit übertragen werden (vgl. die Bandbreite von DSL-Anschlüssen). Andererseits soll die Latenz möglichst gering sein, d.h. die Zeit, die vom Absenden der Daten beim Sender bis zum Eintreffen des ersten Datenpaketes beim Empfänger vergeht (Fans von Computerspielen im Internet kennen dies als „Ping-Zeit“). Siehe Abbildung 2.

- **Überlappung von Kommunikation und Rechnung:** Der parallele Algorithmus sollte so konstruiert sein, dass nicht abwechselnd gerechnet und kommuniziert wird, sondern während einer Kommunikation an einem Teil des Problems gerechnet wird, das nicht auf die zu empfangenden Daten angewiesen ist. Je nach wissenschaftlicher Anwendung ist dies mehr oder weniger gut möglich. Im Idealfall erreicht man vollständige Überlappung, so dass die Kommunikation nichts mehr zur Totzeit beiträgt.

Von einem skalierbaren Parallelrechner spricht man, wenn (bei gleicher Problemgröße) die „sustained performance“ linear mit der Anzahl der Prozessoren steigt, es also keine Effizienzeinbußen durch die Kommunikation gibt.

Es gibt verschiedene Varianten des Mooreschen Gesetzes, die jeweils einen exponentiellen Anstieg der Rechenleistung als Funktion der Zeit vorhersagen. In der Vergangenheit beruhte dieser Anstieg lange Zeit auf der Erhöhung der Taktfrequenz. Vor einigen Jahren wurde hier eine Grenze von ca. 3 GHz erreicht, denn bei höheren Frequenzen würde zuviel Abwärme produziert, die man nicht mehr abführen kann. Trotzdem haben sich Computer seitdem weiter nach dem Mooreschen Gesetz entwickelt, und zwar durch Parallelisierung auf verschiedenen Ebenen:

- sogenannter „instruction-level“ Parallelismus, d.h. im selben Takt werden mehrere Operationen ausgeführt,
- Parallelisierung über mehrere Rechenkerne pro Prozessor, und
- Parallelisierung über viele Prozessoren pro Supercomputer



**2** Zum Zeitpunkt Null fängt der Sender an, Daten zu verschicken. Bevor das erste Datenpaket beim Empfänger ankommt, verstreicht eine gewisse Latenzzeit. Danach wird die Datenmenge, die pro Zeiteinheit ankommt, durch die Bandbreite bestimmt.

Ein Beispiel ist in Abbildung 3 gezeigt. Die Top500-Liste enthält die weltweit schnellsten Supercomputer und wird zweimal pro Jahr veröffentlicht.

## Energie-Effizienz

Während in der Vergangenheit bei Supercomputern die reine Rechenleistung im Vordergrund stand, ist mittlerweile der Energieverbrauch ein wichtiges Thema geworden. Dieser liegt bei Rechnern der PetaFlops-Klasse derzeit in der Größenordnung von 10 Megawatt (das entspricht dem durchschnittlichen Energieverbrauch von 22.000 Vierpersonenhaushalten). Zur Zeit werden weltweit Überlegungen angestellt, wie man in die ExaFlops-Klasse (d.h.  $10^{18}$  Fops/sec) vorstoßen könnte. Mit gegenwärtiger Technologie würde der Energieverbrauch eines solchen Rechners bei mehreren Gigawatt liegen, was aus Kosten- und Umweltschutzgründen inakzeptabel ist. Daher ist die Entwicklung möglichst energieeffizienter Supercomputer derzeit das wichtigste Thema im HPC-Bereich.

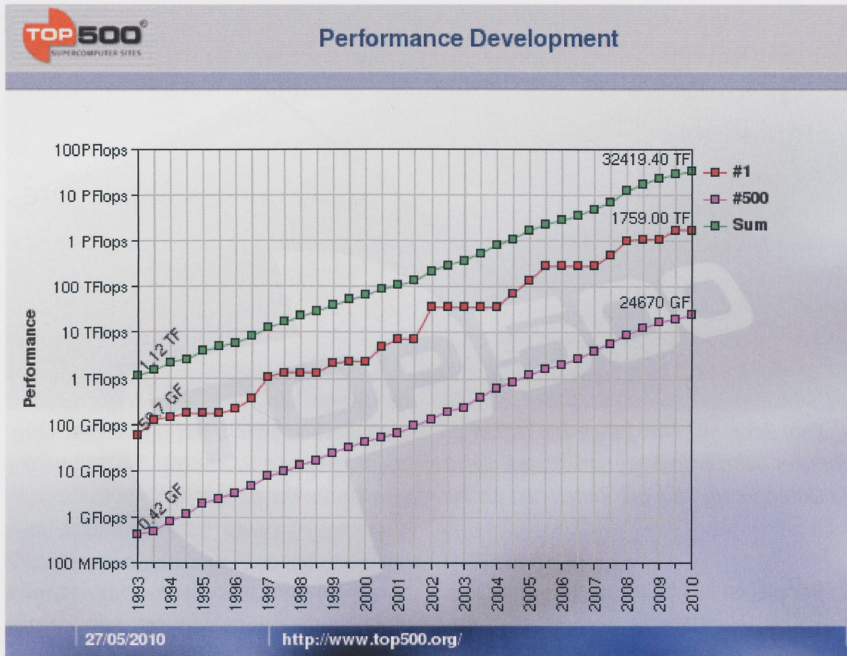
## Maßgeschneiderte Supercomputer

Unterschiedliche wissenschaftliche Anwendungen haben unterschiedliche Hardware-Anforderungen. Dabei kommt es vor allem auf das Verhältnis von Rechenleistung zu Memory- und Kommunikationsbandbreite an, d.h. wie viele Bytes müssen pro Flop aus dem Memory geladen (bzw. dorthin zurückgeschrieben) oder über das Netzwerk geschickt werden. Diese Verhältnisse variieren bei den verschiedenen

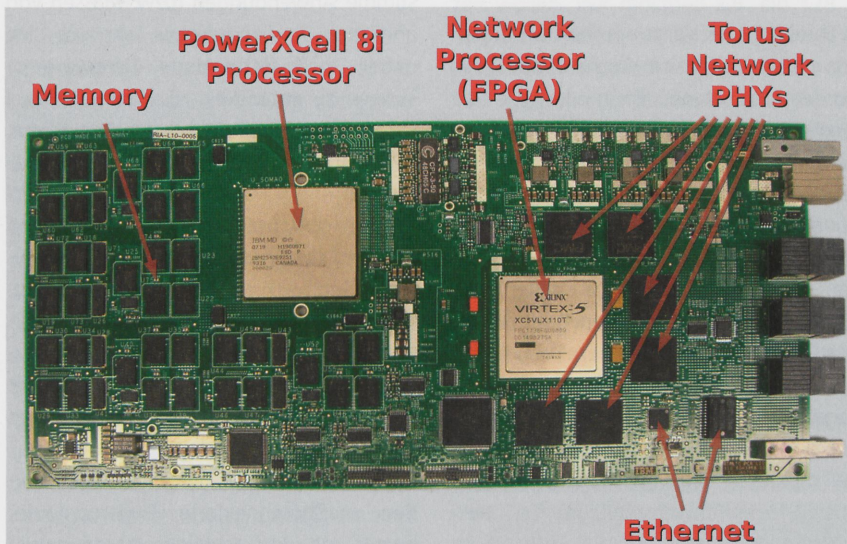
Anwendungen sehr stark, d.h. es gibt keine Hardware-Ideallösung, auf der alle Anwendungen optimal laufen. Eine Firma, die einen Supercomputer herstellt, möchte diesen natürlich an ein möglichst breites Spektrum von Anwendern verkaufen und muss daher Kompromisse machen. Für bestimmte Anwendungen (bzw. Klassen von ähnlichen Anwendungen) lohnt es sich daher, maßgeschneiderte Hardware-Lösungen zu entwickeln. Ein gutes Beispiel ist die GRAPE („gravity pipe“) Architektur, die in Japan für astrophysikalische Anwendungen entwickelt wurde. Diese Anwendungen sind besonders untypisch, denn hier sind die Anforderungen an Memory- und Netzwerkbandbreite sehr gering. GRAPE ist ein speziell entwickelter Computerchip mit hoher Rechenleistung und geringen Bandbreiten, der in der Astrophysik bei vergleichbaren Kosten allen anderen Supercomputern überlegen ist.

Auf dem Gebiet der Gitter-QCD werden maßgeschneiderte Supercomputer bereits seit den achtziger Jahren entwickelt, und zwar sowohl in Europa (durch die APE-Kollaboration) als auch in den USA (Columbia University) und Japan (Tsukuba University). Der letzte Gitter-QCD-Supercomputer aus den USA, an dessen Entwicklung auch der Autor beteiligt war, heißt QCDOC („QCD on a chip“). Der Name kommt daher, dass hier ein spezieller Computerchip entwickelt wurde (ein sog. ASIC = „application-specific integrated circuit“), der sowohl einen Prozessor als auch die für die Netzwerk-Kommunikation nötige Hardware enthält (wobei das Byte/Flop-Verhältnis für Gitter-QCD optimiert wurde). QCDOC wurde in Zusammenarbeit mit IBM entwickelt und war gleichzeitig auch der Prototyp für IBMs





3 Entwicklung der Rechenleistung der 500 weltweit schnellsten Supercomputer in den letzten zwei Jahrzehnten. Rot: Nr. 1 der Liste, Pink: Nr. 500 der Liste, Grün: Summe aller 500 Supercomputer. Quelle: [http://www.top500.org/lists/2010/06/performance development](http://www.top500.org/lists/2010/06/performance%20development)



4 Eine QPACE Node Card. Die wesentlichen Komponenten sind rot gekennzeichnet. Ein PHY ist ein „transceiver“, also ein Bauteil, das gleichzeitig als Sender („transmitter“) und Empfänger („receiver“) fungiert. Mit den Steckern auf der rechten Seite wird die Karte in eine Backplane gesteckt.

BlueGene/L Supercomputer, der mittlerweile zwei Nachfolger hat (derzeit BlueGene/P und 2011 dann BlueGene/Q).

## QPACE

Der neueste speziell für Gitter-QCD entwickelte Supercomputer heißt QPACE („QCD parallel computing on the Cell processor“). Dieser wurde im Rahmen des von der DFG

geförderten Sonderforschungsbereichs SFB/TR-55 der Theoretischen Teilchenphysik von einem Konsortium aus akademischen und industriellen Partnern unter Führung der Universität Regensburg entwickelt. Wichtigster industrieller Partner war das IBM Forschungs- und Entwicklungszentrum Böblingen, und weitere Beiträge kamen von Eurotech (Italien), Knürr (Deutschland) und Xilinx (USA). Kooperationspartner auf akademischer Seite waren

die Forschungszentren Jülich und DESY sowie die Universitäten Ferrara (Italien) und Wuppertal. Ziel des Projektes war es, den kostengünstigsten Supercomputer der Welt für Gitter-QCD Anwendungen zu entwickeln und diesen für das Physikprogramm unseres SFBs zu nutzen. Gleichzeitig war auch die Energieeffizienz ein wichtiger Aspekt.

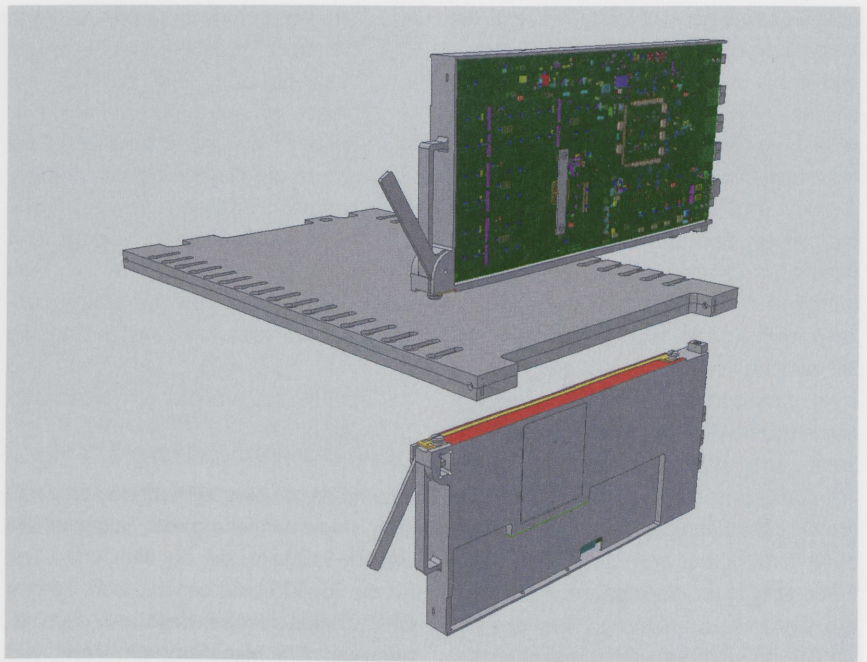
Am liebsten hätten wir wieder einen für Gitter-QCD optimierten ASIC entwickelt. Aufgrund der immer weiter fortschreitenden Verkleinerung der Chipstrukturen und der damit verbundenen Kostenexplosion bei der Chipherstellung war uns dies aber nicht möglich, denn allein die Entwicklungskosten hätten mehrere Millionen Euro betragen. Daher haben wir einen bereits existierenden Prozessor verwendet, nämlich den Cell-Prozessor, der von einer Allianz aus Sony, Toshiba und IBM für die Playstation3 entwickelt wurde (übrigens mit einem Entwicklungsaufwand von etwa 400 Millionen US-Dollar). Genauer gesagt verwenden wir eine leicht verbesserte Version, den PowerXCell8i, der einige zusätzliche Eigenschaften besitzt, die für wissenschaftliche Anwendungen wichtig sind. Dieser Prozessor zeichnet sich durch eine besonders hohe „peak performance“ (200 bzw. 100 GigaFlops in einfacher bzw. doppelter Genauigkeit) und einen vergleichsweise geringen Stromverbrauch aus. Die beiden größten Herausforderungen des Projekts waren folgende:

- Zum einen musste ein leistungsfähiges Kommunikationsnetzwerk zwischen den Cell-Prozessoren entwickelt werden. Dazu haben wir einen Netzwerk-Prozessor auf Basis eines FPGAs („field-programmable gate array“) entwickelt, der mit der Input/Output-Schnittstelle des Cells verbunden ist. Ein FPGA ist ein käuflich erhältlicher Computerchip, dessen Hardware-Charakteristika man aber jederzeit rekonfigurieren kann. Solch ein FPGA ist zwar weniger leistungsfähig als ein ASIC, aber für unseren Zweck eines reinen Netzwerk-Prozessors ausreichend. Die großen Vorteile eines FPGAs gegenüber einem ASIC sind wesentlich geringere (d.h. fast verschwindende) Entwicklungskosten, eine geringere Entwicklungszeit und ein viel geringeres Risiko (denn wenn man bei der ASIC-Entwicklung einen Fehler gemacht hat, muss der Chip neu hergestellt werden, was mit erheblichen Kosten und Zeitverlust verbunden ist, während man einen FPGA einfach rekonfigurieren kann).



• Zum anderen stellt die spezielle Architektur des Cell-Prozessors (1 Kern für das Betriebssystem und allgemeine Aufgaben, 8 weitere Kerne für die eigentlichen Rechnungen) eine große Herausforderung für den Programmierer dar, da sie sich fundamental von gewohnten Architekturen unterscheidet (für Experten: Datentransfers von und zu den Rechenkernen sind nur über DMA-Instruktionen möglich). Vor der endgültigen Entscheidung für die Cell-Architektur haben wir daher theoretische Performance-Modelle entwickelt, die eine Effizienz von etwa 30 % voraussagten, was mehr als akzeptabel ist. Diese Vorhersagen wurden mittlerweile in Hardware annähernd bestätigt, was allerdings eine sehr intelligente (und aufwendige) Programmierung erforderte. Zum Glück haben wir Experten im Team, die dieser Herausforderung gewachsen sind.

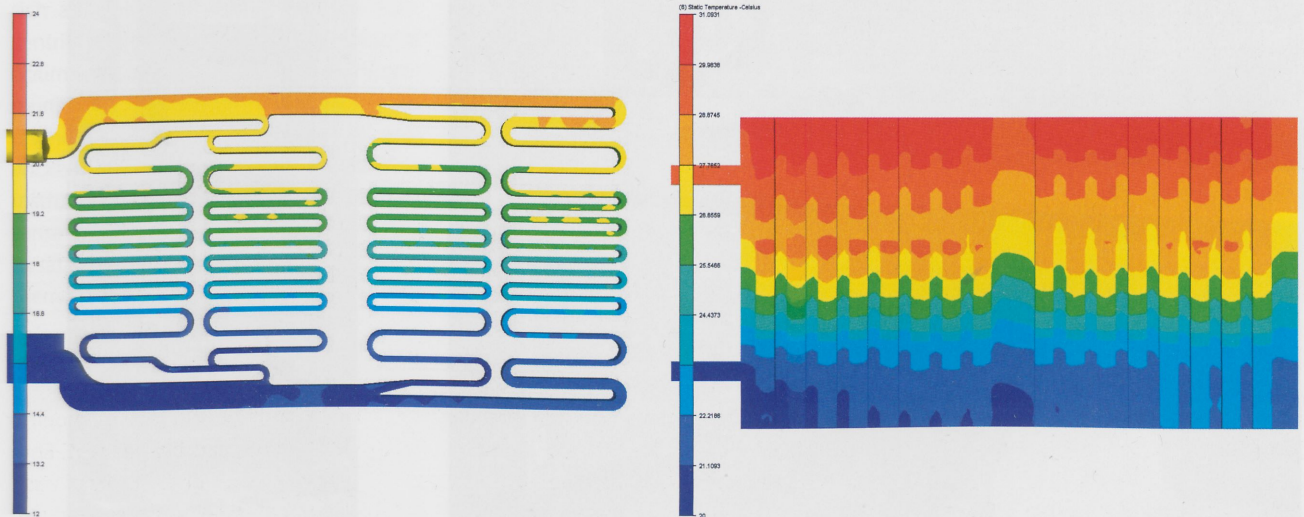
Abbildung 4 zeigt das Herzstück von QPACE, die sogenannte „Node Card“. Diese muss natürlich gekühlt werden, da die Komponenten (insbesondere der Prozessor) insgesamt ca. 100 Watt an Wärme produzieren. Speziell für QPACE wurde ein innovatives Kühlsystem entwickelt. Eine Node Card wird in eine „Thermal Box“ aus Aluminium gesteckt, die so geformt ist, dass die heißen Komponenten direkt an ihr anliegen und (unterstützt durch Wärmeleitpaste) die Hitze an die Thermal Box abgeben. Die Thermal Box wird wiederum, wie in Abbildung 5 gezeigt, auf eine „Coldplate“ gesteckt. Letztere wird von Wasser durchflossen und nimmt (wieder nur über



5 Auf die Coldplate werden von oben und unten je 16 Node Cards gesteckt. Die Wärme wird jeweils über die rot markierte Fläche abgeleitet. Quelle: Manfred Ries (IBM)

Wärmeleitung) die Wärme von der Thermal Box auf. Eine Coldplate kühlt 32 Node Cards, und eine der Herausforderungen war es, die Coldplate so zu entwickeln, dass alle 32 Node Cards gleichmäßig gekühlt werden. Abbildung 6 zeigt den inneren Aufbau der Coldplate und eine thermische Simulation, die später durch Experimente bestätigt wurde. Einer der Vorteile des QPACE-Kühlsystems ist die Möglichkeit, defekte Rechenknoten einfach auszutauschen, ohne den Kühlkreislauf öffnen zu müssen.

Um aus den einzelnen Node Cards einen massiv parallelen Supercomputer zu machen, müssen diese miteinander vernetzt werden. Dazu werden sie in eine Backplane gesteckt, die 32 Node Cards aufnehmen kann, s. Abbildung 7 links. In einem Rack befinden sich 8 solcher Backplanes, also insgesamt 256 Node Cards, siehe Abbildung 7 rechts. Diese hohe Packungsdichte ist nur aufgrund der Wasserkühlung möglich und wäre mit reiner Luftkühlung nicht zu erreichen gewesen. Innerhalb der Backplane sind die Node Cards



6 Innerer Aufbau der Coldplate mit simulierter Temperaturverteilung in den Kanälen (links) und simulierter Temperaturverteilung an der Oberfläche (rechts). Man sieht, dass das Ziel einer homogenen Temperaturverteilung in horizontaler Richtung erreicht wurde. Quelle: Manfred Ries (IBM)



über Leiterbahnen vernetzt, während die Verbindungen zwischen den Backplanes und Racks über Kabel hergestellt werden (in Abb. 7 links oben und unten in blau zu sehen). Insgesamt ergibt sich dadurch ein Netzwerk mit der Topologie eines dreidimensionalen Torus. (Ein Torus ist ein geometrisches Gebilde mit geschlossenem Rand. Zur Veranschaulichung: ein eindimensionaler Torus ist ein Kreisring, ein zweidimensionaler Torus ist ein Donut oder Schwimmreifen.) Jede Node Card hat dabei eine nominelle Kommunikations-Bandbreite von 60 Gigabit pro Sekunde zu ihren sechs nächsten Nachbarn im Torus. Zusätzlich zum Torusnetzwerk, das für die Kommunikation während der Rechnung benutzt wird, gibt es auch noch ein Gigabit-Ethernet-Hilfsnetzwerk, das für das Booten des Systems und für den Transfer von Daten von und zum Speichersystem benutzt wird.

Wie schon erwähnt, wurde bei der Entwicklung des Systems großer Wert auf Energieeffizienz gelegt. Dabei kamen verschiedene Punkte zum Tragen:

- Der Cell Prozessor zeichnet sich von Haus aus durch eine sehr hohe Rechenleistung pro Watt aus.
- Durch eine Verringerung der Betriebsspannung des Prozessors konn-

ten wir den Energieverbrauch um weitere 10 % senken. (Im Gegensatz zum populären „over-clocking“ betreiben wir also „under-voltinging“.)

- Bei der Entwicklung der Node Card wurde die Platzierung der Komponenten so optimiert, dass auf Terminierungswiderstände weitgehend verzichtet werden konnte.
- Durch das innovative Wasserkühlungskonzept kann fast vollständig auf Ventilatoren verzichtet und deren Energiebedarf eingespart werden.

Zusammen mit einer sehr effizienten parallelen Implementierung der sogenannten Linpack-Software, die als Benchmark-Test für die Top500-Liste benutzt wird, kommt QPACE damit auf eine effektive Rechenleistung von 773 MegaFlops pro Watt, was QPACE mit großem Vorsprung bereits zweimal zu Platz 1 auf der Green 500-Liste der energieeffizientesten Supercomputer der Welt verholfen hat, siehe Abbildung 8.

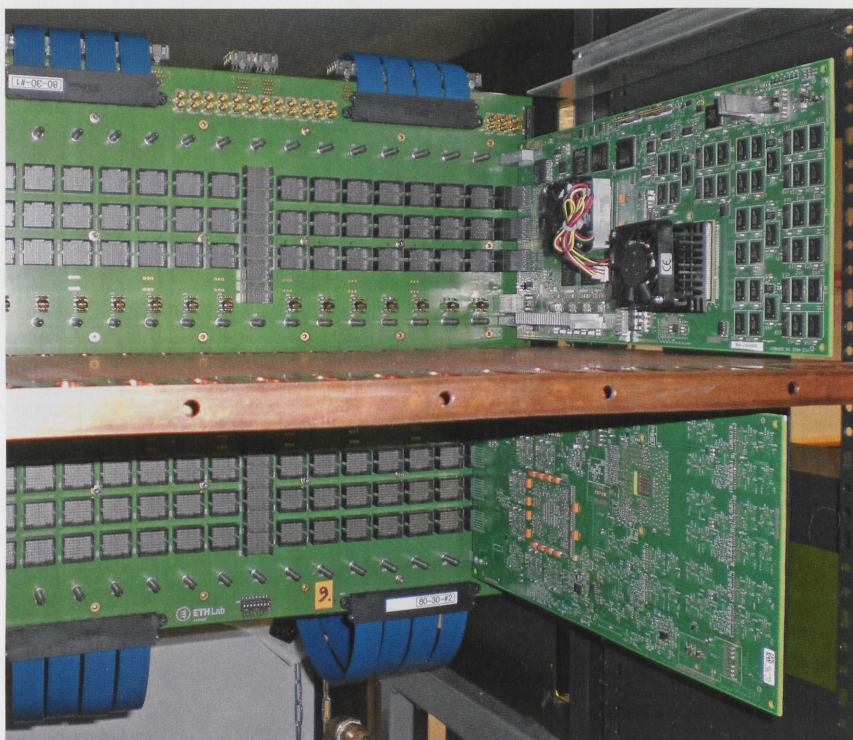
## Software

Neben der Hardware spielt natürlich auch die Software eine entscheidende Rolle. Darüber könnte man einen eigenen Artikel

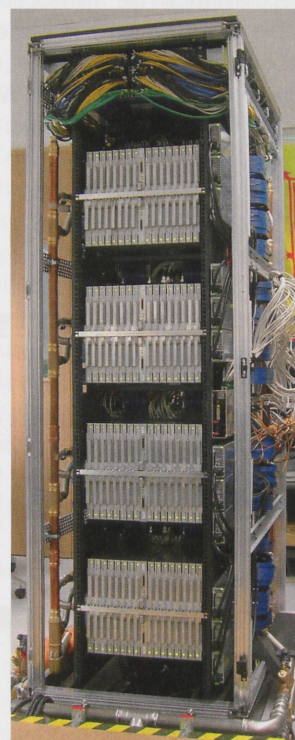
bzw. ganze Bücher schreiben, aber aus Platzgründen kann hier nur kurz darauf eingegangen werden. Als Betriebssystem benutzen wir Linux mit einigen zusätzlich für QPACE entwickelten Treibern, die mittlerweile auch Teil des offiziellen Linux-Kernels geworden sind. Auf den Rechenkernen des Cell-Prozessors läuft kein Betriebssystem, sondern die eigentlichen Rechnungen. Da diese Rechenkerne sehr schwierig zu programmieren sind, haben unsere Experten die wichtigsten Routinen handoptimiert und für den Benutzer über Bibliotheksaufrufe zugänglich gemacht. Außerdem wurden Bibliotheken entwickelt, die die Parallelisierung der Anwendung und die Kommunikation während der Rechnung übernehmen, so dass sich der typische Benutzer weder um die Optimierung noch um die Parallelisierung kümmern muss, sondern sich auf das eigentliche wissenschaftliche Problem konzentrieren kann.

## Blick in die Zukunft

Das große Thema der Zukunft heißt Exascale-Computing. Während die Schritte zu Tera- und PetaFlops-Computing durch die „normale“ Entwicklung der Mikroprozessor-Technologie ermöglicht wurden, ist



7 Links ist eine Backplane zusehen, die 32 Node Cards aufnehmen kann. In der Mitte sieht man die Coldplate, und rechts stecken zwei Node Cards, die für erste Tests hier nicht in einer Thermal Box stecken, sondern luftgekühlt wurden. Rechts die Vorderseite eines Rack, das auf der Vorder- und Rückseite je vier Backplanes enthält.





Green500 Rank	MFLOPS/W	Site*	Computer*	Total Power (kW)
1	773.38	Forschungszentrum Juelich (FZJ)	QPACE SFB TR Cluster, PowerXCell 8i, 3.2 GHz, 3D-Torus	57.54
1	773.38	Universitaet Regensburg	QPACE SFB TR Cluster, PowerXCell 8i, 3.2 GHz, 3D-Torus	57.54
1	773.38	Universitaet Wuppertal	QPACE SFB TR Cluster, PowerXCell 8i, 3.2 GHz, 3D-Torus	57.54
4	492.64	National Supercomputing Centre in Shenzhen (NSCS)	Dawning Nebulae, TC3600 blade CB60-G2 cluster, Intel Xeon 5650/ nVidia C2050, Infiniband	2580
5	458.33	DOE/NSA/LANL	BladeCenter QS22LS21 Cluster, PowerXCell 8i 3.2 Ghz / Opteron DC 1.8 GHz, Infiniband	276
5	458.33	IBM Poughkeepsie Benchmarking Center	BladeCenter QS22LS21 Cluster, PowerXCell 8i 3.2 Ghz / Opteron DC 1.8 GHz, Infiniband	138
7	444.25	DOE/NSA/LANL	BladeCenter QS22LS21 Cluster, PowerXCell 8i 3.2 Ghz / Opteron DC 1.8 GHz, Voltaire Infiniband	2345.5
8	431.88	Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences	Mole-8.5 Cluster Xeon L5520 2.26 GHz, nVidia Tesla, Infiniband	480
9	418.47	Mississippi State University	iDataPlex, Xeon X56xx 6C 2.8 GHz, Infiniband	72
10	397.56	Banking (M)	iDataPlex, Xeon X56xx 6C 2.66 GHz, Infiniband	72

8 Die Green500-Liste der weltweit energieeffizientesten Supercomputer vom Juni 2010. Quelle: <http://www.green500.org/lists/2010/06/top/list.php>

eine ähnliche Extrapolation zu ExaFlops allein aufgrund des oben genannten Energiebedarfs nicht möglich. Zur Zeit hat niemand auf der Welt eine konkrete Vorstellung davon, wie der Weg zu ExaFlops aussehen könnte. Daher werden momentan in verschiedenen Ländern (insbesondere USA, Japan und Deutschland) Exascale-Innovationszentren gegründet.

Eine potentielle Möglichkeit sind Grafikprozessoren (GPUs). Aufgrund ihrer hohen Rechenleistung werden diese heutzutage in vielen Bereichen der Wissenschaft als Beschleuniger eingesetzt. Allerdings sind bei diesen Architekturen Bandbreite und Latenz für die effiziente Anbindung an ein Netzwerk nicht ausreichend, so dass es fraglich ist, ob es jemals einen skalierbaren Supercomputer auf der Basis von GPUs geben wird.

Ich halte es für einen besseren Ansatz, sich auf spezielle Anwendungen zu konzentrieren und Supercomputer für diese zu optimieren, so wie es die Gitter-QCD-Community seit mehreren Jahrzehnten tut. Typischerweise würde man einen ASIC entwickeln, dessen Rechenkerne die gleichen Instruktionen auf einem sehr breiten Datensatz ausführen, ähnlich wie bei GPUs. Zusätzlich würde man aber das „on-chip memory“ und die Bandbreiten zu „off-chip

memory“ und Netzwerk an die Bedürfnisse der Anwendung anpassen und damit eine hohe Effizienz bei gleichzeitig geringem Energieverbrauch erreichen.

In welche Richtungen die zukünftige Entwicklung auch gehen mag, sie wird sehr spannend werden, und die Uni Regensburg wird weiterhin vorne mit dabei sein.

Literatur

Peter A. Boyle, Chulwoo Jung, Tilo Wettig, The QDOC supercomputer: Hardware, software, and performance, Proceedings of CHEP03: Conference for Computing in High-Energy and Nuclear Physics, 2003, eConf C0303241: THIT001, 2003, <http://arxiv.org/pdf/hep-lat/0306023>.  
Gottfried Goldrian et al., QPACE: Quantum Chromodynamics Parallel Computing on the Cell Broadband Engine, Computing in Science and Engineering 10 (2008) 46-54.  
Heinz Baier et al., QPACE - a QCD parallel computer based on Cell processors, Proceedings of Science (LAT2009) 001, <http://arxiv.org/pdf/0911.2174>.  
F. Belletti et al., QCD on the Cell Broadband Engine, Proceedings of Science (LAT2007) 039, <http://arxiv.org/pdf/0710.2442>.



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 StonyBrook 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.



# Inter amicos. Unter Freunden

## Freundschafts- und Kreditnetzwerke in der römischen Republik

Inge Kroppenberg

Die historische Netzwerkforschung boomt. Ihr methodisches Instrumentarium bietet die Möglichkeit, rechtliche, gesellschaftliche und wirtschaftliche Beziehungen zu untersuchen, die Personen oder Institutionen in einem bestimmten historischen Kontext miteinander verbanden. Dabei werden Funktionen des Netzwerks offenbar, die über die Person des konkreten Netzwerklers hinausweisen. In der römischen Republik unterhielten die Angehörigen der Oberschicht enge Kreditbeziehungen zueinander. Sie waren eingebunden in die wirtschaftliche und politische Leitungsstruktur der republikanischen Adelsgesellschaft. Zusammengehalten wurde diese durch das multiple Struktur- und Organisationsprinzip der *amicitia*, des römischen Verhaltenscodex' „unter Freunden“. Der folgende Beitrag geht der Frage nach, wie sich die Struktur der Freundschaft im römischen Zivilrecht, dem Recht der römischen Bürger, ausgewirkt hat.

„When I first came upon this conundrum, I could not make head or tail of it!“

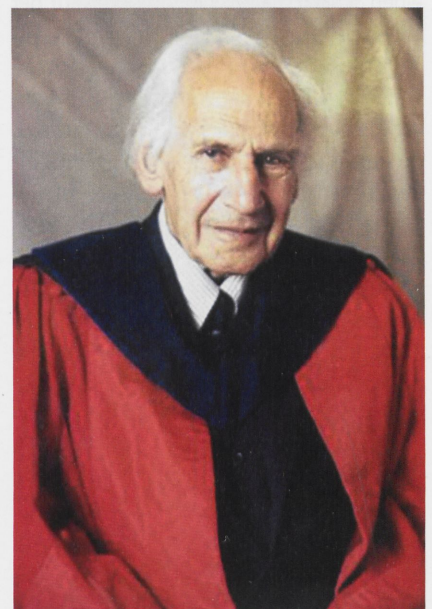
Wer hier Verständnisprobleme mit der Lösung eines Rätsels äußert, ist einer der größten Rechtshistoriker der Antike des 20. Jahrhunderts. Die Aussage stammt von David Daube, der in Freiburg geboren, während der nationalsozialistischen Gewaltherrschaft nach England emigrierte und zunächst in Oxford, später dann in Berkeley Biblisches und Römisches Recht lehrte [1]. In erkenntnistheoretischer Hinsicht steht Daubes Aussage stellvertretend für die Schwierigkeiten, die es uns modernen Menschen bereitet, die gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und rechtlichen Ver-

hältnisse der Antike aus der Rückschau unserer Gegenwart zu verstehen. Sie ist ein Zeitalter, das uns allenfalls von Ferne Vertrautes spiegelt. Die retrospektive Beschäftigung mit ihm birgt die Gefahr, Phänomene der Antike nach unserem heutigen Verständnis zu ordnen und damit unter Umständen misszuverstehen. Das ist auch das Thema der Installation von Raffael Rheinsberg [2]. Inhaltlich bezieht sich Daubes Aussage auf einen juristischen Text, genauer gesagt auf eine Rechtsquelle des römischen Juristen Ulpus Marcellus, der in der römischen Kaiserzeit des zweiten nachchristlichen Jahrhunderts lebte.

Erhalten geblieben ist er uns in der Überlieferung einer der größten Kulturleistungen des Abendlandes überhaupt. Sie ist auch heute noch die Grundlage unseres Wissens über das antike römische Recht. Die Rede ist vom *Corpus Iuris Civilis*, jenem Gesetzeswerk des oströmischen Kaisers Justinian, dessen juristische Experten sich im fünften nachchristlichen Jahrhundert daran machten, kaiserliche Gesetze und juristische Schriften römischer Juristen aus den vier vorangegangenen Jahrhunderten zu sammeln, kritisch durchzusehen, nach den Bedürfnissen der Zeit zu korrigieren und systematisch neu zusammenzustellen [3]. Diese Kompilation des Kaisers Justinian, die Zeitgenossen kannten sie unter dem Titel *Codex Iustinianus*, war in seiner Zeit ein erfolgreiches Gesetzbuch. Was es jedoch von vielen anderen späteren Gesetzgebungswerken unterscheidet, war der Umstand, dass seine eigentliche Karriere erst dann begann, als es schon längst außer Kraft getreten war. Im 11. Jahrhundert wurde es zur Textgrundlage der ersten juristischen Fakultät und Universität Euro-

pas, der Rechtsschule im wirtschaftlich aufstrebenden, oberitalienischen Bologna, die sich das antike römische Recht für ihre Zwecke mit neuen wissenschaftlichen Methoden erschloss. Das war der Beginn der so genannten Rezeption des Römischen Rechts, ohne die uns wohl auch der Text aus dem *Corpus Iuris Civilis*, um den es hier geht, nicht bekannt wäre [4].

Im 46. Buch der Digesten, des zweiten Buches des *Corpus Iuris Civilis* (lateinisch: geordnete Darstellung; griechisch: Pandekten von *pandektai* = allumfassend), kommt Marcellus auf einen merkwürdigen und komplizierten Fall der Schuldtilgung zu sprechen: Der Jurist hat es aus einem Rechtsgutachten eines berühmten Juristen



1 David Daube (1909–1999), Jurist und Historiker des antiken römischen und jüdischen Rechts



der römischen Republik, *Servius Sulpicius*, eines Freunds und Zeitgenossen *Ciceros*, entnommen [5]. Es wurde, wie uns in dem Text berichtet wird, seinerseits wiederum von dem römischen Juristen Aristo in Bezug genommen. Man kann also recht sicher davon ausgehen, dass es sich ursprünglich tatsächlich um einen Fall handelte, der zeitlich in der römischen Republik anzusiedeln war. Der Lebenssachverhalt, den Marcellus schildert, ist der folgende: Jemand schuldet seinem Gläubiger hundert (*centum*). Er ist offenbar in Geldnöten und kann nur einen Teilbetrag in Höhe eines Zehntels der Schuld (*decem*) begleichen. Und nun geschieht das für uns moderne Menschen auf den ersten Blick so Irritierende: Der Gläubiger akzeptiert die Zahlung eines geringen Teilbetrags (*decem*), zu der der finanziell angeschlagene Schuldner offenbar noch in der

keit? Warum verklagte er seinen Schuldner nicht vor Gericht und überzog ihn mit Vollstreckungsmaßnahmen? Wieso kam er ihm im Gegenteil im denkbar weitesten Umfang entgegen und begab sich damit seines Forderungsrechts fast vollständig? Und schließlich: Was war der Grund für ein solches Einverständnis zwischen Gläubiger und Schuldner, das hier so erfindungsreich ins Werk gesetzt wurde?

Die Antworten auf diese Fragen führen in den Grenzbereich von Wirtschafts-, Sozial- und Rechtsgeschichte. Die Annäherung an sie geht von der Prämisse aus, dass gerade das Rechtssystem in der römischen Antike ein hochgradig autonomes und vergleichsweise ausdifferenziertes Phänomen war. Allerdings blieb der Diskurs über Rechtsfragen stets auch gesellschaftlich eingebettet. Im Fall der Kreditbeziehungen unter den Angehörigen der römischen

Text nähern kann: dem so genannten Freundschaftsnetzwerk. Der Begriff verweist auf zwei Bedeutungsebenen, den des „Netzwerks“ und den der *amicitia* – also der Struktur der antiken Freundschaftsbeziehungen, die die einzelnen Netzwerker miteinander verbinden und dem Netzwerk seine besondere Prägung geben. Seine Struktur kann man eher entschlüsseln, wenn man sich ihr als Historiker und nicht als Jurist nähert. Das zeigt die folgende methodische Reflexion.

## Rechtliche und historische Anschauung

Ihr Ausgangspunkt ist, dass Gläubiger und Schuldner bei der einvernehmlichen Schuldentilgungspraxis Akteure eines Netzwerks sind, in dem bestimmte gesellschaftliche Spielregeln gelten, die die rechtlichen zwar nicht vollständig außer Kraft setzen, aber zeitweise suspendieren können. Diese Art von Netzwerk hat die Forschung vom römischen Recht lange Zeit nur wenig zur Kenntnis genommen. Man kann sogar sagen, dass die vielfältigen gesellschaftlichen, politischen, wirtschaftlichen und namentlich die (ehren-) rechtlichen Bindungen innerhalb der römischen Oberschicht traditionell im toten Winkel der Wissenschaft vom römischen Recht lagen. Dieses Wahrnehmungsdefizit hängt mit einem Unterschied zwischen rechtlicher und historischer Anschauung zusammen. Juristen betrachten einen Lebenssachverhalt vor allem unter dem Blickwinkel der Entscheidung. Um entscheiden zu können, müssen sie aus einem Fall alles für die Entscheidung nicht Bedeutsame, also auch die sozialhistorischen Umstände oder die konkreten Beteiligten, ausblenden. Nur der für die Entscheidung erhebliche Sachverhalt ist maßgeblich. Juristische Fälle sind deshalb äußerst sparsame Narrative. Die rechtlichen Entscheidungen, die sich an sie knüpfen, als Unterscheidungen in den Rechtsdiskurs eingespeist werden und dort fortan einen Unterschied machen, gerinnen mit der Zeit zu Rechtsregeln: Diese werden zum Gegenstand wissenschaftlicher Systematisierungsanstrengungen. Rechtswissenschaft nimmt also Einzelfälle in erster Linie auf der Metaebene der Regeln wahr.

Wissenschaftler, die sich mit dem römischen Recht beschäftigen, gehen nicht selten noch einen Schritt weiter. Sie sehen das römische Recht manchmal als eine Art



2 Raffael Rheinsberg, *Die Antike kennt uns nicht*, Installation in der Ausstellung „Das XX. Jahrhundert. Ein Jahrhundert Kunst in Deutschland“, Nationalgalerie Berlin 1999

Lage ist, als Teilerfüllung der Verbindlichkeit. Und die Prozedur beginnt von Neuem. Er lässt dem Schuldner die *decem* sofort wieder schenkwiese zukommen, und dieser bietet sie dem Gläubiger seinerseits wiederum als Teilleistung auf die Schuld an. Wiederholt wird die Transaktion insgesamt zehn Mal, bis der gewünschte Erfüllungseffekt formal für die gesamte Verbindlichkeit, das ganze *centum*, eingetreten ist [6].

Das Problem, das David Daube angesichts dieses einvernehmlich ins Werk gesetzten Falls von Schuldentilgung zu denken gab, lässt sich anhand der folgenden Fragen konkretisieren: Weshalb bestand der Gläubiger in unserem Fall nicht auf der kompletten Rückzahlung der Verbindlich-

Oberschicht könnte man sogar von einer Überlagerung des juristischen durch den gesellschaftlichen Kontext sprechen. Um das sozial-historische Umfeld, in dem sich der Rechtsfall des Juristen Marcellus abspielt, wahrnehmen zu können, muss man den rechtlichen Platzhaltern „Schuldner“ und „Gläubiger“ ein Gesicht geben und sie mit sozialem Leben erfüllen.

Erst danach werden in diesem Beitrag wieder die juristischen Beziehungen – namentlich die Kreditvergabepraxis, die mit der Struktur des römischen Vollstreckungsrechts zusammenhängt – in den Blick genommen. Zunächst geht es um den sozialhistorischen Topos, mit dessen Hilfe man sich dem seltsamen Verhalten von Gläubiger und Schuldner in dem vorgestellten





3 Kaiser Justinian I. (ca. 482–565), Ausschnitt aus einem Mosaik in der Kirche San Vitale in Ravenna (6. Jahrhundert)

Musterrechtsordnung an, aus der sich im Prinzip alle oder doch viele zeitlich nachfolgende Rechtsordnungen ableiten lassen. Sie schreiben ihm dabei einen zeitunabhängigen Charakter zu und interessieren sich sehr für die normativ-konstruktive Ebene der Institutionen und Regeln, weniger jedoch für die Zeit, in der sie entstanden. Das ist ein neuralgischer Punkt, an dem die juristische Anschauung mit der historischen in einem Spannungsverhältnis steht. Historiker des Rechts wissen, dass Regeln nicht zu allen Zeiten dasselbe bedeuten und dass sich ihr Bedeutungsgehalt mit der Zeit so verändern kann, dass man ihren historischen Ursprung kaum noch wiedererkennt. Sie stellen sich die Aufgabe, den historischen Kontext eines Falls, einer Entscheidung oder einer Regel zu einer bestimmten Zeit zu rekonstruieren und müssen zu diesem Zweck deren sozial-

und kulturhistorische Bezüge wieder einblenden. Sie knüpfen dabei an einem bestimmten Punkt in der Vergangenheit an, während Juristen notwendig in der Gegenwart arbeiten. Die Balance zwischen diesen beiden Polen zu halten, ist die Aufgabe des Rechtshistorikers. Die sozio-kulturellen Anteile von historischen Rechtsordnungen in ihrer jeweiligen Besonderheit zu analysieren, ist ein wichtiges Anliegen der Kulturgeschichte des (antiken) Rechts. Sie leistet damit einen interdisziplinär angelegten Beitrag, die Rechtsgeschichte im sozial- und kulturwissenschaftlichen Kontext anschlussfähig zu machen.

Im Fall des Marcellus-Textes bedeutet das zum Beispiel, dass der Interpret nicht betriebsblind werden darf gegenüber einem wichtigen rechtshistorischen Umstand: dass nämlich das *ius civile*, also das Recht der römischen Bürger, in seiner Zeit

keineswegs allgemein für alle Einwohner des römischen Reichs galt. Es hatte vielmehr exklusiven Charakter und trug in Teilen durchaus die Züge eines standesgebundenen „VIP-Rechts“. Zu seinem primären Adressatenkreis gehörte in der römischen Republik in erster Linie eine gemessen am wachsenden römischen Imperium zahlenmäßig äußerst kleine, wenn auch mächtige Gruppe: die männlichen Bürger Roms, die der Nobilität zuzurechnen waren. Sie schrieben sich gegenseitig ein bestimmtes Rollenbild zu, aus dem sich wiederum gesellschaftliche Verhaltensanforderungen und Ehrenkodices ergaben. Im republikanischen Recht blieben sie von Ferne erkennbar. Im Spiegel des Netzwerk-Topos werden sie rekonstruierbar.

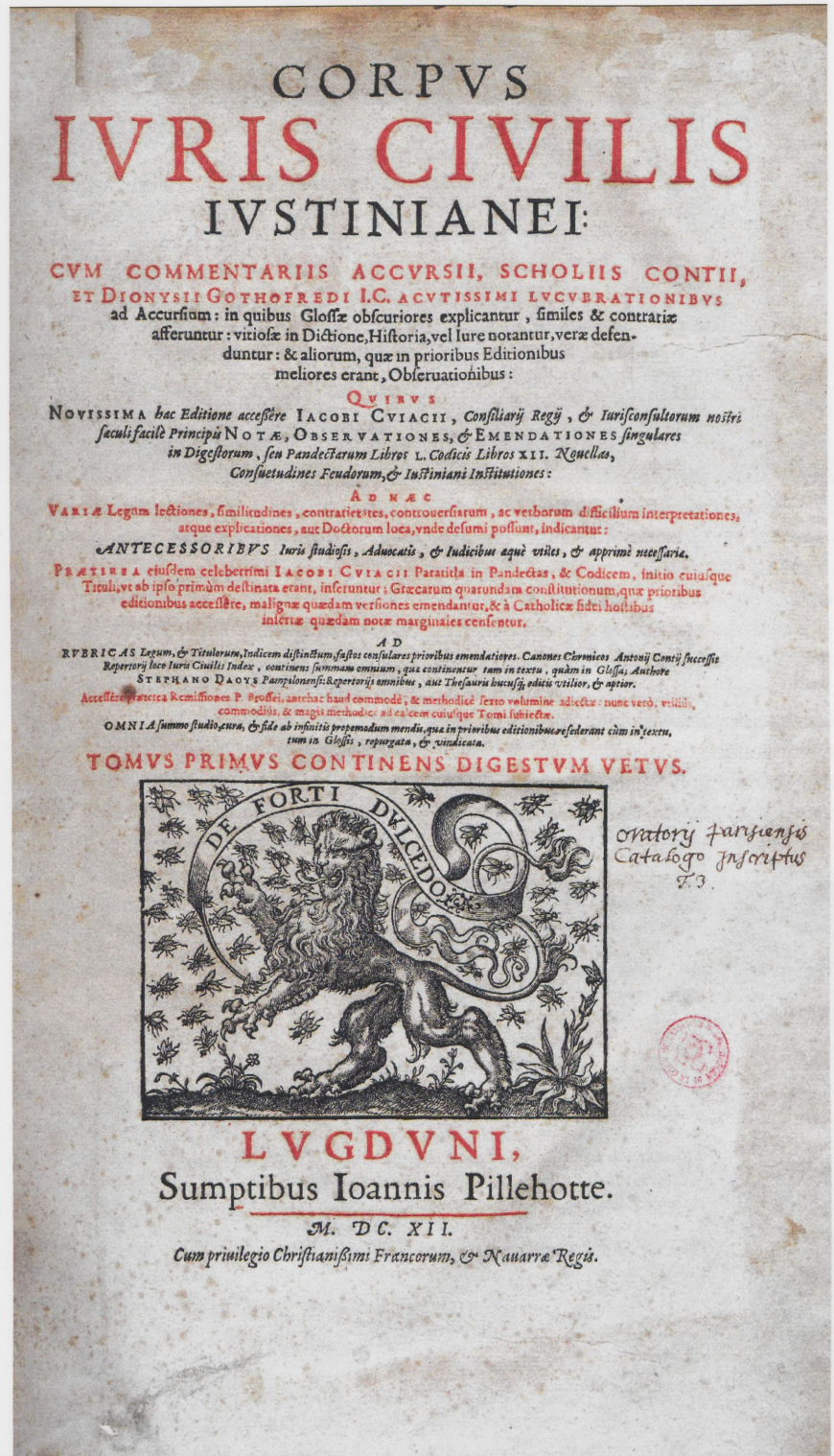
### Historische Netzwerkanalyse

Eine Netzwerk-Topologie erlaubt eine historische Verortung eines konkreten Netzwerks. Sie hält für die rechtshistorische Altertumsforschung aber noch weitere Vorzüge bereit. Soziale Netzwerke bestehen aus einer bestimmten Anzahl von persönlichen oder institutionellen Akteuren, zwischen denen mehr oder weniger strukturell verfestigte Beziehungen bestehen. Ihre Binnenstruktur ist polyzentrisch autonom organisiert. Netzwerke fungieren als eigenständige Zentren sozialer Interaktion und weisen damit über die ihnen angehörenden Individuen hinaus. Sie sind mehr als die bloße Summe ihrer Teile, weil sie über netzwerkspezifische Organisationsmechanismen verfügen, etwa über die Fähigkeit, über Zugehörigkeit oder Nichtzugehörigkeit zum Netzwerk (Inklusion oder Exklusion) zu bestimmen. Sie steuern das Verhalten ihrer Mitglieder in einer bestimmten Art und Weise und ermöglichen Ressourcentransfers. Gerade ihre transpersonale Struktur ist es, die Netzwerke zu gleichermaßen komplexen und aufschlussreichen Gebilden werden lassen. Sie funktionieren weder eindimensional noch monokausal, schon deshalb nicht, weil der Beziehungskontext der verschiedenen Akteure in der historischen Netzwerkforschung stets mit in den Blick genommen werden muss. In den jüngeren Geschichtswissenschaften kommen sie in vielfältigen Forschungskontexten vor. Man könnte fast schon von einem „Netzwerk-Boom“ sprechen. Die antike Rechtsgeschichte beginnt sich für diesen Forschungsansatz gerade erst zu interessieren.



Ein traditioneller Anwendungsbereich geschichtlicher Netzwerkforschung ist die Analyse von wirtschaftlichen und sozialen Netzwerken im Bereich der Kreditwirtschaft. Gläubiger und Schuldner werden hierbei als Angehörige einer Netzstruktur gegenseitiger monetärer Abhängigkeiten untersucht. Die historische Komponente kommt ins Spiel, wenn man in Rechnung stellt, dass die professionell organisierte Kreditgewährung durch Banken das Kennzeichen einer funktional ausdifferenzierten Gesellschaft ist. In früheren Zeiten folgte sie dagegen sozialen und politischen Beziehungsgeflechten. Das war in der römischen Republik nicht anders. Allein eine Aufstellung der Schuldner- und Gläubigerpositionen Ciceros, des berühmten republikanischen Anwalts, Politikers und Schriftstellers, zeigt, dass Kreditbeziehungen zu fast allen Angehörigen der Nobilität bestanden [7]. Die Liste der gegenseitigen Verbindlichkeiten und Forderungen liest sich geradezu wie das *Who is Who* der spätrepublikanischen Gesellschaft. Sie verweist auf ein eigenes Netzwerk von privaten Krediten und auf ein ebenso ausgeklügeltes wie austariertes System von gegenseitiger wirtschaftlicher und politischer Einflussnahme. Es geht darin um die Akkumulation und Konzentration von sozialem, wirtschaftlichem und politischem Kapital. In der Prinzipatszeit trat der Kaiser als äußerst potenter Netzwerker hinzu und verschob die Kräftegleichgewichte im Netzwerk zu seinen Gunsten. Es ist überliefert, dass der Kaiser zum Beispiel in Zahlungsschwierigkeiten geratenen Senatoren das in Verfall geratene Vermögen wieder auffüllte, den Spitzen der Gesellschaft auf diese Weise ihren Zensus erhielt und sie von der Vollstreckung nahezu exempt machte. Im Gegenzug versicherte er sich ihrer politischen Gefolgschaft und machte sie sich verbindlich.

Wendet man auf dieses Phänomen die Begrifflichkeiten der Felderlehre des berühmten französischen Sozialwissenschaftlers Pierre Bourdieu an, kann man sagen: Ökonomisches Kapital wurde in eine abstraktere Kapitalform verwandelt, indem es nämlich in symbolisches Kapital auf dem sozialen oder politischen Feld umgewandelt wurde. Ein Angehöriger der republikanischen Oberschicht, der einem Standesgenossen einen Kredit gewährte, legte also das ökonomische Kalkül nicht zwingend in der Vertragsbeziehung selbst an, wie das in Zeiten der professionellen Kreditgewährung zu geschehen pflegt.



4 Titelblatt des *Corpus Iuris Civilis*, Lyon 1612

Der Gläubiger betrieb die Gewinnoptimierung nicht im Fokus der einzelnen Austauschbeziehung, sondern suchte den Ausgleich möglicherweise auf anderen gesellschaftlichen Feldern. Mit anderen Worten: Die Realisierung von Verbindlichkeiten wurde nicht zwingend in dem Rechtsverhältnis gesucht, in dem sie anfielen.

## Das republikanische Struktur- und Ordnungsprinzip *amicitia*

Das Medium, mit Hilfe dessen der Wechsel vom dem einen auf das andere Feld gelang, ist das Konzept der *amicitia*. Es beschreibt die Freundschaftsbeziehungen zwischen den einzelnen Gentil- und Standesgenossen der römischen Nobilität, also



Si quis duos homines promiserit et Stichum solverit, poterit eiusdem Stichi dominium postea consecutus<sup>6</sup> dando liberari. in nummis minor vel prope nulla dubitatio est: nam et apud Alfenum Servius eum, <sup>45</sup> qui minus a debitore suo accipere et liberare eum <sup>712,1</sup> vellet, respondit posse saepius aliquos<sup>7</sup> nummos accipiendo ab eo eique retro dando ac rursus accipiendo id efficere: veluti, si centum debitorem decem acceptis liberare creditor velit, ut, cum decem acceperit, eadem ei retro reddat, mox ab eo accipiat ac novissime retineat: etsi in dubitationem a quibusdam hoc male deducatur, quod non possit videri is qui <sup>5</sup> ita accepit, ut ei a quo accepit retro reddat, solvisse potius quam decessisse<sup>8</sup>.  
 68 IDEM libro sexto decimo digestorum Servus decem dare iussus pupillo et liber esse, si<sup>9</sup> heres sit pupillus sive tantum condicio in eum collata sit,

5 Auszug des Textes Marcellus D. 46.3.67 (13 dig.) aus dem Corpus Iuris Civilis in der Ausgabe von Theodor Mommsen und Paul Krüger (Hrsg.), Corpus Iuris Civilis, Band 1, Dublin Zürich 1973

zwischen Personen, die einander formal gleichgeordnet waren. Freundschaftsdienstleistungen wurden, zumindest was Kreditnetzwerke betrifft, von Personen angeknüpft und unterhalten, die in der gesellschaftlichen Anschauung einander

prinzipiell gleichgestellt und gleichberechtigt waren. Es mag in der realen Mächtigkeit Abstufungen gegeben haben, innerhalb derselben sozialen Schicht formulierte die *amicitia* einen einheitlichen Verhaltenskodex, der für alle ihre Angehörigen gleichermaßen Geltung beanspruchte. Seine Einhaltung wurde jeweils bilateral, also im Verhältnis zum gleich geordneten Gentil- und Standesgenossen verlangt, war also ein Prinzip auf Gegenseitigkeit.

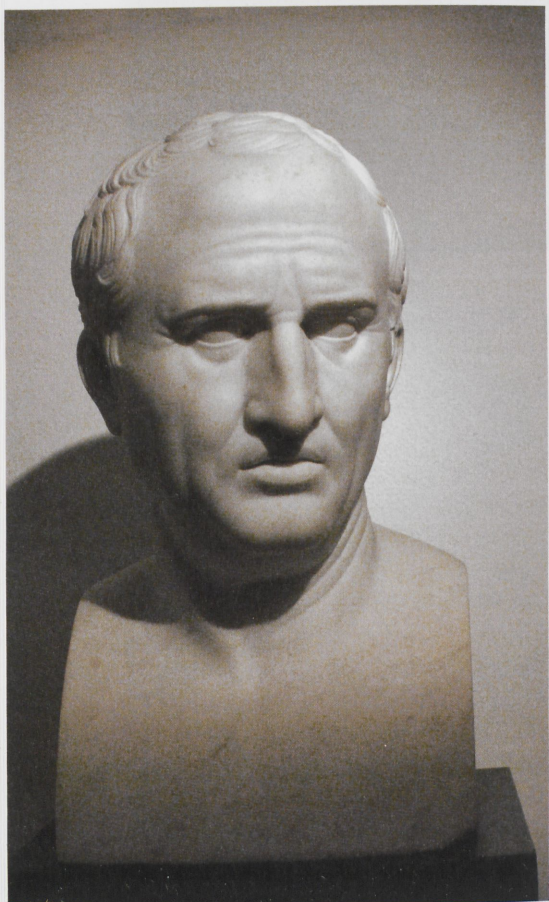
Man kann daher mit Fug und Recht sagen, dass die *amicitia* ein originär republikanischer Topos war – und eben gerade keiner der römischen Kaiserzeit. Und so verwundert es nicht, wenn die Quellen zur *amicitia* ganz überwiegend aus der republikanischen Zeit Roms stammen. Es handelt sich bei ihnen um Selbstbeschreibungen der römischen Aristokratie. Der *amicus* war das Gegenteil eines Fremden in der Gesellschaft. Er war das Ideal- und Leitbild des *civis Romanus* schlechthin. Angesprochen wurde mit ihm ein wohlhabender, sozial integrierter und politisch aktiver römischer *pater familias*, der seinen rechtlichen und sozialen Verpflichtungen gegenüber Seinesgleichen getreulich nachkam, diesen selbst Freundschaftsdienste erwies und dafür mit hoher gesellschaftlicher Wertschätzung und politischem Einfluss rechnen konnte. Wirtschaftlich waren das genau diejenigen Faktoren, die die Bonität und Kreditwürdigkeit eines römischen Bürgers ausmachten.

Auch der Ausdruck sozialer Wertschätzung war in Rom mit der wirtschaftlichen Potenz unmittelbar gekoppelt, etwa,

wenn eine *lex Roscia theatralis* aus dem Jahre 67 v. Chr. vorschrieb, dass in den ersten vierzehn Reihen des Theaters nur adlige Personen Platz nehmen durften, deren Vermögen mindestens 400.000 Denare betrug. Schließlich war die *amicitia* auch auf dem politischen Feld bedeutsam. Die Summe der persönlich und finanziell integren Staatsbürger bildete nämlich eine gut verwaltete *res publica*. Diesen Aspekt hat Cicero im Blick, wenn er in seiner Abhandlung *De officiis* mit kaum verhohlenem Stolz feststellt, dass zu keiner Zeit besser Schulden beglichen wurden als unter seinem Konsulat. Insoweit trugen die *amici* also auch eine überindividuelle Verantwortung für das Gelingen des Gemeinwesens. *Amicitia* ist deswegen in der Republik auch eine staatsorganisationsrechtliche Kategorie. Die überindividuelle Funktion des Freundschaftsnetzwerks tritt hier deutlich hervor.

In der zivilen Rechtswelt kam die *amicitia* in erster Linie in Rechtsverhältnissen vor, die personalen Charakter hatten. Das bedeutet, dass es bei der Abwicklung dieser rechtlichen Beziehungen in besonderem Maße auf die Person der Beteiligten ankam. Namentlich gehörten hierher die Übernahme eines Auftrags (*mandatum*), etwa im Rahmen einer Prozessführung, das Innenverhältnis zwischen dem Bürgen und demjenigen, für den gebürgt wird (*fideiussio*), aber auch die Verpflichtung eines Gläubigers, Befriedigung für seine Forderung zunächst bei dem Schuldner seines mit ihm befreundeten Schuldners zu suchen und diesen erst subsidiär in Anspruch zu nehmen (*delegatio*). Rechtlich vollzog die Delegation die Kreditverhältnisse der römischen Oberschicht nach und kam als Schuldentilgungsmodus *inter amicos* zum Einsatz. Alle diese Rechtsgeschäfte bewegten sich auf der Grenzlinie zwischen dem juristischen und dem gesellschaftlichen Bereich. Das Sittengesetz der Freundschaft fungierte als Präfiguration des Rechts. Die rechtskundigen Angehörigen der Aristokratie, die zugleich die ersten Juristen Roms waren, formulierten hier ein ihrer Lebensweise entsprechendes Recht und münzten auf diese Weise gesellschaftliche Treue- und Freundschaftsbindungen in rechtliche um.

Die Umwandlung gelang vor allem deshalb so gut, weil die *amicitia* selbst bereits ein normatives und typisiertes Konzept war. Dazu passt, dass der antike Freundschaftsbegriff weder zwingend auf individuelle Sympathie oder Antipathie,



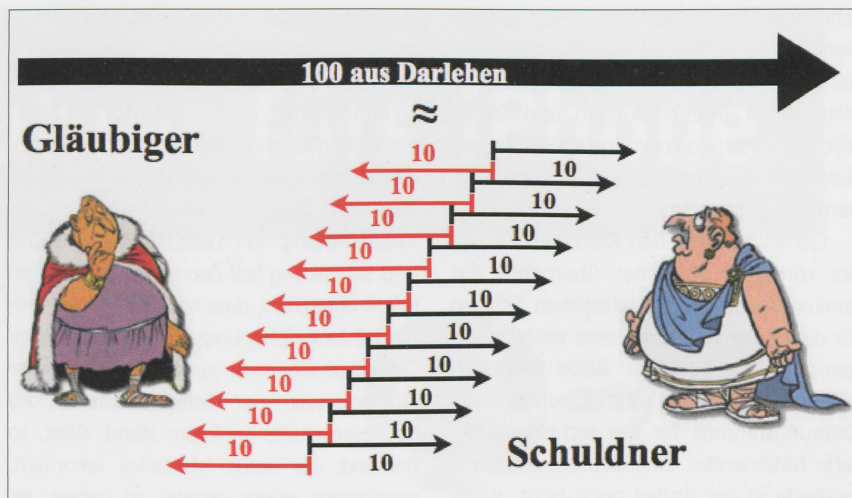
7 Marcus Tullius Cicero (106–43 v. Chr.), Porträtbüste aus dem Jahr 1799 nach einem römischen Original



noch auf das Bestehen eines persönlichen Näheverhältnisses zu einem einzelnen Freund abstellte. Entscheidend war vielmehr die anonymere Kategorie der Zugehörigkeit zu einer bestimmten sozialen Gruppe. Das ist ein wichtiger Unterschied zum individuellen Freundschaftsverständnis der Moderne. Illustrativ ist wiederum das Beispiel Ciceros, der sich bei seinem Intimfreund Atticus über Seiten brieflich darüber beklagte, dass sich sein ehemaliger Schwiegersohn – ein ausgesprochener Widerling namens Dolabella – nach dem Tod seiner geliebten Tochter Tullia nicht bereit finde, die von ihm, dem Schwiegervater, bestellte Mitgift freiwillig an ihn zurück zu erstatten. Dass Cicero nach der Auflösung der Ehe durch den Tod seiner Tochter rechtlich einen Anspruch auf die Rückerstattung der Mitgift hat, thematisierte er in dem Brief an Atticus überhaupt nicht. Die Klage gegen den Standesgenossen Dolabella, obwohl rechtlich ganz offensichtlich begründet, war für ihn keine gesellschaftlich akzeptable Option. Die Rücksichtnahmepflicht unter Freunden wirkte als ständisches Element selbst in dem Fall fort, dass die schwägerschaftliche Verbindung *de iure* bereits aufgelöst war und Cicero gegen seinen ehemaligen Schwiegersohn eine starke persönliche Abneigung hegte.

### Amicitia im notleidenden Kreditverhältnis

Im Folgenden sollen die Kreditbeziehungen im Netzwerk noch einmal in das Blickfeld rücken. Es geht dabei um die Kreditvergabepraxis *in action*. Darlehen wurden unter den Mitgliedern des Netzwerks, also *inter amicos*, grundsätzlich zinslos gewährt. Das war Teil des Freundschaftsdienstes des Darlehensgläubigers gegenüber dem standesangehörigen Darlehensschuldner und innerhalb der Nobilität die Regel. Die Gewährung von Krediten gegen Entgelt kam in der römischen Oberschicht nur im Ausnahmefall vor, wenn die Bonität des Schuldners sowie seines sozialen und politischen Prestiges schon angetastet war. Das waren die Fälle der so genannten *versura*. Sie war ursprünglich ein Instrument der bargeldlosen Zwischenfinanzierung zum Zwecke der Überbrückung eines vorübergehenden Liquiditätsengpasses in Zeiten deflationärer Krisen. Materiell beinhaltete sie eine Umgehung des römischen



6 Illustration der Schuldentilgungspraxis in Marcellus D. 46.3.67 (13 dig.)

Zinseszinsverbots, bei dem die Zinsen nach einer bestimmten Zeit in das Darlehenskapital mit einbezogen und als separater Betrag nicht mehr ausgewiesen wurden. Die Versur war eine entgeltliche Form der Geldbeschaffung, die bei Risikogeschäften eingesetzt wurde, etwa zur bargeldlosen Fernüberweisung außerhalb Roms. Sie stand aber auch Schuldner offen, deren finanzielle und soziale Integrität bereits so weit angegriffen war, dass sie aus dem Netzwerk der *amici* heraus zu fallen drohten. Mit den Grundsätzen des *ius civile* war die Versur jedenfalls nicht vereinbar. Und so nimmt es nicht wunder, dass ihr die

rechtliche Anerkennung versagt blieb, während sie als Institut des Wirtschaftslebens eine nicht zu unterschätzende Bedeutung hatte.

Da die Darlehensgewährung im Freundschaftsnetzwerk der römischen Nobilität nicht gegen Zinsen erfolgte, entwickelte sich in dieser sozialen Schicht auch kein professionelles Geldverleiher- oder Bankwesen. Das Kreditnetz folgte vielmehr den persönlichen Beziehungen. Gleichwohl begann sich in der Antike in einer Parallelwelt zur römischen Oberschicht das Kreditgeschäft auszuprägen, in der sozialen Schicht der freigelassenen Sklaven. Sie



8 Römischer Geldwechsler (argentarius) an seinem Stand (Relief auf einem Endymionsarkophag, etwa 4. Jahrhundert v. Chr.)



schuldeten ihren ehemaligen Herren zwar Dankbarkeit in Gestalt von Dienstleistungen, unterlagen aber als Freigelassene nicht deren Ehrenbindungen und Treuepflichten. Deshalb konnten sie Geld gegen Geld verleihen und Wechselstuben und Bankhäuser gründen [8].

Gemeinsam mit den Kreditnetzwerken der römischen Nobilität übernahm das Bankenwesen der freigelassenen Sklaven für die antike Wirtschaft eine wichtige organisatorische Funktion. Beide formulierten Handelsbräuche und schufen einen Ordnungsrahmen für das rechtsgeschäftliche Miteinander. Eine Betriebsökonomie existierte in der Antike noch nicht. Komplexe wirtschaftliche Beziehungen konnten rechnerisch nur schwer erfasst werden. Deshalb wurden Werte wie *honor* (Ehre), *gratia* (Dankbarkeit) und *amicitia*, die heute ideell besetzt sind, wirtschaftlich aufgeladen. In einem solchen Netzwerk konnte man auf den einzelnen Netzwerker nur schwer verzichten. Denn er war darin nicht nur als Person präsent, sondern als Institution.

Es verwundert vor diesem Hintergrund nicht, dass die Angehörigen des Kreditnetzwerks womöglich darauf geachtet haben, dessen Funktionsfähigkeit durch das Ausscheiden einzelner Mitglieder nicht zu schmälern. Genau das aber wäre geschehen, wenn der Gläubiger im Marcellus-Text auf der Durchsetzung seiner Forderung gegen den nicht zahlungsfähigen Schuldner im Wege der Vollstreckung bestanden hätte. Er hätte sich dazu entschließen müssen, diesen aus dem Wirtschaftskreislauf und dem politisch-gesellschaftlichen Leben zu eliminieren. Denn Vollstreckung bedeutete in Rom notwendig den Konkurs. Der Vollstreckungsschuldner wurde rechtlich und sozial infam. Er verlor nicht nur sein restliches Vermögen, sondern mit ihm die öffentlichen und privaten Ämter sowie jegliches soziale und politische Kapital. Der Schuldknechtschaft preisgegeben, war er das Gegenbild des *amicus*, der rechtlich Ausgestoßene und sozial stigmatisierte *inimicus*.

So wird verständlich, dass die Vollstreckung für den Gläubiger im Ausgangstext ein allzu scharfes Schwert gewesen sein muss. Es wird im Gegenteil deutlich, weshalb er eher dazu bereit war, für dieses Mal

auf den Großteil seiner Forderung zu verzichten und seinem Standesgenossen durch die besondere Art der Schuldtilgung zu ermöglichen, ein „*member of the club*“ zu bleiben (David Daube). Das Verfahren, dessen man sich dazu bediente, trug performative Züge. Gerade die mehrfache Wiederholung von Leistung, Teilerfüllung und Schenkung ließ den gewünschten Eindruck entstehen, dass nämlich der Schuldner zahlungsfähig und zahlungsbereit war. Die Praxis war zwar juristisch nicht unumstritten, weil der Scheincharakter des Rechtsgeschäfts im Raum stand. Aber, so bemerkt der Jurist Marcellus lakonisch, wenigstens *etwas* gezahlt zu haben, sei immer noch besser, als eine Schuld erlassen zu bekommen. Diese wurde in den größeren Zusammenhang des Freundschafts- und Kreditnetzwerks gerückt. Hier musste der Saldo auf lange Sicht ausgeglichen werden. Es handelte sich um eine Art schwarzer Buchführung, in der symbolisches Kapital das fehlende ökonomische zumindest eine Zeit lang ausgleichen konnte. Ein weniger rücksichtsvoller Umgang mit der Insolvenz eines Netzwerklers hätte mit hoher Wahrscheinlichkeit ungewollte Kettenreaktionen im gesamten Netzwerk nach sich gezogen und auf Dauer wohl nicht weniger bedeutet als die Zerstörung des *way of life* der römischen Oberschicht.

## Literatur

Curt Wolfgang Hergenröder (Hrsg.), Gläubiger, Schuldner, Arme. Netzwerke und die Rolle des Vertrauens, Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften 2010.

Inge Kroppenberg, *Amicitia* und römisches Delegations- und Auftragsrecht. Zeitschrift der Savigny-Stiftung für Rechtsgeschichte. Romanistische Abteilung 126 (2009), S. 284–304.

Inge Kroppenberg, *Die Insolvenz im römischen Recht*, Köln: Böhlau 2001.

Alan Rodger, David Daube (1909–1999), in: Jack Beatson, Reinhard Zimmermann (Hrsg.): *Jurists Uprooted. German Speaking Émigré lawyers in Twentieth-Century Britain*, Oxford New York: Oxford University Press, 2004, S. 233–248.



Prof. Dr. iur. **Inge Kroppenberg**, geb. 1968 in Koblenz, Studium der Rechtswissenschaft an der Johannes Gutenberg-Universität in Mainz; Juristische Staatsexamina 1993 und 1995; wissenschaftliche Mitarbeiterin und Assistentin am Lehrstuhl für Bürgerliches Recht, Römisches Recht und Privatrechtsgeschichte der Neuzeit; Promotion 2000 und Habilitation 2005 an der Universität Mainz; Vertretung eines römischrechtlichen Lehrstuhls an der Juristenfakultät der Universität Leipzig im Sommersemester 2006, im Wintersemester 2006/2007 in Frankfurt am Main; Ablehnung des Berufungsangebots auf die Professur für Antike Rechtsgeschichte, Europäische Privatrechtsgeschichte und Zivilrecht am Fachbereich Rechtswissenschaft der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main; seit Sommersemester 2007 Inhaberin des Lehrstuhls für Bürgerliches Recht, Römische Rechtsgeschichte und Privatrechtsgeschichte der Neuzeit an der Fakultät für Rechtswissenschaft der Universität Regensburg.

**Forschungsschwerpunkte:** Familien- und Erbrecht in dogmatischer und historischer Perspektive; Kulturgeschichte des antiken römischen Rechts, Kodifikationsgeschichte.



# Kunstführer fürs iPhone



artguide



## Inhalt

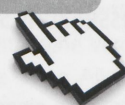
- Audioguide
- E-Book
- Interaktiver Grundriss
- Zeittafel
- Besucherinfos
- umfangreiches Bildmaterial

Download nur **3,99 Euro**



Available on the iPhone

**App Store**



## So funktioniert's

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

**www.artguide.de**



# Klimawandel, Bevölkerungsexplosion und Ressourcenverbrauch

## Aufstieg und Niedergang Roms in einer neuen Perspektive

Josef Löffl

Unsere Gesellschaft sieht sich mit dem Problem eines nachhaltigen Umgangs mit Rohstoffen und den Auswirkungen eines weitreichenden Klimawandels konfrontiert. Ein Blick zurück verrät: Wir sind nicht die ersten, die mit solchen Erscheinungen zu kämpfen haben. Auch die Geschichte des Imperium Romanum ist eng mit jenen Faktoren verknüpft. Sie können den Weg zu großer Machtentfaltung ebnen – und ein Reich auf dem Höhepunkt seiner Macht in den Untergang stürzen.

### Demographie und Klimawandel als Schlüssel zum Sieg

Hannibal unterlag einem tödlichen Irrtum: Auf dem Schlachtfeld von Cannae hatte er die vereinigten Truppen Roms und seiner Alliierten völlig besiegt. In seinen Augen war der Kontrahent endgültig bezwungen, ein Angriff auf die Tiberstadt selbst nicht mehr von Nöten. Wider die Vorstellungskraft des nordafrikanischen Feldherrn aber war die *res publica Romana* in der Lage, erneut Armeen aus dem Boden zu stampfen und den Krieg noch über ein Jahrzehnt fortzuführen. Am Ende unterlag Karthago in diesem großen Ringen und Rom griff nach der Herrschaft im Mittelmeerraum [1].

Hannibal siegte sich in Italien zu Tode, wie es einige Jahrzehnte zuvor bereits Pyrrhus aus Epiros getan hatte. Die Siege Roms gründeten nicht auf ausgeklügelter Strategie oder ausgefeilter Taktik, sondern auf dem demographischen Faktor. Wie keine andere Region des Mittelmeerraums erfuhr die italische Halbinsel seit dem frü-



1 Das Imperium Romanum zur Zeit des Todes von Augustus (14 n.Chr.): Dunkelgrün sind die der römischen Oberhoheit unterstellten Gebiete dargestellt. Die von Klientelfürsten regierten Territorien werden hellgrün wiedergegeben. Grau markiert ist der gescheiterte Versuch einer umfassenden Expansion in Germanien, welcher der Aufstand unter Arminius im Jahre 9 n.Chr. ein Ende bereitete.

hen 3. Jh. v. Chr. einen Bevölkerungszuwachs. Die Zahlen sprechen eine eindeutige Sprache: Am Vorabend des Peloponnesischen Krieges war Athen auf dem Höhepunkt seiner Macht dazu in der Lage, 20.000 Infanteristen zu mobilisieren. Alexander der Große schöpfte in den Jahren seines Eroberungsfeldzuges das Militärpotential des erweiterten makedonischen Königreiches aus, dessen Truppenstärke sich auf etwa 40.000 Soldaten belief. Die Tiberstadt aber bot zusammen mit ihren Bundesgenossen 700.000 Mann an Fußsoldaten und 70.000 Kavalleristen auf. Diese Zahlen sind keine phantastischen Produkte römischer Allmachtsphantasien, sondern

entspringen der Feder des Polybios, der die Militärmaschinerie Roms bis ins letzte Detail aus eigener Anschauung kannte.

Die regelrechte Explosion der Bevölkerungszahlen fällt mit einem klimatischen Phänomen zusammen, welches in der Klimageschichte als *Roman climatic optimum* bezeichnet wird: Spätestens im 3. Jh. v. Chr. ist ein Temperaturanstieg zu verzeichnen, welcher südlich der Alpen feuchtwarme Bedingungen zur Folge hatte, die ideale Voraussetzungen für die Landwirtschaft schufen. Die Erweiterung der Ernährungsgrundlage war das Rückgrat der anwachsenden Population. Andere Regionen Europas sahen sich im Gegensatz dazu mit



äußeren Lebensumständen konfrontiert, die eher als lebensfeindlich zu bezeichnen sind: So litten die Bauern Jütlands unter schwerer Mangelernährung, die mit einem erhöhten Maß an Kindersterblichkeit einherging. Durch Maßnahmen wie eine späte Heirat unternahm die lokale Bevölkerung alles, um die Zahl der zu stopfenden Mäuler gering zu halten. Versuchen dieser Art aber war kein langfristiger Erfolg beschieden, weshalb nur der Ausweg der Abwanderung blieb. Hierin wurzelt das Phänomen der Völkerwanderung, das Jahrhunderte später einen entscheidenden Beitrag zum Untergang des weströmischen Reiches leisten sollte.

Italien selbst aber erblühte und dem konnten sich ausbreitende Krankheiten neuer Art wie die Malaria keinen Abbruch tun. In den Armeen Roms dienten zur Zeit Hannibals nicht nur seine Bürger, sondern auch die jungen Männer der italischen Landstädte, von denen nur die wenigsten der lateinischen Sprache mächtig waren. Die wild zusammengewürfelten Milizkräfte waren gut ausgebildeten Heeren in allen Belangen unterlegen. Doch die gewaltige *manpower* der italischen Halbinsel war nicht zu bezwingen: Sie führte die römische Republik zu ungeahnter Größe, machte sie zur unangefochtenen Herrscherin über die westliche Hemisphäre – und sie war schließlich auch eine Ursache des Niedergangs Roms in einem Jahrhundert blutiger Bürgerkriege.

## Das Damoklesschwert der römischen manpower

Das ungebremste Wachstum der Bevölkerung erforderte eine Reform althergebrachter Strukturen. Die sich aus einer dünnen Schicht von Adelshäusern rekrutierende Führungsriege Roms zeigte sich zu keinem Wandel befähigt. Überkommene Bräuche wie die Aufteilung von Grund und Boden zu gleichen Teilen an alle männlichen Nachkommen führten zu einer Aufspaltung der landwirtschaftlichen Nutzflächen. Die Verkleinerung der Parzellen ließ einen rentablen Anbau nicht mehr zu. Großgrundbesitzer bemächtigten sich der Flächen, deren einstige Bewirtschafter ihr Glück in den urbanen Zentren Italiens, vor allem aber in Rom selbst suchten. Während die Zahl der mittellosen Tagelöhner in den Slums am Tiber beständig wuchs, schrumpfte das Militärpotential der *res pu-*



2 Die genagelte Sohle eines römischen calceus. Dieses Schuhwerk wurde im Rahmen eines experimental-archäologischen Projekts auf einer Strecke von 585 km zur Anwendung gebracht. Originale dieser römischen Stiefel, die im 2. und 3. Jh. n.Chr. getragen wurden, fanden sich u.a. auf der Saalburg.

blica zusammen; denn nur wer über Grund und Boden verfügte, galt als wehrtauglich.

Um diese fatale Situation zu beheben, wurde eine Militärreform durchgeführt, auf Grund derer nun die *capite censi* (übers: jene Männer, die bei der Musterung nichts aufzuweisen hatten als ihren eigenen Kopf), die Angehörigen der untersten sozialen Schichten der Gesellschaft ohne jegliches Eigentum zum Heeresdienst zugelassen wurden. Die Konflikte, deren Schauplätze sich immer weiter von Italien entfernten, konnten mit Freizeitsoldaten, die ihre Bauernhöfe in der Zeit zwischen Aussaat und Ernte verließen, um die Kriege Roms zu führen, nicht mehr bewältigt werden. Die neuen Rekruten dienten fortan in einer Berufsarmee, die von herausragenden Vertretern des römischen Staates geführt wurde. Eine Trennung von Politik und Militär existierte nicht. Bald wurden Fragen der Macht nicht mehr im Senat debattiert, sondern auf den Schlachtfeldern der Bürgerkriege ausgefochten.

Als ausführendes Element jener Auseinandersetzungen fungierten die einstigen Kleinbauern Italiens, die nun ihr Auskommen als Berufssoldaten fanden. Anschließend auf ihre Feldherren eingeschworen und geprägt von einer gewissen Landsknechtsmentalität hatte diese Soldateska keine Skrupel, ihre Waffen auch gegen den römischen Staat zu erheben, dessen Gewaltmonopol in die Hände von *War-*

*lords* gelangt war, als deren erfolgreichster Vertreter sich der Erbe Caesars erwies. Wir kennen diesen Mann heute als den Friedensfürst Augustus. Das Erbe seines an den Iden des März 44 v.Chr. ermordeten Adoptivvaters katapultierte ihn im Teenageralter in die ranghöchsten Amtspositionen Roms, in denen er sich fortan als rücksichtsloser Kriegsherr erwies. Nach der Ausschaltung aller Konkurrenten streifte Augustus diese militärische Vergangenheit ab und inszenierte seine Alleinherrschaft geschickt als Wahrung des Friedens. Die Wirklichkeit war eine andere: Die *Warlords* der späten Republik bedienten sich hunderttausender von Berufssoldaten, die sich nicht um die Belange der *res publica Romana* scherten. Sie fanden ihr Auskommen im Kriegshandwerk und folgten den Versprechungen ihrer Patrone, welche ihnen Landbesitz in Italien in Aussicht gestellt hatten – trügerische Verheißungen, da die Halbinsel nach wie vor unter einem gewaltigen Bevölkerungsdruck litt.

## Altlasten der Bürgerkriege und der Hunger nach Ressourcen

Der Friede konfrontierte den Sieger der Bürgerkriegsepoche mit zwei schier unlösbaren Aufgaben: Zum einen hatte sich die Armee zu einem Moloch ungeheurer Größe entwickelt, der den Staat fest im





**3 und 4** *Milites legionarii auf dem Marsch von Carnuntum nach Regensburg im Jahr 2008. Im Rahmen dieses Versuches wurde der Aspekt des Ressourcenverbrauchs beim römischen Militär untersucht. Das Augenmerk galt dabei den Stoffen, die heute im dinglichen Befund in Europa kaum nachweisbar sind – Holz, Textilien, Leder.*

Würgegriff hielt, zum anderen lag die Wirtschaft des römischen Staates, der jeglicher effektiver Verwaltung entbehrte, am Boden. Der Raum von der iberischen Halbinsel bis zum nahen Osten wurde von ein paar Dutzend Beamten verwaltet. Das Steuersystem war privatisiert und die an diesem *outsourcing* beteiligten Unternehmen schreckten vor nichts zurück, um die entsprechenden Gelder einzutreiben. Die Verwaltung der einzelnen Regionen unterlag korrupten Gouverneuren, die mit den Steuerpächtern gemeinsame Sache machten, um ihre Privatkasse aufzufüllen. Rom hatte es sträflich unterlassen, sich von den Gegebenheiten des überschaubaren latini-schen Stadtstaates zu emanzipieren. Das Herrschaftsmodell einer *polis* mit angeschlossenem Weltreich hatte sich selbst überlebt.

Zur Ausarbeitung umfangreicher Planungsmaßnahmen war keine Zeit: Truppenteile meuterten und ihre Loyalität musste teuer erkaufte werden. Der von Augustus privat finanzierte Ankauf von Land

für die Veteranen stellte keinen dauerhaften Lösungsweg dar. Das Mittel zum Zweck hatte seine Aufgabe erfüllt – und nun galt es, die einst gerufenen Geister wieder los zu werden. Für das neue Regime stand eine Entlassung seiner ‚Landsknechte‘ nicht zur Debatte, da dies unverzüglich einen neuen Bürgerkrieg heraufbeschworen hätte.

Der Ressourcenverbrauch der Truppe erdrückte den Staat: Der Ernteertrag einer Gesamtfläche von 500 Fußballfeldern wöchentlich wurde benötigt, um die Grundversorgung dieser bis an die Zähne bewaffneten Soldateska zu gewährleisten. Auch der ‚Fuhrpark‘ dieser Einheiten bedurfte gewaltiger Getreidemengen: Die Pack- und Tragtiere einer einzigen Legion benötigten alljährlich bis zu 900 Tonnen Gerste – in der Zeit der Bürgerkriege belief sich die Zahl dieser Einheiten auf 60! Das Schuhwerk der Soldaten wies eine mit Eisennägeln versehene Sohle auf, die ihrem Träger auf lockerem Untergrund sicheren Halt verlieh: 100 Tonnen Eisen waren notwen-

dig, um jeden römischen Soldaten mit einem Paar Sandalen auszustatten – von den Wäldern, die gerodet werden mussten, um die dafür benötigte Holzkohle zu produzieren, soll hier gar keine Rede sein [2]. Um jeden Angehörigen der römischen Armee jeweils mit einer Tunika auszustatten, bedurfte es mindestens 400 Tonnen Wollstoff.

Zahlen zum Ressourcenverbrauch des *exercitus Romanus* lassen sich vor allem durch den Weg der experimentellen Archäologie ermitteln, der darin besteht, die Aussagen der Quellen und den Kenntnisstand zum dinglichen Befund in einer Rekonstruktion zu vereinen, die einem Praxistest unterzogen wird. Im Jahre 2008 machte sich eine Gruppe von Doktoranden und Studierenden der Universität Regensburg in der nach antiken Vorlagen rekonstruierten Ausrüstung römischer Soldaten zu einem beinahe 600 km langen Marsch auf [3]. Dabei wurden u.a. detaillierte Einblicke in den mit dem Schuhwerk römischer Soldaten verbundenen Ressourcen-



verbrauch möglich: Der Versuch zeigte deutlich auf, welche Mengen an Leder, Eisen und Pflegemitteln wie Knochenöl und Bienenwachs notwendig waren, um die genagelten Stiefel einsatztauglich zu halten – in der Regel schweigen die Quellen zu Aspekten dieser Art. Generell zeigten der Materialverbrauch im Rahmen des Nachbaus und der Verschleiß während des Praxistests die mannigfaltigen Bedarfssfelder an Rohstoffen auf [4]. Bereits der Bedarf an Holz für Schanzwerkzeuge überstieg die lokalen Vorkommen in Italien bei weitem [5]. Dieser Versuch reiht sich in die Kette experimental-archäologischer Projekte des Lehrstuhls für Alte Geschichte der Universität Regensburg ein, zu denen auch der Nachbau und die Erprobung einer spätantiken Flussgaleere (*navis Lusoria*) zählt (siehe dazu: Blick in die Wissenschaft 17 (2005), S. 42–45).

## Expansion als Lösung

Augustus griff zu einer simplen, aber effektiven Lösung: Er verlagerte die Versor-

gungslast der Armee nach außen. Bislang bestand der römische Einflussbereich aus einem wenig vernetzten Fleckenteppich. Das neue Regime initiierte eine nie dagewesene Expansionswelle, die mit der Errichtung eines Infrastrukturnetzwerkes einherging. Die römische Armee überrollte ihre Gegner, ließ einen Teil ihrer Einheiten als Besatzungstruppen zurück, welcher die lokalen Ressourcen für Rom nutzbar machten, während das Gros der Truppe bereits zu neuen Zielen ansetzte. Westeuropa und der Mittelmeerraum unterstanden einer straff organisierten Militärverwaltung. Durch eine Art ‚Finanzausgleich‘ wurde sichergestellt, dass ertragreiche Regionen diejenigen Gebiete mitfinanzierten, die wenig oder keinen Profit abwarfen.

Die römische Besatzung hatte erheblichen Einfluss auf die Entwicklung der lokalen Flora und Fauna. Ein ökologisches Bewusstsein im modernen Sinn spielte im Rahmen der Nutzung lokaler Ressourcen noch keine Rolle: Rom entpuppte sich als Europas größter Umweltverschmutzer. Aufschlussreich sind vor allem die Analy-

sen des „ewigen Eises“ von Grönland. Dabei wurde unter anderem der Anteil von Blei an Bohrkernen für den Zeitraum von 1000 v. Chr. bis 1500 n. Chr. untersucht. Die dort nachgewiesene Konzentration des Schwermetalls erreichte im 1. Jh. v. Chr. mit 6,1 pg/g eine erst zu Beginn des 16. Jh. wieder annähernd erzielte Größenordnung. Ein ähnlicher Sachverhalt ist in Grönland zudem für die durch die Kupfer-Schmelze hervorgerufenen atmosphärischen Immissionen nachweisbar, deren in der Zeitspanne vom 1. Jh. v. Chr. bis zum 2. Jh. n. Chr. erzielter Level erst wieder in der Epoche der Industriellen Revolution im 18./19. Jh. erreicht wurde.

Ökologische Katastrophen waren keine Seltenheit: Gerade die Nutzung des Rohstoffes Holz machte auch nicht vor der Abholzung komplexer Auwaldstrukturen an Rhein und Donau halt. Die dadurch generierten Überschwemmungen minderten die Erträge der lokalen Landwirtschaft zum Teil enorm. Doch noch hielt die günstige Klimasituation, die den Aufstieg Roms ermöglicht hatte, an – bis ein Naturereignis den Lauf der Geschichte änderte.





## Ein Vulkan und das Ende Roms

Das Eis Grönlands spricht eine eindeutige Sprache: Im 2. Jh. n. Chr. ereignete sich in Nordamerika ein Vulkanausbruch, der eine globale Klimaveränderung herbeiführte. Wetterphänomene wie starke Sommerregen vernichteten die Lebensgrundlage etlicher Völkerschaften außerhalb des Imperium Romanum. Die dortige Subsistenzwirtschaft war Problemen dieser Art nicht gewachsen. Gerade der osteuropäische Raum geriet nun in Bewegung. Bislang war es Rom gelungen, die Auswirkungen der Völkerwanderung abzuwehren. In dieser ‚Reichskrise‘ litt die Wirtschaft unter den Folgen einer gewaltigen Inflation. Kaiser regierten bisweilen nur wenige Monate und kämpften mit Usurpatoren um die Macht in einem Staat, der sich bereits in der Auflösung befand. Dem ungeheuren Druck an den Grenzen des Reiches konnte Rom nicht länger stand halten. Bislang hatten Flüsse wie Rhein und Donau als natürliche Bollwerke gegen auswärtige Feinde fungiert. Aufgrund der Klimaverschlechterung froren sie aber etliche Monate im Jahr zu und konnten von Feinden ohne Weiteres passiert werden.

Durch Maßnahmen wie die Teilung des Reiches gelang es, das Ende der römischen Herrschaft in Europa hinauszuzögern. Innovationen wie die Schaffung einer auf Galeeren (*naves Lusoriae*) basierenden Flussüberwachung konnte das Vordringen auswärtiger Kräfte eindämmen. Längerfristig aber erwies sich das Weltreich der Tiberstadt als machtlos gegenüber der Natur: Ein Klimawandel hatte den Grundstein für den Aufstieg Roms gelegt, ein anderer leitete den Untergang des Imperium ein.

Das Zusammenspiel von Klimageschichte, Paläobotanik und experimenteller Archäologie ermöglicht uns neue Einblicke in historische Prozesse. Vor allem aber werden Lücken in der historischen Forschung geschlossen, die bislang auf Grund der Ermangelung schriftlicher Zeugnisse existierten: Diese modernen Ansätze werden im Forschungsverbund „Region im Umbruch“ der Universitäten Graz, Passau und Regensburg zur Anwendung gebracht, um ein Modell zum bayrisch-österreichischen Raum von der Keltenzeit bis in das frühe Mittelalter zu entwickeln. Das Zeitalter der Quellenarmut ist vorbei!



**Josef Löffl**, geb. 1980 in Bad Kötzing. Magister Artium in den Fächern Geschichte, Klassische Archäologie und Lateinische Philologie an der Universität Regensburg im Jahre 2006. Promotionsstipendium der bayerischen Elitestiftung (2007–2009). Nachwuchsforscherpreis des bayerischen Elitenetzwerkes (2008). Promotion im Fach Alte Geschichte an der Universität Regensburg 2010. Seit 2009 wiss. Mitarbeiter am Lehrstuhl für Alte Geschichte der Universität Regensburg.

**Forschungsgebiete:** Wirtschafts- und Sozialgeschichte des Imperium Romanum, griechische und römische Umweltgeschichte, Experimentelle Archäologie.

## Literatur

Wolfgang Behringer, Kulturgeschichte des Klimas: Von der Eiszeit bis zur globalen Erwärmung. 4. Aufl. München: Beck, 2009.  
 Florian Himmler, Heinrich Konen, Josef Löffl, *Exploratio Danubiae*: Ein rekonstruiertes spätantikes Flusskriegsschiff auf den Spuren Kaiser Julian Apostatas. Berlin: Frank & Timme, 2009.  
 Florian Himmler, Christian Köpfer, Josef Löffl (Hrsg.), *Die römische Armee im Experiment*. Berlin: Frank & Timme, 2011.  
 Josef Löffl, *Die römische Expansion*. Berlin: Frank & Timme, 2011.  
 Lukas Thommen, *Umweltgeschichte der Antike*. München: Beck, 2009.



5 Lagerbau mit Hilfe römischer Schanzwerkzeuge aus Holz: Ohne Zweifel handelt es sich bei dieser Ressource nicht nur um den wichtigsten Energieträger der Antike, sondern um den entscheidenden Werkstoff der Legionen Roms. Er wurde aber nicht nur zur Fertigung von Waffen, sondern auch für die Produktion von Handwerksgerät wie den hier dargestellten Schaufeln verwendet, bei denen ausschließlich die Stichkanten aus Eisen gefertigt wurden.



# Die Chemie muss stimmen

## Bei Insekten sind Duftstoffe oft entscheidend für die Partnerwahl

Joachim Ruther

Jeder hat das schon einmal erlebt: Aus der Ferne betrachtet wirkte unser Gegenüber noch ganz sympathisch, doch schon nach wenigen Atemzügen beschleicht einen das Gefühl, dass das erste Rendezvous wohl auch das letzte sein wird. Auch wenn olfaktorische Reize bei unserer Partnerwahl oft unbewusst mitwirken, wird die von Patrick Süskind in seinem Roman *Das Parfum* beschriebene Wunderdroge, mit der Jean-Baptiste Grenouille die Massen erotisierte, wohl niemals Realität werden. Bei Insekten hingegen spielen über die Antennen wahrgenommene olfaktorische Reize oft die primäre Rolle bei der Partnerfindung. Zwischen männlichen und weiblichen Individuen einer Art werden Informationen über so genannte Sexualpheromone ausgetauscht, die dem Empfänger z. T. über große Entfernungen hinweg Rückschlüsse auf Standort, Geschlecht oder Paarungsbereitschaft des Senders ermöglichen. Bei manchen Insekten geht die Liebe hingegen durch den Magen. Sie nutzen die von ihrer Liebsten beim Fraß freigesetzten Pflanzenduftstoffe, um deren Aufenthaltsort ausfindig zu machen. Hat man die Chemie der Partnerfindung einer Art erst einmal entschlüsselt, kann man mit synthetischen Lockstoffen deren Kommunikationssystem kräftig durcheinanderbringen und so Nutzpflanzen, Vorräte und andere Ressourcen vor Insektenbefall schützen.

### Chemische Ökologie – ein interdisziplinäres Forschungsfeld

Als der französische Naturforscher Jean-Henri Fabre im Jahre 1906 in seinem Arbeitszimmer mit einem Weibchen des

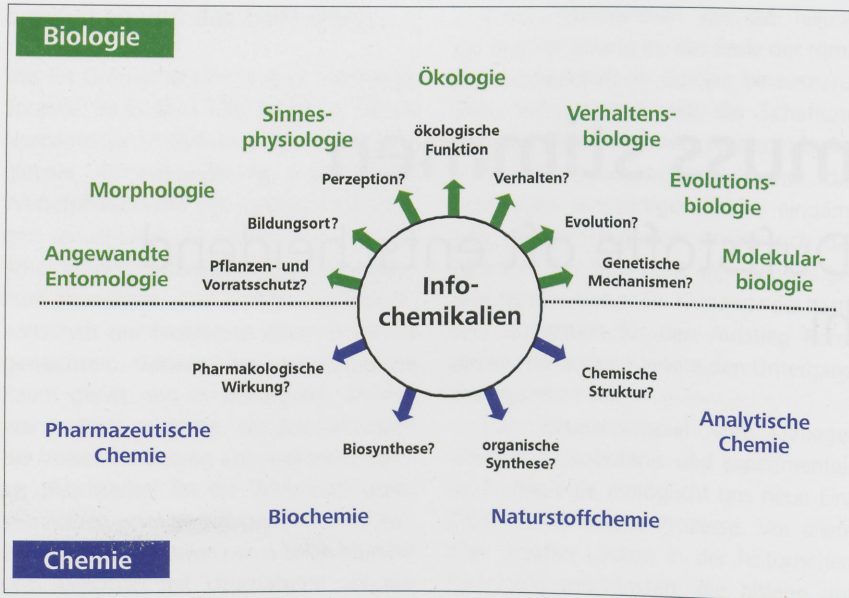
Nachtpfauenauges experimentierte, staunte er nicht schlecht: *„Es mögen ihrer zwanzig sein und mit Einrechnung der in die Küche, das Zimmer der Kinder und andere Räume der Wohnung abgeirrten vierzig. Vierzig verliebte Nachtpfauenaugen sind also von allen Punkten herbeigekommen, ohne dass ich weiß, wodurch sie benachrichtigt wurden, um der am Morgen in meinem verborgenen Arbeitsgemach geborenen Heiratsfähigen ihre Huldigungen darzubringen“* (J.H. Fabre, Bilder aus der Insektenwelt, Stuttgart 1914). Heute wissen wir, dass das, was die männlichen Verehrer in großer Zahl zu dem Weibchen hinzog, ein Lockstoff war, den dieses bei Einbruch der Dämmerung aus einer Drüse am Hinterleib entlassen hatte. Erst gut fünfzig Jahre nach Fabre gelang es Adolf Butenandt und Mitarbeitern erstmals, den Sexuallockstoff eines Insektes zu identifizieren. Die Identifizierung des Bombykols, des Sexuallockstoffs des Seidenspinners *Bombyx mori*, stellt einen Meilenstein der Chemischen Ökologie dar, einer noch relativ jungen Forschungsrichtung, die sich mit den faszinierenden Interaktionen zwischen Organismen beschäftigt, an denen chemische Botenstoffe, so genannte Infochemikalien, beteiligt sind **[Kasten 1]**.

Die Chemische Ökologie ist ein interdisziplinär ausgerichtetes Forschungsfeld, auf dem Biologen und Chemiker verschiedener Teildisziplinen eng zusammenarbeiten **[1]**. Hat man es mit einem durch Infochemikalien vermittelten Phänomen zu tun und beobachtet beispielsweise, wie Insekten einer Art zielsicher auch nicht sichtbare Sexualpartner ausfindig machen, gilt es zunächst einmal, die hierfür verantwortlichen Substanzen zu isolieren. Dies kann z. B.

durch Extraktion der Insekten mit geeigneten Lösungsmitteln erfolgen. Bei ausreichend flüchtigen Verbindungen lassen sich diese auch anreichern, indem man die, das Insekt umgebende Luft über Adsorbentien leitet (Headspace-Techniken). Die festgehaltenen Duftstoffe werden dann mit Lösungsmittel oder durch Temperaturerhöhung wieder von dem Adsorbens heruntergelöst. In der Regel enthalten die so hergestellten Extrakte jedoch neben den bioaktiven Substanzen eine Vielzahl von Begleitstoffen, die abgetrennt werden müssen, bevor eine Identifizierung der Pheromone möglich ist. Dies erfolgt durch chromatographische Verfahren wie die Gaschromatographie (GC), mit der äußerst komplexe Stoffgemische von mehreren Hundert Substanzen in ihre Einzelbestandteile aufgetrennt werden können. Durch Kopplung der GC mit der Massenspektrometrie gelingen häufig Trennung und Identifizierung der Stoffe in einem Arbeitsgang.

Die instrumentelle Analytik hat seit Butenandt enorme Fortschritte gemacht. Mussten für die Identifizierung des Bombykols noch 500.000 Weibchen des Seidenspinners ihr Leben lassen, reicht heute vor allem dank der extrem empfindlichen Massenspektrometrie (Nachweisgrenze im Femtogrammbereich, das sind  $10^{-15}$  g!) nicht selten bereits die von einem einzigen Insekt produzierte Stoffmenge aus, um Pheromone zu identifizieren. Als besonders hilfreich hat sich hierbei auch die Kopplung der GC mit einem elektroantennographischen Detektor erwiesen, mit dem die elektrischen Signale gemessen werden können, die beim Auftreffen von Duftstoffmolekülen auf eine Insektenantenne entstehen. Auf diese





1 Teildisziplinen der Biologie und Chemie, die an der Bearbeitung chemisch-ökologischer Fragestellungen beteiligt sind

Weise können aus der Vielzahl von Komponenten in einem Duftstoffextrakt diejenigen eingegrenzt werden, die von dem Insekt überhaupt wahrgenommen werden können.

Die chemisch-ökologische Forschung hört jedoch nicht bei der Strukturaufklärung und Synthese von Pheromonen und anderen Infochemikalien auf. Chemische Ökologen interessieren sich nicht nur für die Identität der beteiligten Stoffe, sondern genauso für deren Wirkungen im natürlichen Kontext, die physiologischen Vorgänge bei deren Wahrnehmung oder die biochemischen Stoffwechselwege und Drüsen, die an deren Biosynthese beteiligt sind. Ein wichtiger Aspekt ist zudem die Frage, wie sich chemische Kommunikation im Laufe der Evolution verändert oder wie sie zur

Artbildung beitragen kann. Eine immer wichtiger werdende Rolle spielen dabei molekularbiologische Methoden, die es z. B. möglich machen, Gene, die an der chemischen Kommunikation von Organismen beteiligt sind, zu charakterisieren oder gezielt auszuschalten, um deren Funktion besser zu verstehen.

Es liegt auf der Hand, dass die Bearbeitung dieser grundlagenorientierten Fragestellungen nicht selten auch zu anwendbaren Produkten führt. Zum einen sind Insekten genauso wie Pflanzen eine schier unerschöpfliche Quelle neuer Naturstoffe mit möglicherweise interessanten pharmakologischen Wirkungen. Denken wir z. B. an die extremen Lebensräume (z. B. Kot oder Aas), an die manche Insekten angepasst sind, so wird klar, dass sie effektive an-

tibiotisch wirksame Substanzen benötigen, um dort zu überleben. Zum anderen konkurrieren Insekten mit uns Menschen oftmals um dieselben Ressourcen, was sie zu gefürchteten Schädlingen an Kulturpflanzen, Vorräten oder Bauholz macht. Zudem fungieren Insekten als Überträger zahlreicher Infektionskrankheiten. Da die chemischen Kommunikationssysteme von Insekten oft sehr spezifisch sind, kann man durch den Einsatz von synthetischen Lockstoffen sehr viel selektivere Wirkungen erzielen, als dies beispielsweise mit Insektiziden möglich ist. Für verschiedene schädliche Schmetterlingsarten wie den Apfelwickler hat sich z. B. die „Verwirrtechnik“ bewährt, bei der die Partnerfindung der Zielinsekten verhindert wird, indem das zu schützende Areal mit synthetischen Pheromonen praktisch „überflutet“ wird. In der Folge gelingt es den Männchen nicht mehr, zu den mit Pheromonen „rufenden“ Weibchen zu finden und diese zu begatten. Verschiedene tropische Käferarten werden dagegen erfolgreich durch Massenfang in Lockstofffallen bekämpft. Oftmals sind die durch den massenhaften Fang von Insekten erzielbaren Effekte nicht ausreichend oder es werden ausschließlich die für die Bekämpfung weniger interessanten männlichen Tiere gefangen. Doch selbst in solchen Fällen können Lockstoffe sinnvoll zur Ergänzung klassischer Pflanzenschutzmaßnahmen eingesetzt werden, indem sie z. B. eine Schädlingsprognose vor oder eine Erfolgskontrolle nach der Behandlung ermöglichen.

Im Folgenden möchte ich die Vielfalt und die Attraktivität der Chemischen Ökologie anhand zweier Beispiele aus der eigenen Forschung weiter verdeutlichen.

## Der Maikäfer: Liebe geht durch den Magen

Wer schon einmal in der Parfümerieabteilung eines Kaufhauses gestöbert hat, weiß, dass chemische Signale teuer sind. Genauso ist dies bei Insekten, die für die Biosynthese ihrer Pheromone oftmals aufwändige Stoffwechselwege aufrechterhalten müssen oder wertvolle Ressourcen als Ausgangsstoffe benötigen. Nicht selten kommt es daher vor, dass Insekten ihre Ressourcen sparsam verwenden, indem sie Stoffe als Pheromone verwenden, die gleichzeitig noch eine andere Funktion besitzen. Manchmal hat sich auch die kommunikative Funktion eines Stoffes erst sekundär

## 1 Infochemikalien

Als Infochemikalien oder Semiochemikalien (semeion = griechisch für Zeichen, Signal) werden Naturstoffe bezeichnet, die Informationen zwischen Organismen übertragen und für mindestens einen der beteiligten Organismen von Nutzen sind. Infochemikalien, die innerhalb einer Art wirken, heißen Pheromone. Pheromone werden gemäß ihrer Funktion z. B. in Sexualpheromone, Aggregationspheromone, Spurpheromone oder Alarmpheromone eingeteilt. Zwischenartlich wirksame Infochemikalien heißen Allelochemikalien. Diese werden weiter unterteilt, wobei betrachtet wird, wer von der Interaktion profitiert. Ist dies der Sender (z. B. bei Verteidigungstoffen von Insekten), spricht man von Allomonen. Profitiert der Empfänger, bezeichnet man die Stoffe als Kairomone (z. B. Pflanzenduftstoffe, die von pflanzenfressenden Insekten bei der Nahrungssuche genutzt werden). Stoffe, die sowohl dem Sender als auch dem Empfänger nützen, heißen Synomone (z. B. Blütenduftstoffe, die Bestäuber anlocken).



aus einer ursprünglicheren Rolle entwickelt. Eine besonders „sparsame“ Methode der Partnerfindung finden wir bei den Männchen der beiden einheimischen Maikäferarten *Melolontha hippocastani* (Waldmaikäfer) und *Melolontha melolontha* (Feldmaikäfer) [Kasten 2]. Sie lokalisieren Weibchen während eines bei Einsetzen der Dämmerung beginnenden Schwärmfluges, indem sie sich an Duftstoffen orientieren, welche durch den Fraß der Weibchen an den Blättern ihrer Wirtspflanzen abgegeben werden [2]. Diese so genannten *green leaf volatiles* (GLV) werden von grünen Pflanzen bei praktisch jeder Art von mechanischer Verletzung durch enzymatische Prozesse freigesetzt und sind z. B. für den typischen

dieser Information im Vergleich zu von Weibchen selbst produzierten Pheromonen deutlich geringer, da auch der Fraß anderer Insekten die gleichen attraktiven Duftstoffe freisetzen würde. Dieses Problem haben die Maikäfer durch Benzochinone gelöst, welche von den Weibchen abgegeben werden und die attraktive Wirkung der GLVs synergistisch verstärken. Die Benzochinone alleine sind hingegen kaum attraktiv. Interessanterweise handelt es sich bei diesen Verbindungen um bei Insekten weit verbreitete Abwehrstoffe, mit denen z. B. Bombardierkäfer Angreifer effektiv in die Flucht schlagen können. Zudem besitzen die Benzochinone der Maikäfer eine stark hemmende Wirkung auf Mikroorganismen, die die



**2** *Porträt eines Maikäfermännchens mit den aufgefächerten Lamellen der Antennen. Auf den Lamellen befinden sich zahlreiche Sensillen, die von olfaktorischen Rezeptorneuronen (ORN) innerviert werden, mit denen die Männchen äußerst empfindlich Pflanzenduftstoffe detektieren, die sie während ihres Schwärmfluges zur Auffindung fressender Weibchen nutzen.*

## 2 Maikäfer

Unter dem Namen Maikäfer fasst man Käfer der Gattung *Melolontha* zusammen, die zur Familie der Blatthornkäfer (Scarabaeidae) gehören. In Deutschland kommen im Wesentlichen zwei Arten vor, der Feldmaikäfer (*Melolontha melolontha*) und der Waldmaikäfer (*Melolontha hippocastani*). Die Tiere entwickeln sich binnen vier Jahren unterirdisch und schlüpfen dann Ende April bis Mai. Die Käfer leben nur ca. 4–6 Wochen und fressen die Blätter zahlreicher Laubbäume. Bei Einbruch der Dämmerung umschwärmen die Männchen zu Tausenden die Wirtsbäume auf der Suche nach Weibchen. Nach Paarung und Reifungsfraß gehen die Weibchen zurück in den Boden zur Eiablage. Die schlüpfenden Engerlinge fressen zunächst Graswurzeln und später auch die Wurzeln junger Bäume. Entgegen der weit verbreiteten Ansicht, Maikäfer seien vom Aussterben bedroht, gibt es in vielen Bundesländern wieder Massenvermehrungen von Maikäfern, die z. T. erhebliche Schäden in Forst und Obstbau verursachen. Besonders betroffen ist die Oberrheinische Tiefebene zwischen Darmstadt und Karlsruhe, wo seit Mitte der Achtziger Jahre auf einer Fläche von fast 10000 ha eine Massenvermehrung des Waldmaikäfers stattfindet.

Geruch frisch geschnittenen Grases verantwortlich. Untersuchungen zu den Struktur-Wirkungsbeziehungen von GLVs ergaben, dass sowohl deren funktionelle Gruppe als auch die Kettenlänge einen Einfluss auf das Verhalten der Maikäfermännchen haben. Zudem zeigte sich, dass die Tiere auch in Bezug auf Position und Konfiguration von Doppelbindungen im Molekül sehr gut an die in der Natur vorkommenden Verbindungen angepasst sind und nicht auf strukturverwandte Stoffe reagieren, die im natürlichen Duftstoffbouquet mechanisch verletzte Blätter nicht vorkommen.

Maikäfermännchen nutzen also Pflanzenduftstoffe zur Partnerfindung, deren Abgabe die Weibchen durch ihren Fraß ohnehin verursachen. Dies ist sicher eine äußerst sparsame Form der chemischen Kommunikation, jedoch ist die Verlässlichkeit

Käfer schädigen können und denen sie im Laufe ihrer Entwicklung im Boden häufig ausgesetzt sind. Somit scheint sich hier also die Rolle der Benzochinone bei der sexuellen Kommunikation aus einer ursprünglichen Funktion als Abwehrstoffe entwickelt zu haben.

Wie wir aus unseren Studien wissen, ist die Nutzung pflanzlicher Duftstoffe als Primärattraktanzien bei der Partnerfindung nicht auf die Maikäfer beschränkt. Männchen des verwandten Gartenlaubkäfers *Phyllopertha horticola* reagieren ebenfalls stark auf GLVs. Daneben werden beide Geschlechter von typischen Blütenduftstoffen aus der Gruppe der Terpenalkohole und Phenylpropanoide angelockt, mit Hilfe derer sie in speziellen Fällen in großer Zahl gefangen werden können. Da Gartenlaubkäfer bei Massenvermehrungen auf Grün-

flächen und im Obstbau mitunter erhebliche Schäden verursachen, lag es nahe, diese Forschungsergebnisse auch kommerziell zu nutzen. Eine mit einem von mir patentierten Pflanzenduftstoffgemisch beködete Gartenlaubkäferfalle ist seit einigen Jahren auf dem Markt.

## Die Erzwespe: Liebe geht durch den Darm

Als parasitische Wespen oder Parasitoide bezeichnet man eine Gruppe von Hautflüglern (Hymenoptera), die als natürliche Gegenspieler von Schadorganismen eine sehr wichtige Rolle für das Funktionieren terrestrischer Ökosysteme innehaben [Kasten 3]. Verglichen mit anderen Insektengruppen wie beispielsweise Schmetterlingen oder Käfern war bis vor kurzem nur sehr wenig über die Rolle von Pheromonen bei der sexuellen Kommunikation dieser Insekten bekannt. Ein Modellorganismus zur Erforschung der Biologie parasitischer Wespen ist seit über vierzig Jahren die nur etwa 2 mm große Erzwespe *Nasonia vitripennis*, die sich in den Puparien verschiedener Fliegenarten entwickelt und daher zur Bekämpfung lästiger Fliegenarten bei der Viehhaltung eingesetzt wird [3]. Unsere Verhaltensuntersuchungen im Labor ergaben, dass jungfräuliche Weibchen sehr stark von dem Duft der Männchen angezogen werden. Die attraktive Wirkung der Männchen geht von einem aus drei Komponenten bestehenden Sexualpheromon aus, welches





3 Dargestellt ist ein Pärchen der Erzwespe *Nasonia vitripennis* bei der Paarung. Das Weibchen hat mit dem Legebohrer zur Eiablage in ein Fliegenpuparium eingestochen.

diese in ihrem Enddarm synthetisieren und über die Analöffnung durch tupfende Bewegungen ihrer Hinterleibspitze abgeben [4–5]. Die attraktive Wirkung des Pheromons geht jedoch innerhalb weniger Minuten nach der Paarung verloren – ja, ver-

paarte Weibchen meiden den Duft der Männchen sogar, wenn dieser in höheren Konzentrationen vorkommt. Faszinierendweise ist es ein weiteres Pheromon des sich paarenden Männchens, welches die Reaktion der Weibchen auf das Sexualphe-

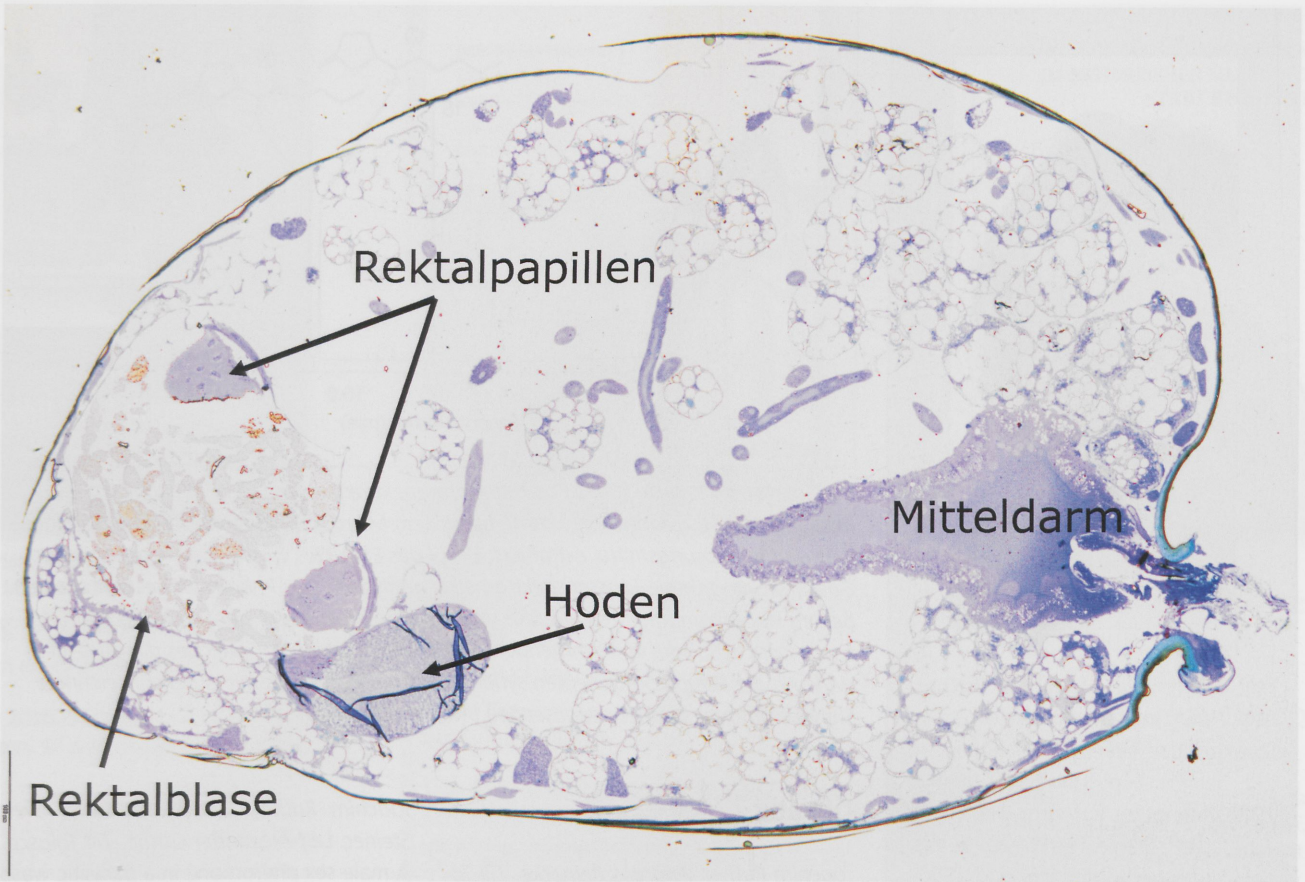
romon praktisch abschaltet. Das Männchen appliziert den – bisher noch nicht identifizierten – Stoff während der Balz aus einer oralen Drüse auf die Antennen des Weibchens, was bei diesem Paarungsbereitschaft auslöst und gleichzeitig dafür sorgt, dass es sich nicht mehr zu dem Duft anderer Männchen hingezogen fühlt. Stattdessen bevorzugen verpaarte Weibchen nun den Geruch von Fliegenkokons. Von dieser durch ihren Partner induzierten Verschiebung ihrer olfaktorischen Präferenz profitiert letztlich auch das Weibchen, da nach der Paarung nur noch die erfolgreiche Eiablage für den Fortpflanzungserfolg wichtig ist, bei der balzende Männchen nur stören würden.

Unsere Experimente zur Biosynthese des Pheromons machten es möglich, den Biosyntheseort des Sexualpheromons sehr genau zu lokalisieren. Expressionsanalysen des an der Biosynthese beteiligten Gens *NasviEH1* zeigten, dass das Pheromon in den Rektalpapillen produziert wird. Hierbei handelt es sich um paarige Drüsen, die auf dem blasenförmig erweiterten Enddarm der Männchen sitzen. Als Vorläufersubstanz der beiden Hauptkomponenten des Sexual-

### 3 Parasitische Wespen

Die Begriffe parasitische Wespen oder Parasitoide umschreiben eine äußerst vielfältige Gruppe von häufig sehr kleinen Hautflüglern (Hymenoptera), die sich in oder auf anderen Arthropoden (z. B. Insekten oder Spinnentiere) entwickeln und ihren Wirt im Laufe ihrer Entwicklung töten. Parasitische Wespen sind meist auf bestimmte Stadien spezialisiert, die ihre Wirte im Verlauf ihrer Entwicklung durchlaufen. Eiparasitoide befallen z. B. die Eier ihrer Wirte und sorgen so dafür, dass die oftmals besonders gefräßigen Larvalstadien pflanzenfressender Insektenarten gar nicht erst schlüpfen können. Somit spielen die oftmals unscheinbaren parasitischen Wespen eine enorm wichtige Rolle als natürliche Gegenspieler bei der Aufrechterhaltung ökologischer Gleichgewichte in terrestrischen Ökosystemen. In Massen gezüchtet und auf landwirtschaftlichen Flächen oder in Vorratslagern ausgebracht, werden parasitische Wespen daher auch zur biologischen Schädlingsbekämpfung eingesetzt. Eine detaillierte Kenntnis der Biologie parasitischer Wespen und insbesondere der Parameter, die ihren Fortpflanzungserfolg bestimmen, ist eine wichtige Voraussetzung, um den Erfolg dieser Nutzinsekten zu maximieren.





4 Querschnitt durch den Hinterleib eines männlichen Exemplars von *Nasonia vitripennis*. Das Sexualpheromon wird in den Rektalpapillen synthetisiert und in den blasenartig erweiterten Enddarm (Rektalblase) transportiert. Die Pheromonabgabe erfolgt über die Analöffnung (nicht zu sehen) durch tupfende Bewegungen der Hinterleibspitze.

pheromons fungiert Linolsäure. Diese mehrfach ungesättigte Fettsäure kann von Menschen wie auch den meisten Tieren nicht selbst produziert werden, so dass die Männchen gezwungen sind, mit ihrem Pheromon sparsam umzugehen. Hohe Pheromontiter deuten daher auf fitte, gut ernährte Männchen hin, so dass das Pheromon den Weibchen nicht nur die bloße Anwesenheit eines Männchens anzeigt, sondern auch dessen Qualität als Sexualpartner. Interessanterweise haben Männchen, die noch nicht geschlechtsreif sind, und solche, die auf Grund von vorangegangenen Paarungen nicht mehr genügend Spermien besitzen, auch nur sehr geringe Pheromonmengen zu bieten, so dass sie von Weibchen aufgrund ihres schwachen Duftsignals als Sexualpartner vermieden werden können.

Zu sehr interessanten Ergebnissen hat auch die Untersuchung der Schwesternarten von *N. vitripennis* geführt, die jeweils nur zwei der drei Pheromonkomponenten synthetisieren. Hier ist es im Laufe der Evolution zu einer Modifizierung der Pheromonchemie bei *N. vitripennis* gekommen,

die lediglich die räumliche Struktur der Duftstoffmoleküle betrifft und sich auf einige wenige Gene zurückführen lässt.

Doch nicht nur Duftstoffe der Männchen sind an der sexuellen Kommunikation der Erzwespen beteiligt. Die Oberfläche der Tiere ist von einer wasserabweisenden Schicht aus langkettigen Kohlenwasserstoffen überzogen, die primär als Verdunstungsschutz dient. Die Zusammensetzung dieser Kohlenwasserstoffgemische ist äußerst komplex und sowohl art- als auch geschlechtsspezifisch. Männchen können daher diese Stoffe bei Kontakt dafür nutzen, zu erkennen, dass es sich um ein Weibchen handelt und es sich lohnt, Zeit, Energie und wertvolle Pheromone zu investieren, um dieses zu umwerben und letztlich zur Paarung zu bewegen.

Die beschriebenen Pionierarbeiten an dem Modellorganismus *Nasonia vitripennis* haben die Tür für weiterführende Studien an der Universität Regensburg geöffnet, die unter Einbeziehung weiterer Arten zu einem umfassenden Verständnis der Pheromonkommunikation parasitischer Wespen führen werden.

## Zusammenfassung

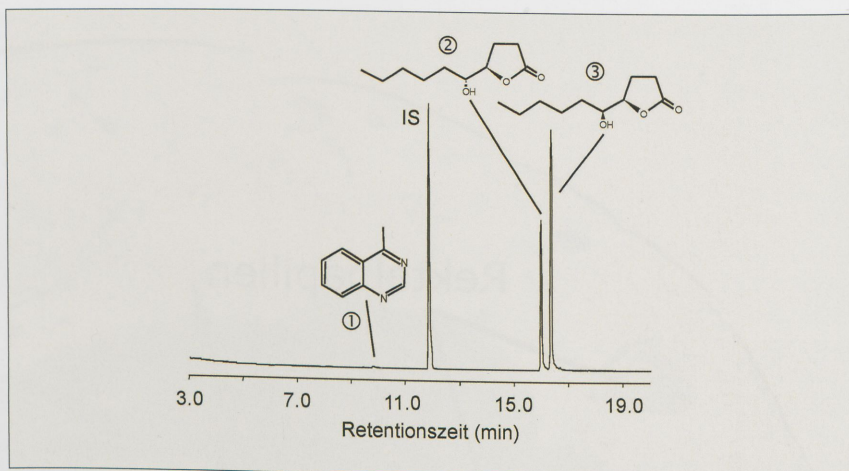
Chemische Reize und Signale spielen eine zentrale Rolle beim Informationsaustausch zwischen Organismen. Sie ermöglichen es z. B. Insekten die geeigneten Sexualpartner, Nahrungsquellen und Eiablageplätze zu finden oder Feinden und suboptimalen Lebensbedingungen zu entgehen. Die Chemische Ökologie beschäftigt sich mit den an diesen Interaktionen beteiligten Naturstoffen und deren Wirkungen sowie den Mechanismen, die an Biosynthese und Perzeption dieser Stoffe beteiligt sind. Das bessere Verständnis der diesen chemisch vermittelten Interaktionen zugrunde liegenden Prozesse kann zur Entwicklung umweltschonender Bekämpfungsstrategien im Pflanzen- und Vorratsschutz beitragen. An den vorgestellten Beispielen ist deutlich geworden, dass es sich bei der Chemischen Ökologie um ein äußerst vielfältiges und für Studierende attraktives Forschungsgebiet handelt, das hervorragend geeignet ist, Brücken zwischen verschiedenen biologischen und chemischen Teildisziplinen an der Universität Regensburg zu schlagen.





Prof. Dr. rer. nat. **Joachim Ruthner**, geb. 1961 in Kaltenkirchen/Holstein. Studium der Lebensmittelchemie an der Technischen Universität Berlin, 1993 Promotion auf dem Gebiet der Aromastoffchemie. 1995–2000 wissenschaftlicher Mitarbeiter und 2000–2006 wissenschaftlicher Assistent am Institut für Biologie der Freien Universität Berlin. 2003 Habilitation im Fach Ökologie und 2003–2009 Privatdozent an der Freien Universität Berlin. 2006–2009 Heisenberg-Stipendium der Deutschen Forschungsgemeinschaft. 2008 Ruf auf eine Professur für Chemische Ökologie an die Schwedische Agrarwissenschaftliche Universität (SLU) in Alnarp (abgelehnt), seit 2009 Professor für Chemische Ökologie an der Universität Regensburg.

**Forschungsschwerpunkte:** Chemische Ökologie der Insekten.



**5** Gaschromatogramm des Pheromondrüsenextraktes von *Nasonia vitripennis*. Die Rektalblase eines Männchens wurde unter dem Mikroskop aus dem Hinterleib präpariert und mit Lösungsmittel extrahiert. Ein  $\mu\text{l}$  des Extraktes wurde mittels gekoppelter Gaschromatographie-Massenspektrometrie analysiert. Das Pheromon besteht aus den beiden Hauptkomponenten (4R,5R)- und (4R,5S)-5-Hydroxy-4-decanol (① und ②) sowie dem in Spuren vorkommenden 4-Methylchinazolin (③), welches die attraktive Wirkung der Hauptkomponenten synergistisch verstärkt. Das mit IS gekennzeichnete Signal stammt von einem zugesetzten internen Standard.

## Literatur

Joachim Ruthner, Andreas Reinecke, Till Tolasch, Monika Hilker, Make love not war: A common arthropod defence compound as sex pheromone in the forest cockchafer *Melolontha hippocastani*. *Oecologia* 128 (2001), S. 44–47.

Andreas Reinecke, Joachim Ruthner, Monika Hilker, The scent of food and defence: Green leaf volatiles and toluquinone as sex attractant mediate mate finding in the European cockchafer, *Melolontha melolontha*. *Ecology Letters* 5 (2002) 257–263.

Joachim Ruthner, Male-biased response of garden chafer, *Phyllopertha horticola*, to leaf alcohol and attraction of both sexes to floral plant volatiles. *Chemoecology* 14 (2004) 187–192.

Joachim Ruthner, Lina-Marie Stahl, Sven Steiner, Leif-Alexander Garbe, Till Tolasch, A male sex pheromone in a parasitic wasp and control of the behavioral response by the female's mating status. *Journal of Experimental Biology* 210 (2007), S. 2163–2169.

Mohammed Abdel-latif, Leif-Alexander Garbe, Markus Koch, Joachim Ruthner, An epoxide hydrolase involved in the biosynthesis of an insect sex attractant and its use to localize the production site. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 105 (2008), S. 8914–8919.

Joachim Ruthner, Michael Matschke, Leif-Alexander Garbe, Sven Steiner, Quantity matters: male sex pheromone signals mate quality in the parasitic wasp *Nasonia vitripennis*. *Proceedings of the Royal Society B* 276 (2009), S. 3303–3310.





„Sie haben einen kunstsinnigen König“  
Ludwig I. und Regensburg  
Städtische Bibliothek Regensburg · Universitätsverlag Regensburg

Auflage 2010, 156 Seiten, 77 Farb-, 14 s/w-  
Abbildungen, 17 x 24 cm, Broschur, klebe-  
gebunden

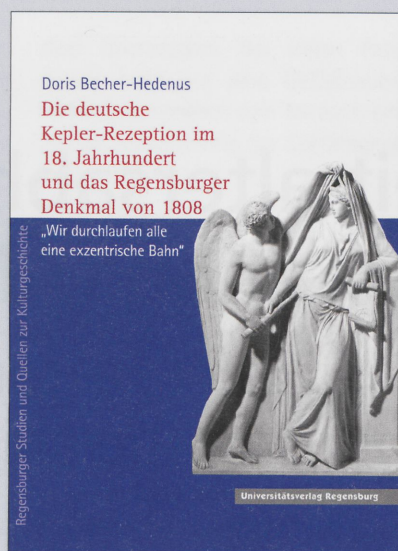
ISBN 978-3-86845-050-7  
€ 12,90 [D] / SFr 20,50



Sprache und Recht in großen  
europäischen Sprachen  
Universitätsverlag Regensburg

Auflage 2010, 276 Seiten, 1 s/w-Abbildung,  
17 x 24 cm, Broschur, klebegebunden

ISBN 978-3-86845-038-5  
€ 24,90 [D] / SFr 37,90



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. Auflage 2010, 368 Seiten, 22 Farb-, 10 s/w-  
Abbildungen, 17 x 24 cm, E-fal mit Schutz-  
umschlag, fadengeheftet

ISBN 978-3-86845-061-3  
€ 39,90 [D] / SFr 56,90



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

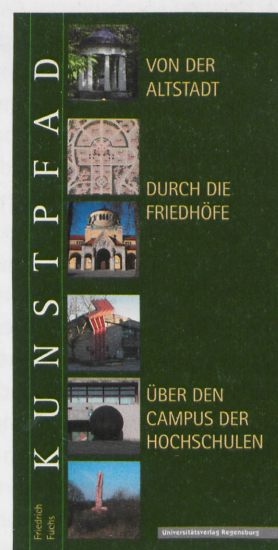
ISBN 978-3-86845-030-9  
€ 16,90 [D] / SFr 25,90



Michael Wackerbauer  
Die Musikinstrumente im  
Historischen Museum der  
Stadt Regensburg  
Reihe: Regensburger Studien und Quellen  
zur Kulturgeschichte, Bd. 18

1. Auflage 2009, 304 Seiten, 341 Farb-,  
31 s/w-Abbildungen, 17 x 24 cm, E-fal mit  
Schutzumschlag, fadengeheftet

ISBN 978-3-86845-029-3  
€ 49,90 [D] / SFr 70,90



Friedrich Fuchs  
Kunstpfad  
Von der Altstadt durch die Friedhöfe  
über den Campus der Hochschulen

1. Auflage 2010, 48 Seiten, 30 Farb-  
abbildungen, 3 Planausschnitte,  
10 x 21 cm, geheftet

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



# Volkskrankheit altersabhängige Makuladegeneration (AMD)

## Die Erforschung genetischer Faktoren als Voraussetzung für gezielte Therapiekonzepte

Ulrike Friedrich, Lars G. Fritsche, Bernhard H.F. Weber

Mit zunehmender Lebenserwartung treten in den Industriegesellschaften vermehrt solche Krankheiten in das Zentrum des Interesses, die sich in der Regel erst in höherem Alter ausprägen. Zu dieser Gruppe von Erkrankungen gehört auch die altersabhängige Makuladegeneration (AMD), die häufig zu einem dramatischen Abfall der zentralen Sehschärfe führt und somit eine eigenständige Lebensführung in vielen Fällen unmöglich macht. Unser Verständnis der Ursachen und Mechanismen der AMD sind bisher noch rudimentär, man geht jedoch davon aus, dass ein komplexes Zusammenwirken von umweltbedingten und genetischen Faktoren der Pathogenese dieser häufigen Erkrankung zugrunde liegt. Intensive Forschungsanstrengungen haben in den letzten Jahren wichtige neue Einblicke in die Genetik der AMD ermöglicht. Dies wiederum lässt hoffen, dass in näherer Zukunft neben neuartigen Präventionsmöglichkeiten auch Therapieformen verfügbar sein werden, die gezielt in die Entstehungsmechanismen der AMD eingreifen können.

Blindheit ist die Unfähigkeit zu sehen. Eine betroffene Person ist eines ihrer wichtigsten Sinne beraubt und läuft Gefahr, ihre Autonomie und einen hohen Anteil an Lebensqualität zu verlieren. Hauptursachen für Blindheit sind in den Industrienationen neben der altersabhängigen Makuladegeneration (AMD) der grüne Star (Glaukoma) sowie die diabetische Retinopathie. Weniger häufig, aber wegen ihres frühen Auftretens in der Kindheit oder im Jugendalter von besonderer Tragweite, sind erbliche Erblindungen, die nach den Mendelschen

Regeln der Vererbung von Generation zu Generation weitergegeben werden können. Die altersabhängigen Formen der Blindheit sind häufiger und nehmen seit Jahren weltweit dramatisch zu, wesentlich bedingt durch den sich vollziehenden demographischen Wandel der Altersstrukturen nicht nur in Industrie-, sondern auch in Schwellenländern. Damit einher gehen sozioökonomische Folgen von bisher unvorstellbarem Ausmaß. Geeignete Präventionsmöglichkeiten und erfolgreiche Therapieangebote rücken damit für die altersbezogenen Volkskrankheiten ins Zentrum des weltweiten Interesses.

Blindheit entspricht nach der in Deutschland geltenden Definition einer Sehschärfe mit einem Wert von maximal 0,02 (d.h. 1/50 der normalen Sehschärfe). Als Sehbehinderung bezeichnet man ein Sehvermögen von 0,3 oder schlechter. Sehbehinderte Menschen können beispielsweise kein Kraftfahrzeug führen und ohne Zuhilfenahme von vergrößernden Sehhilfen nicht lesen. Angaben zu absoluten Zahlen von blinden und sehbehinderten Menschen beruhen in der Regel auf Schätzungen und Hochrechnungen. Demnach liegt die Anzahl blinder Menschen in Deutschland derzeit bei rund 150.000, während die Angaben für die Zahl sehbehinderter Menschen zwischen 500.000 und 1,1 Millionen schwanken.

Eine intakte Netzhaut an der hinteren Innenseite des Auges ist die Voraussetzung für eine uneingeschränkte Sehleistung. Die Netzhaut besteht aus sehr vielen spezialisierten Zelltypen, die optische Reize mit Hilfe lichtempfindlicher Zellen wahrnehmen und in elektrische Impulse umsetzen [1]. Jede Störung innerhalb dieses emp-

findlichen Gefüges von Reizaufnahme, -verarbeitung und -weiterleitung kann zu einer folgeschweren Beeinträchtigung der optischen Wahrnehmung bis hin zu einer völligen Erblindung führen. Nach neuesten Schätzungen der Weltgesundheitsorganisation WHO ist die AMD die häufigste Netzhauterkrankung und damit die häufigste Ursache für eine Beeinträchtigung der Sehschärfe. Weltweit sind etwa 25 % der über 75-jährigen von unterschiedlichen Stadien dieser Erkrankung betroffen, wobei circa 5 % dieser Altersgruppe an den Folgen von Spätformen und damit an zum Teil hochgradiger Sehbehinderung leiden. Allein in Deutschland sind derzeit 16,8 Millionen Bürger älter als 65 Jahre; davon sind schätzungsweise etwa 900.000 Menschen von einer AMD-Erkrankung betroffen.

### Die altersabhängige Makuladegeneration und Möglichkeiten ihrer Behandlung

Der Krankheitsverlauf einer AMD beginnt meist im sechsten Lebensjahrzehnt mit einer Störung im zentralen Bereich der Netzhaut, dem Ort des schärfsten Sehens beim Menschen. Der fortschreitende Zusammenbruch der zentralen Sehleistung wird vom Betroffenen anfangs häufig als eine Verzerrung, später dann als kompletter Ausfall von Sehfeldbereichen wahrgenommen [2]. Mit den frühen Stadien gehen häufig gelblich-weiße Ablagerungen („Drusen“) in und unter der Pigmentepithelschicht der Netzhaut einher, einer Zellschicht, die eine elementare Rolle bei der



Ernährung und Instandhaltung der Netzhaut spielt. Solche Ablagerungen sind durch den Augenarzt bei einer Untersuchung des Augenhintergrundes leicht zu erkennen und können so der AMD-Früherkennung dienen. Im fortgeschrittenen Stadium unterscheidet man zwischen der sogenannten feuchten und der trockenen AMD, wobei beide Spätformen mit einem fortschreitenden Sehverlust verbunden sein können [3]. Die trockene AMD, auch geographische Atrophie genannt, ist durch das kontinuierliche und irreversible Absterben der Pigmentepithelzellen und der eng mit diesen verbundenen lichtempfindlichen Sehzellen gekennzeichnet. Dies führt in der Regel zu einem langsamen Verlust der zentralen Sehschärfe. Im Gegensatz zur trockenen Form ist die feuchte AMD, auch choroidale Neovaskularisation genannt, ein Prozess, der schneller und oft aggressiver verläuft. Bei der feuchten AMD bilden sich krankhaft veränderte Blutgefäße unterhalb der zentralen Netzhaut. Aus diesen Gefäßen können plötzlich Blut oder Flüssigkeit in das umliegende Netzhautgewebe austreten, was häufig zu einer verzerrten Wahrnehmung von Linien und Gegenständen führt. Da das äußere Gesichtsfeld zunächst nicht betroffen ist, bleibt die Orientierungsfähigkeit des Patienten für einige Zeit erhalten, jedoch ist die Erkennung von Farben und Kontrasten deutlich abgeschwächt [2].

Die trockene Form findet sich bei etwa 80–90 % aller AMD-Patienten, hierfür gibt es allerdings bislang keinen erfolgreichen Behandlungsansatz. Die feuchte AMD macht dagegen zwar nur einen Anteil von etwa 10 % der gesamten AMD-Fälle aus, ist jedoch Ursache von über 90 % aller AMD-bedingten Erblindungen. Nach Angaben des Verbandes der deutschen Augenärzte treten hierzulande derzeit etwa 5.000 neue Fälle pro Jahr mit feuchter AMD auf. Für deren Behandlung werden gegenwärtig zwei Medikamente eingesetzt, die das unkontrollierte Gefäßwachstum im Augenhintergrund verhindern sollen. Der Wirkstoff Pegaptanib (Macugen) führt bei durchschnittlich 15 % der behandelten Patienten zu einem leicht verbesserten Krankheitsverlauf. Es wird ein bis zwei Jahre lang alle sechs Wochen als einmalige Injektion in das Auge verabreicht. Eine Besserung des Sehvermögens wurde jedoch selten beobachtet. Der Wirkstoff Ranibizumab (Lucentis) ist erst seit Kurzem auf dem deutschen Markt zugelassen und konnte in einer Reihe von klinischen Stu-

dien überzeugen. Bei vielen Patienten wurde nicht nur eine Gefäßneubildung verhindert, sondern zum Teil auch eine objektive Verbesserung der Sehfähigkeit herbeigeführt.

## Ursachen der Erkrankung

Die zellulären Mechanismen der AMD-Erkrankung sind bislang wenig verstanden. Eine wichtige Rolle im Krankheitsverlauf scheint die Tatsache zu spielen, dass mit zunehmendem Alter Regenerationsfunktionen der Netzhaut weniger effizient ablaufen, etwa bei der Entsorgung von Stoffwechsel-Abbauprodukten über Netzhaut und retinales Pigmentepithel. So kann es zu den bereits erwähnten Ablagerungen von Drusen im Bereich der zentralen Netzhaut kommen. Auch den mit dem Alter zunehmenden Schädigungen durch ein vermehrtes Auftreten von reaktiven Sauerstoffverbindungen wird ein wichtiger Einfluss auf die Krankheitsentwicklung zugeschrieben. Darüber hinaus scheint eine

Unter „**Komplexen Erkrankungen**“ versteht man Erkrankungen, deren Ausbildung durch ein Wechselspiel genetischer und nicht-genetischer Faktoren verursacht wird. Dabei sind die genaue Zahl der beteiligten Faktoren sowie die Art der Wechselwirkungen untereinander meist unbekannt, wodurch die Vorsorge oder Behandlung erschwert wird.

Fehlreaktion des körpereigenen Immunsystems bei der AMD eine wichtige Rolle zu spielen. Es ist zu vermuten, dass nicht ein einzelner Faktor allein, sondern das Zusammenspiel von verschiedenen Einflüssen die Entstehung einer AMD verursacht. Dies kennzeichnet die AMD als eine „komplexe“ Erkrankung, ähnlich wie Morbus Alzheimer oder Diabetes mellitus. So wird die AMD ganz wesentlich durch das Alter, aber auch durch den individuellen genetischen Hintergrund, durch Umweltfaktoren wie Rauchen, UV-Strahlung oder auch die Ernährung beeinflusst.

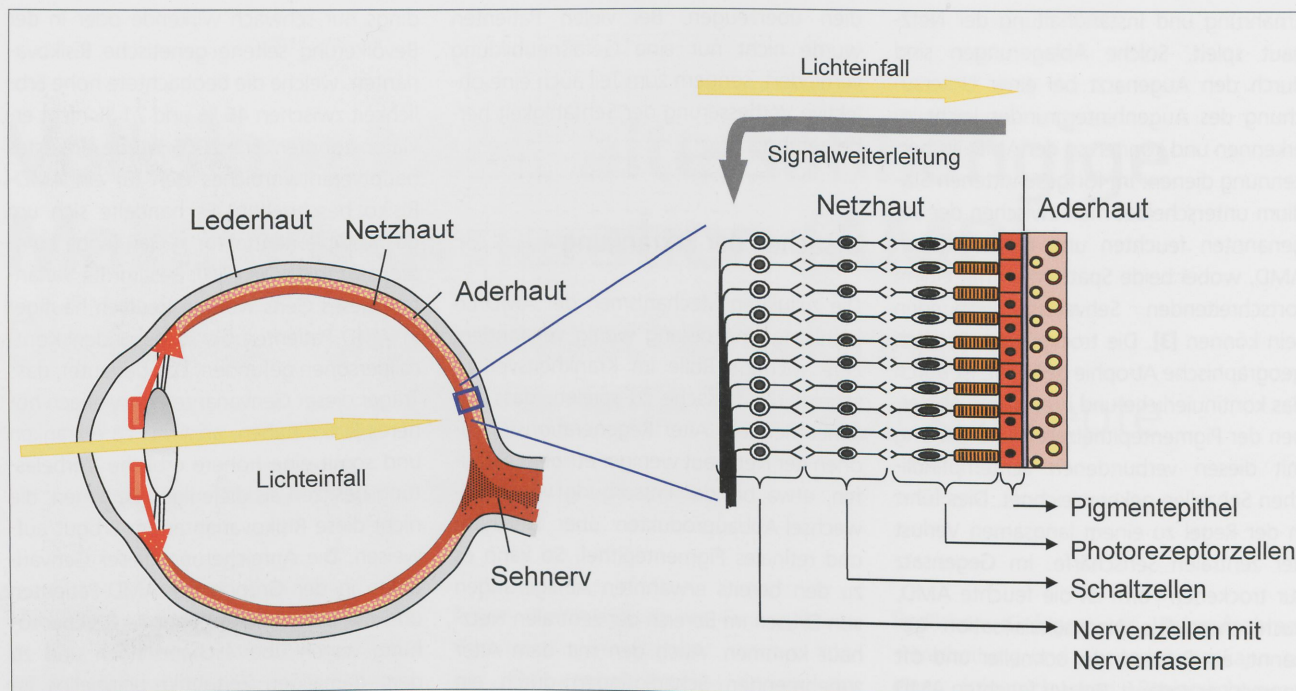
Erste Studien zur Aufklärung der der AMD zugrunde liegenden genetischen Faktoren datieren auf die späten 1990er Jahre. Diese frühen Arbeiten fanden aller-

dings nur schwach wirkende oder in der Bevölkerung seltene genetische Risikovarianten, welche die beobachtete hohe Erblichkeit zwischen 46 % und 71 % nicht erklären konnten. Erst 2005 wurde ein erstes hauptverantwortliches Gen für ein AMD-Risiko beschrieben. Es handelte sich um das Komplementfaktor H-Gen (engl. *complement factor H*, CFH). Bestimmte Varianten dieses Gens wurden deutlich häufiger in AMD-Patienten als in gesunden Kontrollpersonen gefunden. Das bedeutet, dass Träger dieser Genvarianten ein vielfach höheres Risiko haben, an AMD zu erkranken und somit eine höhere erbliche Vorbelastung besitzen als diejenigen Personen, die nicht diese Risikovarianten im Erbgut aufweisen. Die Anreicherung dieser Genvarianten in der Gruppe der AMD-Patienten und die damit einhergehende Risikoerhöhung waren überraschend hoch und zu dem damaligen Zeitpunkt beispiellos im Bereich der komplexen Erkrankungen. Darüber hinaus wurde der Komplementfaktor H direkt einem biologischen Prozess zugeordnet, dem schon 20 Jahre zuvor eine Rolle in der AMD-Pathologie zugeschrieben wurde – einer chronisch-entzündlichen Komponente im Erkrankungsverlauf. Seitdem konnte eine Reihe von weiteren Genen und Genvarianten mit der AMD assoziiert werden, wodurch unser Verständnis der Ätiologie dieser verheerenden Erkrankung weiter vertieft wurde.

## Genetische Risikofaktoren

Was versteht man nun eigentlich unter einer erblichen Vorbelastung für eine häufige Erkrankung? Insgesamt besteht das menschliche Erbgut (d.h. die Gesamtheit unseres Erbmaterials einer Zelle) aus etwa 3 Milliarden Bausteinen, wobei prinzipiell an jedem dieser Bausteine Variationen auftreten können. Regelmäßig finden sich solche Veränderungen jedoch lediglich an etwa 17 Millionen dieser Bausteine unseres Erbgutes. In der großen Mehrzahl haben diese Varianten keine messbare Konsequenz auf unseren Organismus. Manche können aber direkt auf bestimmte Gene wirken, die wiederum als Matrize für Eiweiße dienen, welche wichtige Zellbestandteile wie Enzyme oder Strukturproteine ausmachen. Variationen unseres Erbgutes, die potentiell krankheitsverursachend sein können, deren Wirkungsmechanismen allerdings noch nicht verstanden sind, werden als genetische Risikofaktoren bezeichnet.





1 Schematische Übersicht zum Aufbau des Auges. Der Detailausschnitt zeigt eine stark vereinfachte Darstellung der verschiedenen Netzhautschichten, die wesentlich für die Aufnahme und die Weiterverarbeitung des einfallenden Lichtes verantwortlich sind.

## Erste Erkenntnisse der AMD-Forschung

Die Erforschung von genetischen Varianten des Erbgutes und ihr Einfluss auf das Krankheitsbild der AMD ist einer der Forschungsschwerpunkte am Institut für Humangenetik der Universität Regensburg. Seit den späten 1990er Jahren arbeiten weltweit Forscher an der Klärung der genetischen Risikofaktoren der AMD. Erste Studien beschäftigten sich mit Genen, die zuvor schon mit symptomatisch ähnlichen Krankheitsbildern in Verbindung gebracht wurden. Nur bei zweien dieser Gene wurden dabei vielversprechende Ergebnisse erzielt. Beide Gene zeigen zwar nur geringe Beiträge zur AMD, dienen jedoch als gute Beispiele für die Schwierigkeiten, die bei der Analyse von genetischen Risikofaktoren komplexer Erkrankungen auftreten können. Dazu zählt das *ABCA4* (ATP-binding cassette, sub-family A (ABC1), member 4) Gen, das als Ursache einer relativ häufigen Form von erblicher Netzhaut-Degenerationen in jungem Alter (Morbus Stargardt) gilt. Im Jahr 1997 publizierte der Genetiker Rando Allikmets, dass bestimmte Sequenzveränderungen im *ABCA4*-Gen häufiger bei AMD-Patienten als bei Kontrollpersonen vorkommen. Darauf folgende Studien mit unabhängigen Patienten- und Kontrollgruppen, wie sie unter anderem auch an

unserem Institut durchgeführt wurden, konnten diese Ergebnisse jedoch nicht bestätigen.

Auch das *APOE* (Apolipoprotein E)-Gen, dem eine Rolle bei der Entstehung von Alzheimer zugeschrieben wird, wurde auf seine Rolle bei der AMD-Entwicklung untersucht. Bestimmte Symptome von Alzheimer, wie Ablagerungen im zentralen Nervensystem, aber auch das altersbedingte Auftreten der Erkrankung sowie die funktionelle Rolle von *APOE* machen dieses Gen zu einem interessanten Kandidaten für die AMD. Verschiedene Studien deuteten an, dass eine bestimmte Variante des *APOE*-Gens das AMD-Risiko erhöhen könnte. Studien unseres Instituts zusammen mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen bestätigten dies und zeigten weiterhin, dass eine weitere *APOE*-Variante sogar ein vermindertes AMD-Risiko besitzt. Jedoch konnten auch diese Befunde nicht in jeder Studie gezeigt werden, was vermutlich, wie im Falle des *ABCA4*-Gens, auf eine unzureichende statistische Aussagekraft der meisten Studien zurückzuführen ist. Die aktuellen Entwicklungen im Bereich der Hochdurchsatz-Sequenzieretechnologie werden es ermöglichen, große Fallzahlen an Patienten und Kontrollpersonen in die genetische Analyse einzubringen. Damit sollte es mittelfristig möglich sein, die Beiträge von *ABCA4* und *APOE* zur AMD-Pathogenese zu klären.

## Der Komplementfaktor H – Das erste hauptverantwortliche AMD-Gen

Im Jahr 2005 wurden zeitgleich vier Studien veröffentlicht, die unabhängig das *CFH*-Gen auf dem Chromosom 1 als erstes hauptverantwortliches AMD-Gen beschrieben. Bemerkenswert war hierbei die Arbeit der Gruppe um den New Yorker Ophthalmologen Robert Klein, die zum ersten Mal mit einem ungerichteten, genomweiten Ansatz erfolgreich Risikovarianten bei einer komplexen Erkrankung aufspüren konnte. Die beobachteten Effekte und Häufigkeiten der Risikovarianten im *CFH*-Genort übertrafen dabei die Erwartungen der meisten Experten auf diesem Gebiet (**Tabelle 1**). Diese Arbeit läutete eine neue Ära genetischer Untersuchungen bei komplexen Erkrankungen ein.

Der bekannteste risikoe erhöhende Effekt des *CFH*-Genorts wird einer *CFH*-Variante zugeschrieben, die in der kaukasischen Bevölkerung eine Häufigkeit von 31 % bis 40 % besitzt, die jedoch in AMD-Patientengruppen mit einer Frequenz von 54 % bis 63 % deutlich angereichert ist. Neben dieser Risikovariante existieren auch zwei häufig auftretende vor AMD schützende Varianten, die bei den betroffenen Personen ein verringertes AMD-Risiko bewirken. Festzustellen bleibt, dass alle be-



kannten *CFH*-Varianten zu einem veränderten AMD-Risiko führen, jedoch unabhängig von den beiden AMD-Spätstadien, der feuchten und der trockenen AMD. Vergleicht man kaukasische mit asiatischen Bevölkerungen, werden Unterschiede bei den Häufigkeiten der verschiedenen Genvarianten deutlich. Insbesondere findet sich die risikoe erhöhende *CFH*-Variante im asiatischen Raum deutlich seltener, weshalb sie in dieser ethnischen Gruppe nur eine untergeordnete Rolle für ein AMD-Risiko zu spielen scheint.

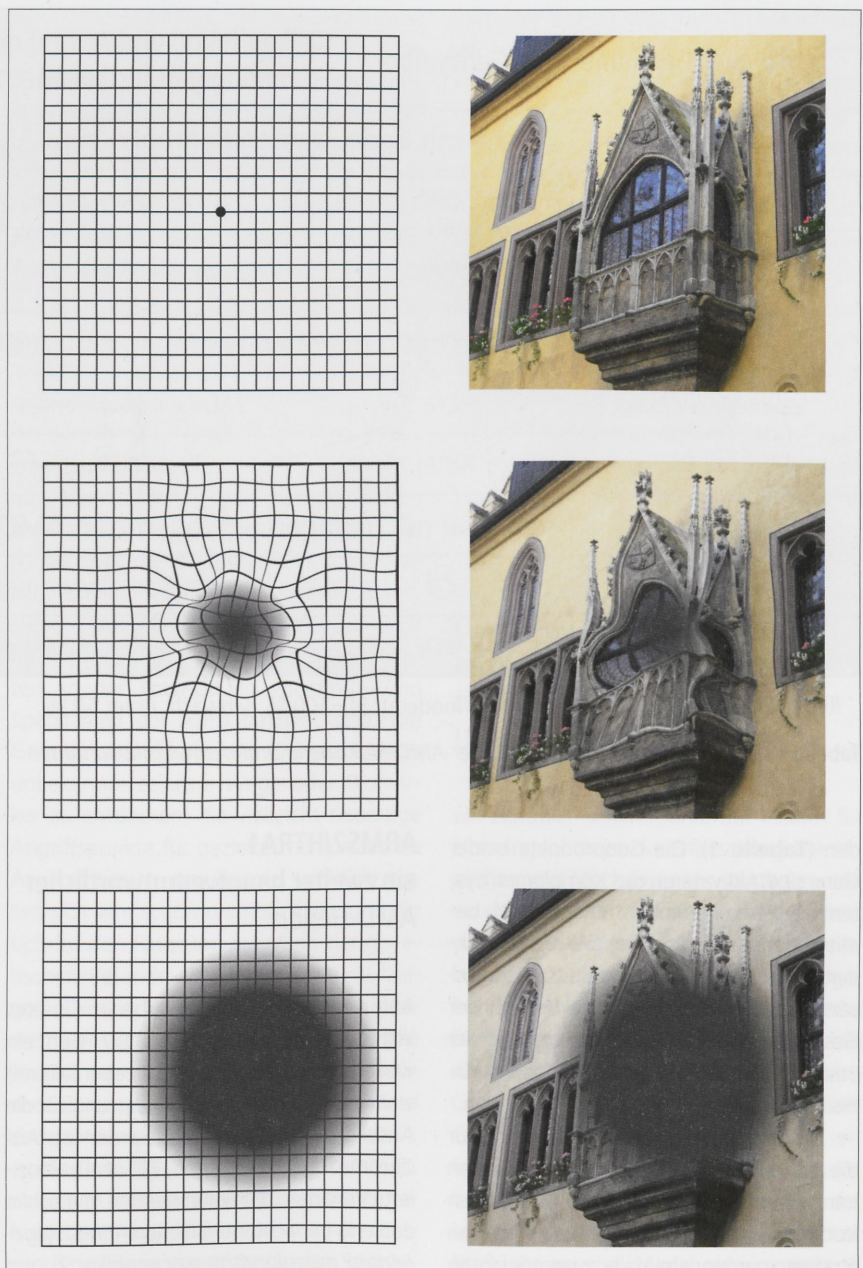
### Funktionelle Auswirkungen

Die Entdeckung eines Zusammenhangs von *CFH* mit der AMD war ein entscheidender Durchbruch für ein tieferes Verständnis der AMD-Pathogenese. Nachfolgende Studien zur funktionellen Auswirkung der *CFH*-Risikovarianten erlaubten einen ersten direkten Einblick in die molekularen Mechanismen der AMD-Entstehung. Frühere Beobachtungen einer verstärkten Aktivierung des Immunsystems in AMD-erkrankten Augen ließen bereits darauf schließen, dass entzündlichen Reaktionen, verursacht durch eine übermäßige Aktivierung des Immunsystems, eine wichtige Rolle in der Entstehung einer AMD zukommt.

Das Komplementsystem ist ein Bereich der Immunantwort, mit dem die Zellen auf potentielle Krankheitserreger reagieren. Es ist ein kaskadenartig ablaufender Abwehrmechanismus, der nach Erkennung von körperfremden Zellen einen Angriffskomplex ausbildet, welcher zur Zerstörung der fremden Zellen führt. An der Erkennung von Fremdorganismen, Signalweiterleitung und Ausbildung des Angriffskomplexes sind mehr als 30 verschiedene Eiweiße beteiligt. Um Schädigungen körpereigener Zellen durch fehlgeleitete Angriffe oder übermäßige Komplementaktivierung zu verhindern, dienen verschiedene Eiweiße als negative Regulatoren und hemmen die in Gang gesetzte Komplementkaskade.

Das Komplementsystem dient also in erster Linie dem Schutz vor krankheitserregenden Mikroorganismen wie Bakterien oder Pilzen. Bei vielen Autoimmunerkrankungen wie systemischem Lupus erythematoses oder rheumatoider Arthritis greifen Komponenten des Komplementsystems jedoch auch körpereigene Zellen und Gewebe an.

Genauere Untersuchungen unseres Instituts zum Einfluss der gefundenen *CFH*-Risikovariante zeigten nun, dass diese die Fähigkeit des Komplementfaktors H einschränkt, das Komplementsystem zu in-



2 Simulation der visuellen Wahrnehmung bei fortschreitender AMD. Oben: normales Gesichtsfeld; Mitte: mittleres Krankheitsstadium; unten: fortgeschrittene AMD. Das Amsler Gitter ist ein häufig angewandter Funktionstest zur Überprüfung der zentralen Gesichtsfeldareale.

hibieren. Im Gegensatz hierzu führen die vor AMD schützenden *CFH*-Varianten zu einer verstärkten Aktivität des Komplementfaktors H und somit zu einer verstärkten Hemmung des Komplementsystems. Aufgrund dieser Erkenntnisse wird heute der krankheitsassoziierte Prozess der verstärkten Immunantwort nicht nur als eine Folge, sondern auch als eine mögliche Ursache der AMD-Erkrankung angesehen, wobei dieser Prozess offensichtlich durch den individuellen genetischen Hintergrund beeinflusst wird. Solche initialen Befunde waren richtungsweisend für die weitere gezielte Suche

nach genetischen Risikofaktoren des Immunsystems und insbesondere des Komplementsystems.

### Weitere AMD-assoziierte Gene der Komplementkaskade

Durch zielgerichtete Untersuchungen weiterer Komponenten der Komplementkaskade konnten AMD-assoziierte Varianten auch im Komplementfaktor B (engl. *complement factor B*, *CFB*)-Gen und in dem in direkter Nachbarschaft gelegenen Gen für die Komplementkomponente 2 (engl. *complement component 2*, *C2*) entdeckt wer-



Offizieller Genname	Gensymbol	Risikoeffekte* und Anzahl der unabhängigen Risikovarianten	Häufigkeit in kaukasischen Bevölkerungen
Gene mit bedeutenden Beiträgen zum AMD-Risiko			
<i>Complement factor H</i>	<i>CFH</i>	3 starke Risikovarianten	23–45 %
<i>Age-related maculopathy susceptibility 2</i>	<i>ARMS2</i>	1 starke Risikovariante	19–24 %
Gene mit moderaten Beiträgen zum AMD-Risiko			
<i>Complement factor B</i>	<i>CFB</i>	2 starke Risikovarianten	5–11 %
<i>Complement Component 3</i>	<i>C3</i>	1 moderate Risikovariante	20–22 %
Gene mit geringen Beiträgen zum AMD-Risiko			
<i>Complement Factor I</i>	<i>CFI</i>	1 schwache Risikovariante	45 %
<i>Apolipoprotein E</i>	<i>APOE</i>	2 schwache Risikovarianten	6–18 %

\* Risikoveränderung: Stark: über 100 %; moderat: 50–100 %; schwach: unter 50 %

**Tabelle 1** Übersicht mehrfach bestätigter AMD-Risikogene und deren Risikovarianten

den (**Tabelle 1**). Die Genprodukte beider Gene sind Aktivatoren des Komplementsystems. Erste funktionelle Studien zeigten bereits, dass die Varianten im *CFB*-Gen die Aktivität des Komplementfaktors B beeinflussen. Da diese Varianten nur bei 5–11 % der Gesamtbevölkerung zu finden sind, ist der Beitrag dieses Gens zum allgemeinen AMD-Risiko allerdings eher gering.

Aufgrund seiner zentralen Funktion für die Aktivierung der komplementgesteuerten Immunabwehr wurde auch das Gen für den Komplementfaktor C3 untersucht. In diesen Studien wurden ebenfalls zwei Varianten gefunden, welche mit einem erhöhten AMD-Risiko assoziiert sind (**Tabelle 1**). Bereits vor über 30 Jahren wurde beschrieben, dass diese beiden Varianten die Funktion von C3 signifikant beeinflussen. Etwa 20–22 % der Gesamtbevölkerung besitzen diese risikoassoziierten Veränderungen, jedoch ist hier der Einfluss auf das Erkrankungsrisiko nur moderat.

Aufgrund der Befunde in den *CFH*-, *CFB*- und *C3*-Genen bilden die Komponenten der Komplementkaskade einen sehr attraktiven Forschungsschwerpunkt für weitere Studien zur AMD-Genetik. Entsprechend werden gegenwärtig einzelne Mitglieder der Komplementkaskade auf eine Assoziation mit der AMD untersucht. Dies verspricht weitere Einblicke und eine Aufklärung der Rolle der Komplementaktivierung in der AMD-Pathogenese.

### ARMS2/HTRA1 – ein zweiter hauptverantwortlicher AMD-Genort

Aufgrund umfangreicher Arbeiten unseres Instituts wurde neben dem *CFH*-Gen ein weiterer Genort gefunden, der ebenfalls mit einer starken erblichen Vorbelastung für die Ausbildung einer AMD verbunden ist. Auf Chromosom 10 konnten 15 AMD-assoziierte Varianten detektiert werden, die sich in den eng benachbarten Genen *ARMS2* (*age-related maculopathy susceptibility 2*) und *HTRA1* (*HtrA serine peptidase 1*) befinden. Diese 15 Varianten werden fast ausschließlich gemeinsam vererbt, sind somit alle vergleichbar stark mit der AMD assoziiert und kennzeichnen die Risikovariante dieses Genorts. Die Häufigkeit der einzelnen Risikovarianten betrug in den AMD-Patientengruppen etwa 36 % bis 52 %, in der Kontrollgruppe jedoch nur etwa 19 % bis 24 % (**Tabelle 1**). Im Vergleich zur risikoerhöhenden *CFH*-Variante ist die Stärke des Effekts damit etwas höher, seine Häufigkeit aber etwas niedriger, weshalb beide Risikovarianten (*CFH* auf Chromosom 1 und *ARMS2/HTRA1* auf Chromosom 10) einen ähnlich hohen Beitrag zum AMD-Erkrankungsrisiko liefern. Beide Risikovarianten tragen dabei unabhängig und additiv zu einem erhöhten AMD-Risiko bei. Weitere Studien unseres Instituts zeigten, dass - ähnlich wie bei den

*CFH*-Varianten - sich auch hier keine spezielle Assoziation zu der feuchten oder der trockenen Form der AMD finden lässt. Somit stellt die *ARMS2/HTRA1*-Region einen zweiten hauptverantwortlichen Genort für ein erhöhtes AMD-Risiko dar (**Tabelle 1**). Die 15 Varianten sind auch in asiatischen Bevölkerungen mit AMD assoziiert und kommen dort sogar etwas häufiger vor als in den kaukasischen Bevölkerungen. Die *ARMS2/HTRA1*-Risikovariante scheint daher im Vergleich zur *CFH*-Risikovariante globaler verteilt zu sein (**Tabelle 1**).

Die starke Assoziation von AMD mit zwei unterschiedlichen Genorten war ein überraschender Befund, der eher unüblich für eine komplexe Erkrankung ist. Im Vergleich zu anderen komplexen Erkrankungen, bei denen der genetische Hintergrund oft nur eine kleine Rolle spielt, wird hierdurch ein starker Einfluss des genetischen Hintergrunds auf die AMD-Entstehung offensichtlich.

### Funktionelle Auswirkungen

Da die 15 Varianten in den Genen *ARMS2* und *HTRA1* stark gekoppelt sind, d.h. in hohem Maße gemeinsam vererbt werden, kommen beide Gene als gleichwertige Kandidaten für das gesuchte AMD-Risikogen in Frage. Obwohl bereits für einige der 15 Variationen funktionelle Konsequenzen vorgeschlagen wurden, fehlen bisher eindeutige Daten, die eine Entscheidung zugunsten eines der beiden Kandidaten zuließen.



*HTRA1* besitzt mit Funktionen im Komplementsystem, bei der extrazellulären Ablagerung oder beim programmierten Zelltod Eigenschaften, die sehr wohl mit einer ursächlichen Rolle im AMD-Krankheitsprozess in Einklang zu bringen wären. Darüber hinaus wurde das *HTRA1*-Eiweiß in den drusenartigen Ablagerungen in Netzhäuten mit fortgeschrittener AMD gefunden. Trotz dieser Befunde, die für *HTRA1* als AMD-Gen sprechen könnten, zeigen in vielen Studien die risikoassoziierten Varianten keine offensichtliche Auswirkung auf die Struktur oder die Funktion des *HTRA1*-Eiweißes.

Noch weniger Daten sind zur Zeit über das *ARMS2*-Gen verfügbar, ein entwicklungsgeschichtlich junges Gen, das nur in den höher entwickelten Primaten vorkommt. Ein *ARMS2*-Genprodukt wurde von uns und anderen Gruppen bislang nur in der menschlichen Netzhaut und in der Plazenta gefunden. Eine mögliche Funktion des *ARMS2*-Genprodukts ist bislang unklar. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass *ARMS2* eventuell ohne jede zelluläre Funktion ist. Ein wichtiges Argument für *ARMS2* als AMD-Gen konnte jedoch durch Arbeiten an unserem Institut erbracht werden: Eine der Risikovarianten im *ARMS2*-Gen macht das *ARMS2*-Genprodukt hochgradig instabil. Das Fehlen des *ARMS2*-Genprodukts würde demnach die Ausbildung der Krankheit begünstigen.

## Zur Rolle der Genetik in Prävention und Therapie der AMD

Heute ist die AMD vermutlich eine der am intensivsten untersuchten komplexen Erkrankungen. Es liegen umfangreiche Informationen über genetische und umweltbedingte Risikofaktoren sowie über die beteiligten biologischen Prozesse vor. Trotzdem

kann der Mehrheit der AMD-Patienten noch immer keine wirkungsvolle Therapie angeboten werden. Gezielte präventive Maßnahmen und ein erfolgreicher Behandlungsansatz werden jedoch unverzichtbar sein, insbesondere da die Volkskrankheit AMD in den kommenden Jahrzehnten immer mehr Personen betreffen wird. Solche Behandlungsansätze werden aufgrund der komplexen Natur der Erkrankung ein noch tieferes Verständnis der genetischen, demographischen und umweltbedingten Faktoren sowie ihres Zusammenspiels während der AMD-Pathogenese erfordern. Da bis zu 71 % des AMD-Risikos auf genetische Einflüsse zurückzuführen sind, sollten unsere Prioritäten darauf gerichtet sein, die funktionellen Konsequenzen AMD-assoziiierter Genvarianten zu verstehen. Besondere Bedeutung wird auch haben, in welcher Weise diese Genvarianten an der Entwicklung von Früh- und Spätstadien der AMD beteiligt sind. Die Genetik bietet hierbei die Chance, bislang unbekannte zelluläre Wege oder Biomarker zu entdecken, die vielleicht neuartige Angriffspunkte für gezielte therapeutische Ansätze liefern. Am Beispiel von *CFH* lassen sich sehr schön die Möglichkeiten, die sich für den Patienten aufgrund der genetischen Befunde ergeben können, aufzeigen. Dessen Entdeckung war ein fundamentaler Befund, der entscheidend die weitere intensive Erforschung eines möglichen Zusammenhangs zwischen AMD und dem Immunsystem vorangetrieben hat.

Gegenwärtig besteht noch Unklarheit, ob und in welchem Ausmaß die bisher gefundenen AMD-Risikogene mit der Entwicklung hin zu einem der beiden Spätstadien der Erkrankung, der trockenen bzw. der feuchten AMD, korreliert sind. Es besteht jedoch Hoffnung, dass ein besseres Verständnis der AMD-Genetik auch einen Beitrag zu den zentralen Schaltern leisten

wird, die die Prognose und den Krankheitsverlauf beeinflussen. In einer vor Kurzem erschienenen Analyse von bisher bekannten genetischen Risikofaktoren wurde geschätzt, dass etwa 80 % der Personen aus der höchsten von zehn Risikogruppen im Alter von 75 Jahren tatsächlich eine AMD entwickeln. Daraus folgt, dass trotz der komplexen Natur der Erkrankung genetische Faktoren sehr genaue Voraussagen über die Wahrscheinlichkeit einer Erkrankung erlauben. Damit rückt die Ära einer personalisierten Medizin näher, und die Aussicht auf eine gesteigerte Lebensqualität in fortgeschrittenem Alter scheint auch für Personen mit hohem AMD-Risiko in Reichweite.

## Die Erforschung von Netzhauterkrankungen am Institut für Humangenetik und an der Universität Regensburg

Ein zentraler Schwerpunkt am Institut für Humangenetik ist die Erforschung der Ursachen und Mechanismen von degenerativen Netzhauterkrankungen des Menschen, wie beispielsweise der AMD oder den erblichen Erkrankungen Morbus Best, X-gebundene juvenile Retinoschisis oder Sorsby Fundusdystrophie. Dabei wird nach bislang unbekannten krankheitsverursachenden Genen gesucht und der Effekt solcher Gene auf die Krankheitsentwicklung erforscht. Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten des Instituts ist die Erforschung der Möglichkeit gezielter (gen)therapeutischer Maßnahmen bei Netzhautdegeneration anhand ausgewählter Tiermodelle. Das Institut für Humangenetik arbeitet dabei eng mit anderen Instituten der Universität Regensburg zusammen, die sich ebenfalls der Erforschung von Netzhauterkrankungen



3 Augenhintergründe von gesunden und AMD-betroffenen Augen. Augenhintergrund einer gesunden Person (A) im Vergleich zu einem Auge mit trockener AMD eines 72-jährigen Patienten (B) und einer ausgeprägten feuchten AMD eines 65-jährigen Patienten (C). Die Bilder wurden freundlicherweise von Frau Dr. Claudia von Strachwitz (Universitätsaugenklinik Würzburg) zur Verfügung gestellt.



widmen. Arbeitsgruppen aus insgesamt drei Fakultäten, der Medizinischen Fakultät, der Naturwissenschaftlichen Fakultät III und der Philosophischen Fakultät II, werden zur Zeit im Rahmen einer Forschergruppe (FOR 1075) mit finanziellen Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft unterstützt; sie beschäftigen sich interdisziplinär und fakultätsübergreifend mit dem Thema „Regulation und Pathologie von homöostatischen Prozessen der visuellen Funktion“.

## Literaturverzeichnis

*Britta S. Fiebig, Bernhard H. F. Weber*, Altersabhängige Makuladegeneration: Neue Einblicke in Genetik und Pathogenese einer komplexen Erkrankung, *Medizinische Genetik* 19 (2007), 369–377.

*Lars G. Fritsche, Thomas Loenhardt, Andreas Janssen, Sheila A. Fisher, Andrea Rivera, Claudia N. Keilhauer, Bernhard H. F. Weber*, Age-related macular degeneration is associated with an unstable ARMS2 (LOC387715) mRNA, *Nature Genetics* 40 (2008), 892–896.

*Andrea Rivera, Sheila A. Fisher, Lars G. Fritsche, Claudia N. Keilhauer, Peter Lichtner, Thomas Meitinger, Bernhard H. F. Weber*, Hypothetical LOC387715 is a second major susceptibility gene for age-related macular degeneration, contributing independently of complement factor H to disease risk, *Human Molecular Genetics* 14 (2005), 3227–3236.

*Hendrik P. N. Scholl, Peter Charbel Issa, Maja Walier, Stefanie Janzer, Beatrix Pollok-Kopp, Florian Börncke, Lars G. Fritsche, Ngaihang V. Chong, Rolf Fimmers, Thomas Wienker, Frank G. Holz, Bernhard H. F. Weber, Martin Oppermann*, Systemic complement activation in age-related macular degeneration, *PLoS One* 3 (7), e2593 (2008).

*Anand Swaroop, Emily Y. Chew, Catherine Bowes Rickman, Gonçalo R Abecasis*, Unraveling a Multifactorial Late-Onset Disease: From Genetic Susceptibility to Disease Mechanisms for Age-Related Macular Degeneration, *Annual Review of Genomics and Human Genetics* 10 (2009), 19–43.



Prof. Dr. rer. nat. **Bernhard H.F. Weber**, geb. 1956 in Heidelberg, 1976–1982 Studium der Chemie und Biologie für das Lehramt an Gymnasien an der Universität Freiburg, 1988 Promotion bei Prof. Ulrich Wolf am Institut für Humangenetik der Universität Freiburg. 1988–1993 zunächst Research Assistant, dann Associate Professor am Department of Medical Genetics der University of 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.

Dr. rer. nat. **Ulrike Friedrich**, geb. 1979 in Augsburg, 1998–2003 Studium der Biologie an der Universität Regensburg. 2007 Promotion bei Prof. Michael Thomm am Institut für Mikrobiologie der Universität Regensburg, dort bis 2008 wissenschaftliche Mitarbeiterin. Seitdem Postdoktorandin am Institut für Humangenetik der Universität Regensburg.

**Forschungsschwerpunkte:** Funktionelle Analyse AMD-assoziiierter Varianten auf biochemischer und zellbiologischer Ebene.

Dr. rer. nat. **Lars G. Fritsche**, geb. 1978 in Lindau am Bodensee, von 1999–2004 Studium der Biologie an der Universität Regensburg (Hauptfach Genetik). Von 2005 bis 2009 zunächst Promotion, seither Postdoktorand am Institut für Humangenetik der Universität Regensburg.

**Forschungsschwerpunkte:** Identifizierung, Validierung und Charakterisierung von genetischen Risikofaktoren der AMD in Fall-Kontroll-Assoziationsstudien (u.a. in internationalen Kooperationsprojekten); Design und Etablierung einer Resequenzierungsplattform zur Diagnostik erblicher Netzhautdystrophien.



# „Giftmüll-Papiere“ und Finanzkrise

## Fatale Fehleinschätzung der Risiken von strukturierten Kreditprodukten

Alfred Hamerle

Das beherrschende Thema der Finanzwelt in den letzten Jahren ist die Mitte 2007 ausgebrochene Finanzkrise mit ihren dramatischen Auswirkungen auf den Finanzsektor und die Realwirtschaft. Die Krise hat ihren Ursprung in der Immobilienblase am US-amerikanischen Häusermarkt in Verbindung mit der Verbriefung von Hypothekendarlehen an Subprime-Schuldner, d.h. Schuldner mit geringer Bonität. Eine am Lehrstuhl für Statistik der Fakultät Wirtschaftswissenschaften durchgeführte Risikoanalyse der Produkte bzw. Wertpapiere, die die Krise hauptsächlich mit verursacht haben, offenbart fundamentale Fehleinschätzungen bestimmter Risiken, die zu falschen Anreizen und fatalen Entwicklungen führten, die letztendlich mitverantwortlich für das enorme Ausmaß der entstandenen Verluste waren.

### Einführung

Durch die Technik der Verbriefung wurde es möglich, ein Portfolio von Kreditpositionen bzw. die mit den Krediten verbundenen Ausfallrisiken über verschiedene Kredittransferinstrumente an die Märkte für strukturierte Anleihen weiterzugeben und die Kreditverbriefungen bei institutionellen Investoren zu platzieren. Dies führte zu einem dramatischen Anstieg des Markts für Kreditverbriefungen und strukturierte Kreditprodukte. Einige dieser Produkte wie Residential Mortgage Backed Securities (RMBS) und Collateralized Debt Obligations (CDOs) mit Subprime-Darlehen sind von der aktuellen Finanzkrise besonders betroffen.

Das ökonomische Umfeld in der Zeit vor dem Ausbruch der Subprime-Krise war

geprägt durch ein historisch niedriges Zinsniveau in den wichtigsten Volkswirtschaften. So führte die expansive Zinspolitik der amerikanischen Notenbank FED nach dem 11. September 2001 zeitweise zu negativen Realzinsen. Dies bedingte unter anderem eine starke Zunahme der Verschuldungsneigung der US-amerikanischen Haushalte (die Sparquote ging gegen null). Da in den USA immer schon eine starke Motivation zum Hauserwerb vorhanden war („American Dream“), stieg das Volumen der Darlehen im privaten Wohnungsbau in großem Ausmaß. Gleichzeitig entwickelte sich ein Immobilienboom mit ständig wachsenden Häuserpreisen, wobei allerdings der Anstieg der Preise regional sehr unterschiedlich war.

Auf der anderen Seite konnten die Investoren auf konservative Anlageformen nur geringe Renditen erzielen und sie sahen sich gezwungen, nach alternativen Investments zu suchen, um Renditevorgaben einhalten zu können („Search for Yield“). Dies erreichte man zum einen durch Investitionen in Anlagen mit geringerer Liquidität bzw. Bonität, die entsprechend höhere Renditen einbrachten, oder durch die Finanzierung der Investitionen mit höheren Fremdkapital-Anteilen (Leverage), um die erwarteten Renditen durch die entsprechende Hebelwirkung zu steigern. Die erhöhte Risikobereitschaft der Investoren wurde durch die umfangreiche und vergleichsweise günstige Verfügbarkeit von Krediten verstärkt, wodurch die Liquidität in den Finanzmärkten dramatisch anstieg.

Speziell bei Hypothekendarlehen konnten mit Subprime-Darlehen, d.h. Kredite an Schuldner mit geringer Bonität, deutlich höhere Renditen erzielt werden als mit

Standard-Hypothekendarlehen. Der Anteil der Subprime-Darlehen in den USA stieg von 7,2% der neu vergebenen Hypothekenkredite im Jahr 2001 auf 20,6 % der neu vergebenen Hypothekenkredite im Jahr 2006 [1].

Um ständig neue Kunden gewinnen zu können, wurden die Kreditvergabestandards dramatisch gesenkt. Es wurden Kredite an Schuldner ohne Bonität vergeben, die diese „im Normalfall“ kaum zurückzahlen konnten. Durch die Immobilienblase mit ständig steigenden Häuserpreisen wurde die Situation über eine gewisse Zeit hinweg verschleiert. Als die Häuserpreise stagnierten und schließlich zu fallen begannen, kam es zum Ausbruch der Subprime Krise. Die Bestände an schlechten Krediten wurden plötzlich „sichtbar“ und es kam zu rasch steigenden Verlusten bei den entsprechenden Verbriefungen. Völlig unerwartet für viele Investoren stuften die Agenturen (z.B. Standard & Poors, Moody's oder Fitch) die Ratings von hunderten von CDOs um mehrere Notengrade herunter und aus bestbewerteten Finanztiteln wurden „Giftmüll“ bzw. „hochtoxische“ Papiere, wie den Schlagzeilen der Tagespresse zu entnehmen war. Als Folge ergaben sich dramatische Wertverluste in den Bilanzen von Banken und Investoren.

Angesichts der erheblichen Verwerfungen an den internationalen Finanzmärkten wird erneut deutlich, dass der Identifikation und Messung der Risikoeigenschaften dieser Produkte eine zentrale Bedeutung zukommt. Offensichtlich wurden im Vorfeld der Krise wesentliche Risikocharakteristika der Produkte falsch eingeschätzt und ihre potentiellen Vorzüge überbewertet. Viele Investoren haben diese Papiere



FAULE ANLAGEGELDER

13.08.2007

## Strukturierter Giftmüll im Depot

2 Schlagzeile im Handelsblatt vom 13. August 2007

wie Industriefinanzierungen (Corporate Bonds) betrachtet und sich vollständig auf die Bonitätseinschätzungen der Ratingagenturen verlassen. Dabei wurden aber andere Risiken, die aus den Ratingeinstufungen nicht hervorgehen, übersehen bzw. ignoriert. Der allgemeine Grundsatz, dass man als Investor stets selbst in der Lage sein sollte, ein Wertpapier zu bewerten und seinen fairen Preis zu bestimmen, wurde sträflich außer Acht gelassen. Eine detaillierte Analyse der Risiken dieser komplexen Finanzprodukte ist sowohl für ein adäquates Risikomanagement als auch zur Vermeidung der Wiederholung einer solchen Krise zwingend notwendig.

## „Originate-to-Distribute“-Geschäftsmodell

Die Techniken der Verbriefung spielten für die globale Ausbreitung und das Ausmaß der Krise eine zentrale Rolle. Während früher Banken die von ihnen ausgereichten Kredite über die Einlagen ihrer Kunden finanzierten und die damit verbundenen Ausfallrisiken bis zum Laufzeitende in der

Bilanz behielten, erfolgte in den letzten Jahren in zunehmendem Maße die Umwandlung traditioneller Bankkredite in handelbare Wertpapiere, die anschließend im Sekundärmarkt veräußert werden („Originate and Distribute“).

Um die Marktgängigkeit der verbrieften Forderungen zu erhöhen, werden die Portfolios dieser Forderungen in Tranchen aufgeteilt, die unterschiedlich hohe Verlustrisiken tragen. Anschließend werden die Tranchen mit Hilfe einer speziell dazu gegründeten Zweckgesellschaft, einem Special Purpose Vehicle (SPV), an Investoren verkauft.

Abbildung 3 stellt die schematische Wirkungsweise eines CDO dar.

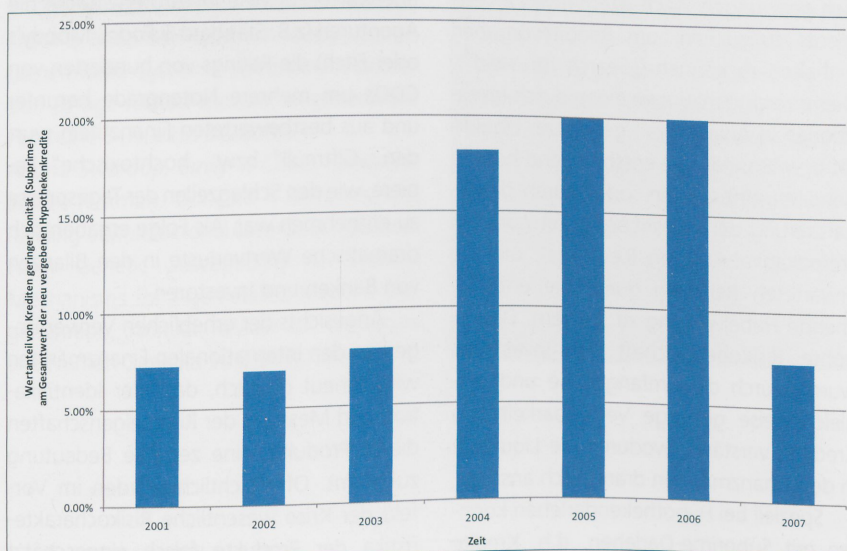
Bei der Tranchierung werden den einzelnen Tranchen keine spezifischen Forderungen zugeordnet, vielmehr wird lediglich das Ausfall- bzw. Verlustrisiko des Pools aufgeteilt. Die aus den Referenzaktiva des Collateral Pools resultierenden Zahlungen werden benützt, um der Seniorität folgend die festen oder variablen Zinszahlungen an die Investoren ebenso wie später die Rückzahlung der Nominalbeträge zu tätigen („Wasserfall-Struktur“). Tranchen mit der höchsten Seniorität werden zuerst bedient,

Tranchen mit niedrigerer Seniorität werden nachrangig behandelt.

Werden auftretende Verluste bzw. Schäden in Folge von Ausfällen von Schuldner betrachten, erfolgt die Zuordnung in umgekehrter Reihenfolge. Forderungen gehen zunächst zu Lasten der Eigenkapital-Tranche (Equity Tranche/First Loss Piece). Übersteigt das Ausmaß der Verluste das Volumen der Equity-Tranche, werden die Inhaber der Junior-Tranche belastet. Die sicherste Anlage ist die Senior-Tranche, die erst zum Schluss für Ausfälle eintreten muss. Das strikte Subordinations-/Wasserfall-Prinzip ermöglicht, auch aus einem Portfolio mit Krediten niedrigerer Qualität (z.B. Subprime-Hypotheken) einen relativ hohen Anteil von Senior-Tranchen mit einem Best-Rating (AAA-Rating) zu schaffen. Die Mezzanine-Tranchen werden so konstruiert, dass sie ein Investment Grade-Rating (BBB oder besser) erhalten, so dass sie von institutionellen Anlegern erworben werden können. Für die Equity-Tranche erfolgt keine Bonitätseinstufung, sie verbleibt häufig beim Arrangeur (Originator) der Verbriefungstransaktion. In jüngerer Zeit wurden die Equity-Tranchen in zunehmendem Maße an risikofreudige Hedge-Fonds verkauft. Je nachrangiger eine Tranche ist, d.h. je weniger Subordination sie aufweist, desto höher sind die Zinszahlungen an die Investoren der entsprechenden Papiere.

## Komplexe Verbriefungsstruktur bei CDOs und Mehrfachverbriefungen

Bei den CDOs kann die Verbriefungsstruktur auch differenzierter sein. Die einem CDO zugrunde liegenden Forderungen können ihrerseits wiederum aus Asset Backed Securities (ABS) oder speziell Mortgage Backed Securities (MBS) entstanden sein. Es handelt sich dann um Mehrfachverbriefungen. Bei vielen derartigen ABS CDOs (Structured Finance (SF) CDOs) bzw. CDOs auf ABS, die in den Jahren unmittelbar vor Ausbruch der Krise strukturiert wurden, besteht der Collateral Pool nicht aus herkömmlichen Krediten oder Anleihen, sondern beispielsweise aus Mezzanine-Tranchen von Residential Mortgage Backed Securities (RMBS) mit Subprime-Krediten, d.h. Finanztiteln, die ihrerseits bereits Verbriefungen von Portfolios mit Krediten bonitätsschwacher Schuldner darstellen. Ein Portfolio aus solchen Tranchen wird dann erneut verbrieft und tranchiert und die entstehenden Tranchen werden an Investoren verkauft. Häufig wurden noch weitere Verbriefungsstufen nachgeschaltet und damit immer komplexere und



1 Wertanteil von Krediten geringer Bonität (Subprime) am Gesamtwert der vergebenen Hypothekenkredite (2001–2007)

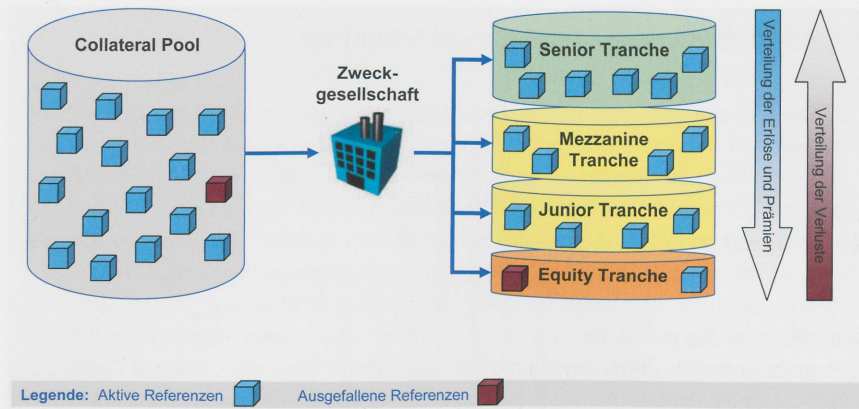


kaum mehr durchschaubare Strukturen geschaffen. Abbildung 4 veranschaulicht das Prinzip.

Von entscheidender Bedeutung ist dabei, dass die Originatoren bzw. Arrangeure der CDOs (in aller Regel Investmentbanken) mit dem „Originate-to-distribute“-Geschäftsmodell die Risiken an die Investoren weitergeben und somit praktisch ohne Risiko Erträge erwirtschaften konnten.

## Risikoanalyse offenbart fundamentale Fehleinschätzungen

Durch die Verbriefung wurden aus den Krediten handelbare Wertpapiere, für die die Handelsabteilung der Institute zuständig war. Die Preise richteten sich überwiegend nach dem Rating, d.h. der Bonitätseinstufung durch die führenden Ratingagenturen. Das Rating einer CDO-Tranche orientiert sich vorwiegend an der „Hitting Probability“, d.h. der Wahrscheinlichkeit, dass die Tranche während der Laufzeit überhaupt getroffen wird und einen Schaden erleidet. Dies entspricht der Ausfallwahrscheinlichkeit eines Bonds. Je größer die Subordination (der Kapitalpuffer) ist,



3 Prinzip der Poolbildung und Tranchierung

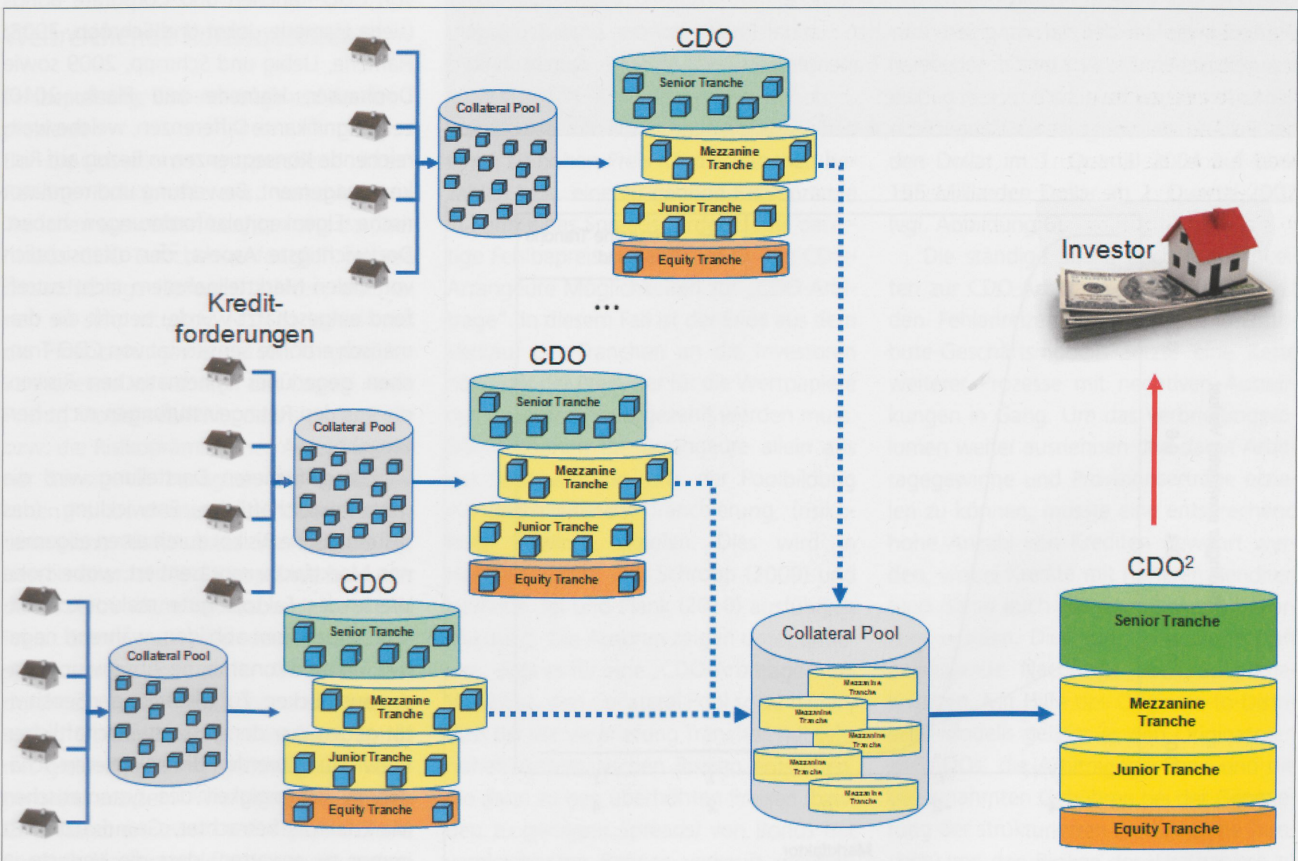
desto kleiner ist die Hitting Probability und desto besser ist das Rating. Die Senior Tranchen erhielten bei Emission durchwegs die Bestnote, d.h. ein AAA-Rating.

### Die Rolle der Rating-Agenturen

Für komplexe strukturierte Produkte wie CDOs ist die Bewertung durch Rating-Agenturen von zentraler Bedeutung. Nur wenn einer Anlage eine bestimmte Qualitätsstufe attestiert wird, kann sie von institutionellen Anlegern erworben werden. Andererseits strukturierten die CDO-Arrangeure mit Unterstützung der Ratingagen-

turen die Tranchierung, die Wasserfall-Struktur und die Subordination so, dass ein ausreichend großer Anteil an Senior-Tranchen realisiert werden konnte. Die Rating-agenturen wurden vom CDO-Trust beauftragt und konnten im Falle einer erfolgreichen Generierung eines CDOs durch das erforderliche Monitoring der Struktur weitere Einnahmen erzielen. Dies führte zu erheblichen Interessenkonflikten.

Aufgrund ihrer Komplexität sind CDOs generell schwierig zu bewerten. Mitverantwortlich hierfür waren enorme Informationsdefizite und Informationsasymmetrien



4 Prinzip der Mehrfachverbriefungen



## Kreditverbriefungen (Asset Backed Securities)

Kreditverbriefungen (Asset Backed Securities) bezeichnen verschiedene, zum Teil sehr komplexe Formen von forderungsbesicherten Wertpapieren. Die Zahlungsansprüche dieser Wertpapiere werden nicht durch den Emittenten selbst (wie z.B. bei Anleihen), sondern durch ein Referenzportfolio (Collateral Pool) von Krediten bzw. Forderungen (den Assets) gedeckt. Bei den ABS handelt es sich dabei in aller Regel um Kredite (z.B. Autokredite, Kreditkartenforderungen, Leasingverträge) und die zu verbriefenden Forderungen sind relativ homogen. Bei Residential Mortgage Backed Securities (RMBS) sind dies private Baufinanzierungen, also „Häuslebauer“-Hypotheken des US-Immobilienmarkts. Besonders von der Krise betroffen sind die Collateral Pools, die sich zu einem großen Teil aus US-Hypothekenkrediten an Subprime-Schuldner, d.h. Schuldner mit geringer Bonität, zusammensetzen.

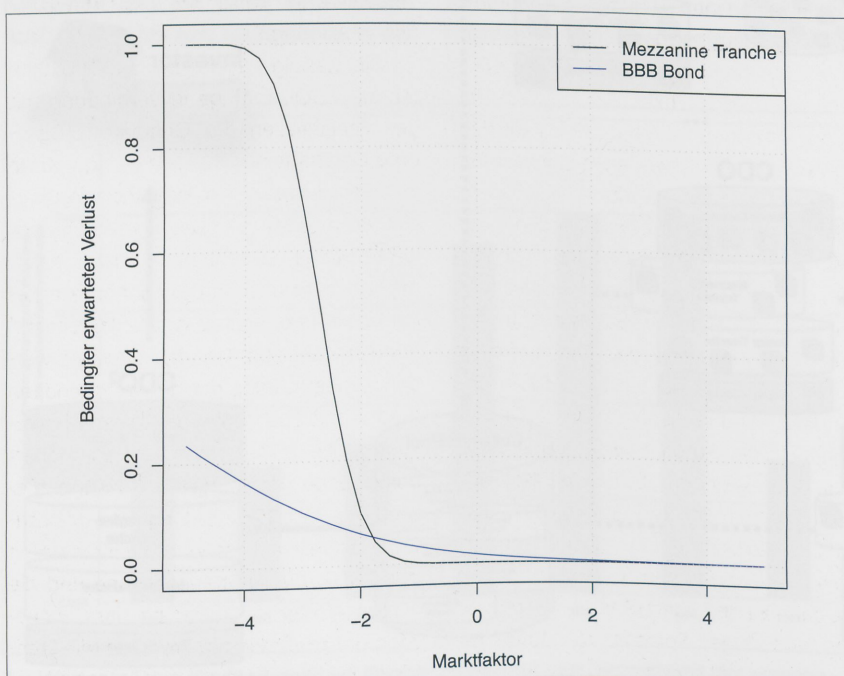
Die Wertpapiere (Assets) des zugrunde liegenden Collateral Pools bilden die Besicherung für die im Rahmen der Verbriefungstransaktion neu gebildeten Wertpapiere, den Tranchen. Die Tranchen tragen unterschiedliche Verlustrisiken. Dabei ist zu beachten, dass den Tranchen keine spezifischen Forderungen des Pools explizit zugeordnet werden, sondern es wird das Ausfall- bzw. Verlustrisiko des gesamten Pools aufgeteilt. Zwischen den Tranchen wird ein striktes Subordinationsverhältnis festgelegt, dessen Rangfolge die Reihenfolge und die Höhe bestimmt, in welcher Zahlungen des verbrieften Portfolios den Haltern (Investoren) der Tranchen zugewiesen werden. Tranchen mit der höchsten Seniorität werden zuerst bedient, Tranchen mit niedrigerer Seniorität werden nachrangig behandelt. Für auftretende Verluste bzw. Schäden in Folge von Ausfällen von Schuldnern im Referenzportfolio erfolgt die Zuordnung in umgekehrter Reihenfolge. Forderungen gehen zuerst zu Lasten der Equity-Tranche (First Loss Piece), die das höchste Risiko trägt. Übersteigt das Ausmaß der Verluste das Volumen der Equity-Tranche, werden die Inhaber der nächsten Tranche (Junior-Tranche) belastet. Die sicherste Tranche ist die Senior-Tranche, die erst zum Schluss für Ausfälle eintreten muss. Somit sind die Tranchen durch unterschiedliche „Kapitalpuffer“ gekennzeichnet, welche die abnehmenden Ausfall- bzw. Verlustrisiken von der Equity- bis zur Senior-Tranche zum Ausdruck bringen. Die steigenden Risiken der nachrangigen Tranchen werden durch höhere Zinsaufschläge ausgeglichen. Die Anzahl der gebildeten Tranchen schwankte stark, im Durchschnitt wurden sieben bis acht Tranchen gebildet.

zwischen den verschiedenen Marktteilnehmern, die bei strukturierten Produkten wie CDOs eine besondere Hebelwirkung entfalten (eine ausführliche Erörterung findet man in Hamerle und Plank, 2010). Dies betrifft vor allem Informationen über die Schuldner des Collateral Pools. In aller Regel sind Informationen auf individueller Basis (Einzeladressen) nicht zugänglich. Durch die fehlende Offenlegung der Datenbasis fehlte den Investoren eine zuverlässige Grundlage für die Quantifizierung der Risiken dieser Papiere und auch für Investoren mit dem notwendigen Knowhow war es unmöglich, eine umfassende Bewertung und Risikoanalyse der strukturierten Produkte vorzunehmen. Dies schuf die Grundlage dafür, dass viele Investoren CDO-Tranchen wie Industrieanleihen (Corporate Bonds) oder Anleihen staatlicher Schuldner (Sovereign Bonds) mit gleichem Rating betrachteten und insbesondere auch ihre Risiken mit denjenigen der Bonds gleichsetzten. Dies wurde nicht zuletzt dadurch begünstigt, dass die Agenturen für Bonds und CDO-Tranchen dieselbe Rating-skala verwendeten.

### Dramatische Fehleinschätzung der Sensitivität gegenüber systematischen Risiken

Eine genauere Analyse der Risikoprofile von CDO-Tranchen und Corporate Bonds (siehe Hamerle, Jobst und Schropp, 2008, Hamerle, Liebig und Schropp, 2009 sowie Donhauser, Hamerle und Plank, 2010) zeigt signifikante Differenzen, welche weitreichende Konsequenzen in Bezug auf Risikomanagement, Bewertung und regulatorische Eigenkapitalanforderungen haben. Der wichtigste Aspekt, der offensichtlich von vielen Marktteilnehmern nicht zutreffend eingeschätzt wurde, betrifft die dramatisch erhöhte Sensitivität von CDO-Tranchen gegenüber systematischen Risiken, die aus den Ratingeinstufungen nicht hervorgeht.

Zur einfacheren Darstellung wird die gesamtwirtschaftliche Entwicklung (das systematische Risiko) durch einen allgemeinen Marktfaktor repräsentiert, wobei hohe Werte des Faktors gute makroökonomische Situationen abbilden, während negative Werte ökonomische Abschwungphasen ausdrücken. Zur Messung der Sensitivität gegenüber der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung werden die erwarteten Schäden in Abhängigkeit des systematischen Marktfaktors betrachtet. Grundsätzlich ist immer zu erwarten, dass die Verluste in schlechten ökonomischen Zuständen



5 Vergleich der Risikoprofile einer BBB CDO-Tranche und eines BBB Bonds



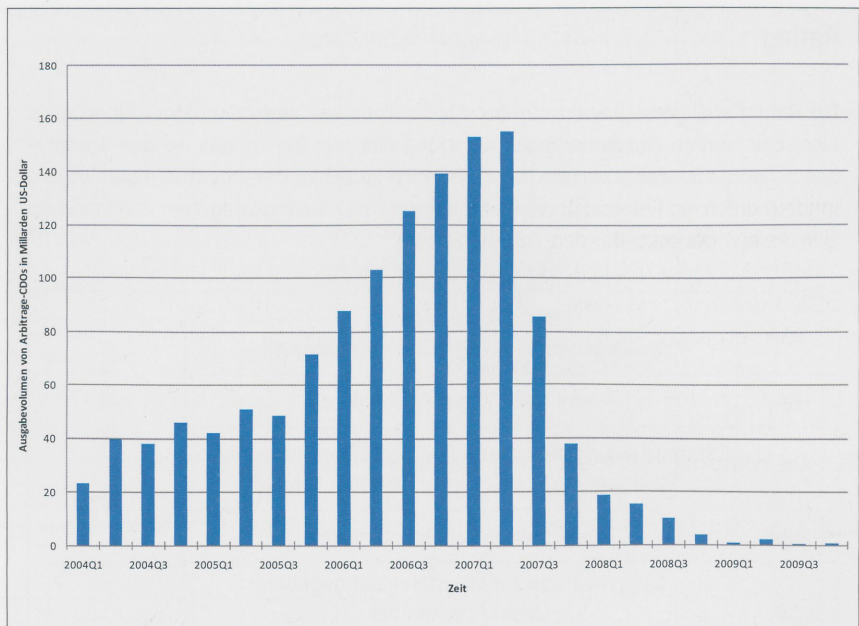
höher ausfallen als in Aufschwungphasen. Entscheidend ist der Grad des Anstiegs. Zum Vergleich werden in der folgenden Abbildung beispielhaft die entsprechenden Diagramme (Risikoprofile) für eine BBB-geratete Industrieanleihe (Bond) und einer CDO-Tranche mit demselben Rating gegenüber gestellt.

Aus der Abbildung ist unmittelbar ersichtlich, dass sich das Ausfallverhalten von CDO-Tranchen und Corporate Bonds hinsichtlich des Einflusses des systematischen Risikos drastisch unterscheidet. Bei schlechten Werten des systematischen Risikofaktors steigt die Kurve der Tranche viel steiler als bei einem Bond mit derselben Ratingeinstufung. Dies bringt eine stark erhöhte Sensitivität des Ausfallrisikos der Tranche gegenüber makroökonomischen Veränderungen zum Ausdruck. In einer guten gesamtwirtschaftlichen Situation wird die Tranche praktisch nie getroffen, in einem ökonomischen Abschwung hingegen bewirkt schon eine kleine Änderung des systematischen Risikos eine dramatische Verschlechterung der Bonität der Tranche. Weitergehende Analysen findet man in Hamerle, Jobst und Schropp, 2008 und Donhauser, Hamerle und Plank, 2010.

## Weitreichende Konsequenzen

### Fehlbepreisung, CDO-Arbitrage und Anreizprobleme

Da die Investoren entsprechend ihrem Rendite-/Risikoprofil aus verschiedenen Tranchen auswählen konnten und darüber hinaus CDO-Tranchen anfänglich höhere Zinsaufschläge (Spreads) zahlten, erschienen sie sehr attraktiv. Nun ist jedoch aus der Finanzierungstheorie seit langem bekannt, etwa im Rahmen des Capital Asset Pricing Modells (CAPM), dass sich der Preis bzw. die Risikoprämie eines Assets an seiner Sensitivität bezüglich des systematischen Risikos orientiert. Je höher das systematische Risiko eines Wertpapiers ist, desto höher ist die Risikoprämie bzw. der damit verbundene Risikoabschlag auf den Preis. Somit muss das deutlich erhöhte systematische Risiko der CDO-Tranchen durch einen signifikant höheren Zinsaufschlag (Spread), als für Corporate Bonds mit gleichem Rating gezahlt wird, kompensiert werden. Wie erwähnt zahlten CDO-Tranchen zwar anfänglich höhere Spreads, die Spreadifferenzen, die zudem ab 2005 immer geringer wurden, reichten



6 Ausgabevolumen von Arbitrage-CDOs in Milliarden US-Dollar zwischen 1. Quartal 2004 und 4. Quartal 2009; Quelle: Securities Industry and Financial Market Association (SIFMA), 2010

jedoch bei weitem nicht aus, um das zusätzliche systematische Risiko zu kompensieren. Die drastisch erhöhte Sensitivität gegenüber systematischen Risiken (wie sie aus Abbildung 5 ersichtlich wird) geht aus den Ratingeinstufungen nicht hervor. Erkennen die Investoren die mit der Tranchierung verbundenen erhöhten systematischen Risiken nicht und orientieren sich ausschließlich am Rating der Tranchen, werden sie mit hoher Wahrscheinlichkeit einen zu hohen Preis für die Tranchen bezahlen bzw. eine zu geringe Risikoprämie in Form eines Spreads fordern. Eine derartige Fehlbepreisung eröffnet für die CDO-Arrangeure Möglichkeiten zur „CDO-Arbitrage“. In diesem Fall ist der Erlös aus dem Verkauf der Tranchen an die Investoren höher als der Preis, der für die Wertpapiere des Collateral Pools gezahlt werden muss. Damit können die Arrangeure allein aus der Strukturierung, d.h. der Poolbildung mit anschließender Tranchierung, (risikolose) Gewinne erzielen. Dies wird in Hamerle, Liebig und Schropp (2009) und Hamerle, Igl und Plank (2010) ausführlich diskutiert. Die Autoren zeigen unter anderem, dass es für eine „CDO-Arbitrage“ von Vorteil ist, den Collateral Pool so zu bilden, dass bei der Verbriefung Tranchen mit sehr hohen systematischen Risiken entstehen, die dann zu den überhöhten Preisen (bzw. den zu geringen Spreads) von Bonds mit vergleichbaren Ratings verkauft werden. Solche Transaktionen wurden von Invest-

mentbanken und anderen Arrangeuren der CDOs (z.B. Hedge-Fonds) in großem Stil durchgeführt. Dies erklärt das dramatische Ansteigen der Emissionsvolumina von „Arbitrage-CDOs“, die wie beschrieben einen Überschuss aus den erworbenen Assets des Collateral Pools einerseits und den nach der Strukturierung an die Investoren verkauften Tranchen andererseits erzielen. Das Ausgabevolumen der Arbitrage-CDOs stieg von ca. 23 Milliarden Dollar im 1. Quartal 2004 auf über 155 Milliarden Dollar im 2. Quartal 2007 (vgl. Abbildung 6).

Die ständige Suche nach Möglichkeiten zur CDO-Arbitrage in Verbindung mit den Fehlanreizen des Originate-to-Distribute-Geschäftsmodells setzte eine Kette weiterer Prozesse mit negativen Auswirkungen in Gang. Um das Verbriefungsvolumen weiter ausdehnen und damit Arbitragegewinne und Provisionserträge erzielen zu können, musste eine entsprechend hohe Anzahl von Krediten gewährt werden, wobei Kredite mit höheren Renditen (und damit auch höheren Risiken!) bevorzugt wurden. Dies schuf eine sprunghaft ansteigende Nachfrage nach Subprime-Krediten. Mit Hilfe des Originate-to-Distribute-Modells gelingt es den Originatoren der CDOs, die Arbitragegewinne und die vereinnahmten Gebühren bei der Generierung der strukturierten Produkte (die Tranchen) von den Risiken der Wertpapiere zu trennen. Damit ergab sich ein typisches



## Rating

Ein Rating stellt eine Bewertung der Kreditwürdigkeit eines Schuldners (bezüglich einer bestimmten Obligation) dar. Den Kategorien der Ratingskala werden Buchstaben zugeordnet, wobei sich die Bezeichnungen zwischen den Agenturen geringfügig unterscheiden. Im Folgenden werden die wichtigsten Ratingkategorien von Standard & Poors kurz vorgestellt:

AAA	Beste Kreditqualität; außergewöhnlich hohe Zahlungsfähigkeit	Investment Grade
AA	Sehr hohe Zahlungsfähigkeit	
A	Starke Zahlungsfähigkeit; etwas anfälliger gegenüber Veränderungen des wirtschaftlichen Umfelds	
BBB	Ausreichende Zahlungsfähigkeit	
BB	Gegenwärtige Zahlungsfähigkeit gegeben; Unsicherheiten bei nachteiligen Wirtschaftsentwicklungen	Speculation Grade
B	Gegenwärtige Zahlungsfähigkeit gegeben; höhere Risiken bei nachteiligen Entwicklungen	
CCC	Zahlungsfähigkeit fragwürdig; nur bei günstiger wirtschaftlicher Entwicklung gegeben	
CC	Zahlungsfähigkeit sehr fragwürdig; hohe Risiken	
C	Zahlungsverzug sehr wahrscheinlich oder steht bevor	
D	Zahlungsverzug bereits eingetreten oder Schuldner hat Konkursverfahren angemeldet	

Die Ratings von AA bis CCC können durch Hinzufügen eines Plus- oder Minuszeichens ergänzt werden, um die relative Stellung innerhalb der Hauptbewertungskategorien zu verdeutlichen.

„Principal-Agent-Problem“, welches fast zwangsläufig ein dramatisches Absinken der Kreditvergabestandards zur Folge hatte und fragwürdige Praktiken von Kreditvermittlern und Kreditgebern von Hypothekendarlehen begünstigte. Da die Kredite nicht mehr in den eigenen Büchern gehalten werden mussten, fehlte den Instituten der Anreiz, umfangreiche Bonitätsprüfungen und regelmäßiges Monitoring bei den von ihnen gewährten und anschließend weiter platzierten Krediten durchzuführen. Das Resultat war eine immer exzessivere Kreditvergabe mit immer niedrigeren Prüfungsstandards und völlig unangemessenen, die Kreditnehmer oft täuschenden Konditionen.

Im Zuge der dramatischen Aufweichung der Kreditvergabestandards wurde bei den Kreditnehmern keine Bonitätsprüfung vorgenommen bzw. bewusst auf Bo-

nität verzichtet („Liar Loans“, NINJA-Loans – „no income, no job or assets“). Vertragsbestimmungen wurden aufgeweicht, Marktpraktiken reichten von der Nichtbeachtung von Bestimmungen des Verbraucherschutzes bis hin zu betrügerischem Verhalten der Kreditvermittler. Zudem wurden immer mehr 100 %-Finanzierungen angeboten, während früher erwartet wurde, dass die Kreditnehmer mindestens 20 % Eigenkapital bei der privaten Baufinanzierung aufbringen.

Auch in Bezug auf die Kreditkonditionen wurden in den Jahren 2005 und 2006 abenteuerliche Konstruktionen erfunden, um immer mehr Kunden gewinnen zu können. Häufig wurden anfängliche Zinsabsenkungen (Teaser Rates = „Lockraten“) vereinbart. Ferner waren verzögerte Tilgungszeitpunkte (Interest Only-Kredite) üblich, so dass man einige Jahre keine Til-

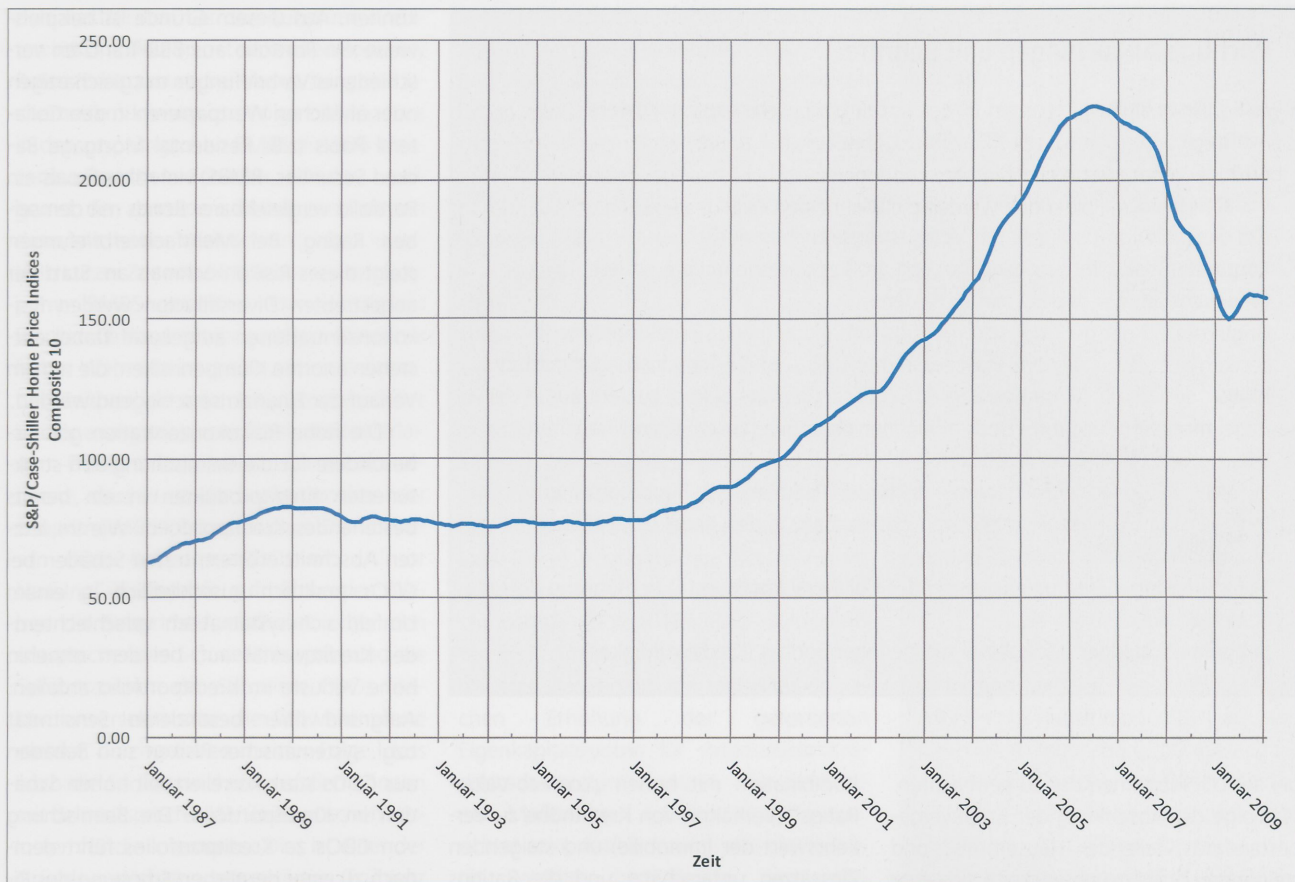
gung leisten musste. Nach Ablauf der niedrigen Anfangszinsen und mit Beginn der Tilgung ergaben sich dann wesentlich höhere Raten für die Schuldner, die jeweils halbjährlich neu festgelegt und an das Niveau der Marktzinsen angepasst wurden. Da ab Mitte 2004 die Leitzinssätze von der amerikanischen Notenbank schrittweise angehoben wurden, stiegen die von den Subprime-Schuldnern nach der Niedrigzinsphase zu leistenden Zins- und Tilgungszahlungen immer weiter an.

Solange die Häuserpreise kontinuierlich anstiegen, vertrauten viele Subprime-Schuldner darauf, ihre Kredite nach Ablauf der Zinsabsenkungsphase bei Bedarf umschulden zu können, gegebenenfalls wieder mit Teaser Rate und gestiegener Kredithöhe, d.h. immer höherer Verschuldung. Ab April 2006 verringerten sich jedoch zuerst die Zuwachsraten der Häuserpreise, dann stagnierten die Preise und begannen kurze Zeit später zu sinken (vgl. Abbildung 7). Damit wurden die dringend notwendigen Umschuldungen immer schwieriger und waren schließlich nicht mehr möglich. Als Folge davon begannen die Ausfallraten der Subprime-Kredite drastisch zu steigen und immer mehr Wohnimmobilien mussten zwangsversteigert werden (vgl. Abbildung 8).

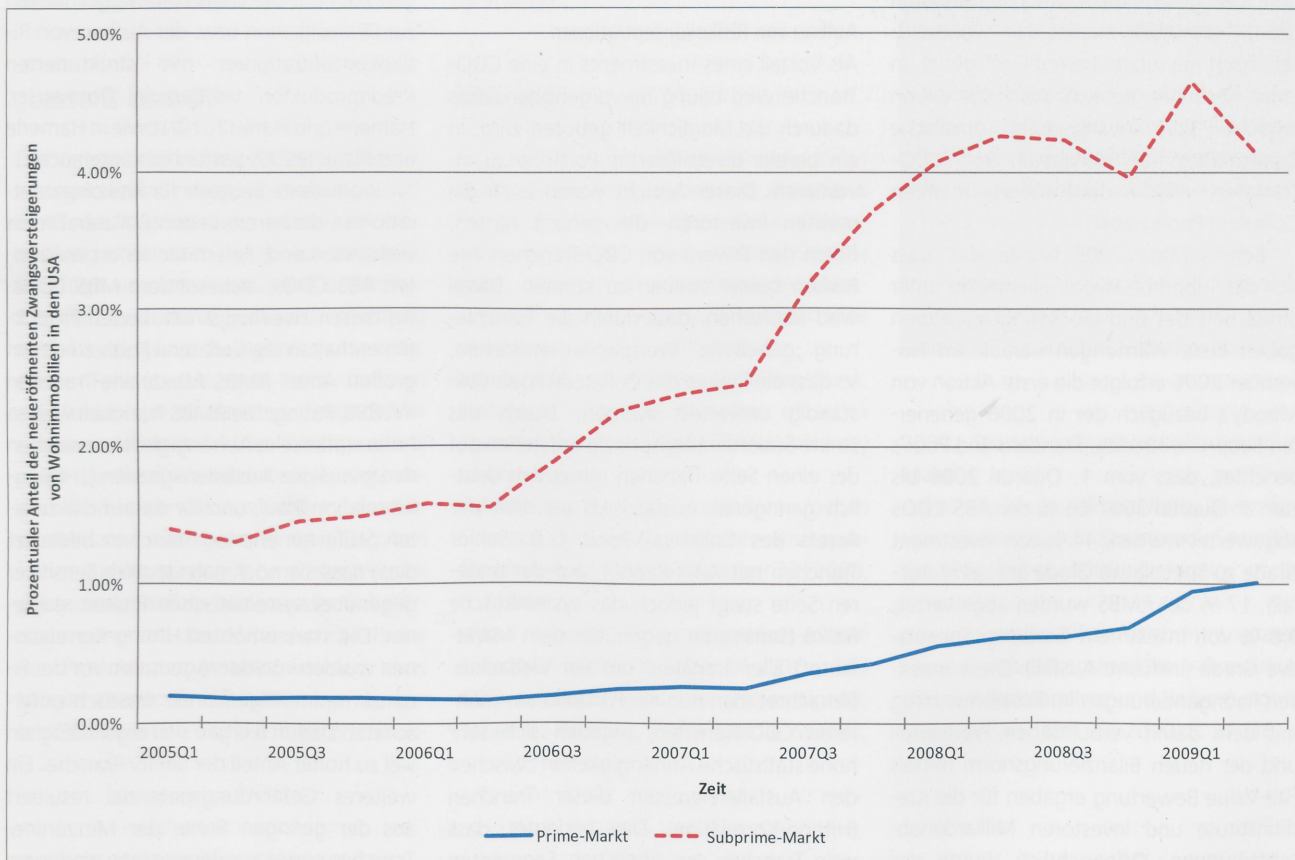
### Drastische Downgrades in schlechten Zeiten

Die erhöhte Sensitivität gegenüber systematischen Risiken ist in guten Zeiten nicht sichtbar. Dies erwies sich im Zusammenhang mit dem Subprime-Segment als besonders tückisch und die Marktteilnehmer wiegten sich lange Zeit in Sicherheit. In einer guten gesamtwirtschaftlichen Situation werden CDO-Tranchen mit höherer Seniorität praktisch nie getroffen. In einem solchen günstigen Szenario haben Änderungen des systematischen Risikofaktors nahezu keine Auswirkungen auf die Wahrscheinlichkeit, dass eine Tranche getroffen wird, bzw. den erwarteten Verlust (Expected Loss) der Tranche, und CDO-Ratings erscheinen als sehr stabil gegenüber makroökonomischen Veränderungen. Dieser Eindruck ist jedoch trügerisch. Gerät der systematische Risikofaktor unter Stress, erweisen sich CDOs (im Gegensatz zu Corporate Bonds) als extrem sensitiv gegenüber einem ökonomischen Abschwung (vgl. Abbildung 5). In diesem kritischen Bereich bewirkt schon eine kleine Änderung des gesamtwirtschaftlichen Umfelds eine dramatische Verschlechterung der Bonität der Tranche. Genau dieses Phänomen ist





7 S&P/Case-Shiller Häuserpreisindex (USA)



8 Prozentualer Anteil der neu eröffneten Zwangsversteigerungen von Wohnimmobilien in den USA  
(1. Quartal 2005 bis 2. Quartal 2009)



## Wichtige Abkürzungen und Begriffe

- ABS** Asset Backed Securities (Kreditverbriefung, siehe eigener Kasten)  
**Arbitrage** Versuch risikolos Gewinne („Free Lunch“) zu erzielen  
**CDO** Collateral Debt Obligation  
**Collateral Pool** Portfolio von Krediten bzw. Forderungen, das die Zahlungsansprüche der Verbriefungstranchen deckt  
**Corporate Bond** Industrielanleihe; von großen Unternehmen emittiert  
**Kreditverbriefung** siehe eigener Kasten  
**Originator** Arrangeur der Verbriefungstransaktion (in der Regel Investmentbanken), der den Collateral Pool zusammenstellt und die Tranchierung durchführt  
**RMBS** Residential Mortgage Backed Securities (Collateral Pool besteht aus in der Regel mehreren Tausend privaten Baufinanzierungen; anschließend Tranchenbildung und Verkauf an Investoren)  
**Spread** Zinsaufschlag gegenüber risikolosen Papieren, z.B. Bundesanleihen  
**SPV** Special Purpose Vehicle (Zweckgesellschaft, in der Regel GmbH; übernimmt den Verkauf an die Investoren)  
**Strukturierung** Zusammenstellung des Collateral Pools und Durchführung der Tranchierung  
**Subprime-Schuldner** Schuldner mit geringer Bonität (Kreditwürdigkeit)

bei der US-Subprime Krise zu beobachten. Als Folge der Absenkung der Kreditverga-bestandards, fallender Häuserpreise und steigender Zinssätze entwickelte sich eine Abwärtsspirale aus steigenden Insolvenzen, Hausverkäufen und sinkenden Preisen und die gesamtwirtschaftliche Situation des US-Immobilienmarkts für wohnwirtschaftlich genutzte Immobilien geriet in einen kritischen Bereich. Als Folge davon ergaben sich zwangsläufig drastische Downgrades von hunderten von CDO-Tranchen, welche diese Kredite in ihren Collateral Pools haben.

Bereits Mitte 2006 wurde klar, dass sich der Subprime-Hypothekenmarkt unter Stress befindet und die Rating-Agenturen gaben erste Warnungen heraus. Im November 2006 erfolgte die erste Aktion von Moody's bezüglich der in 2006 generierten Subprime-Kredite. Standard and Poor's berichtet, dass vom 1. Quartal 2006 bis zum 3. Quartal 2007 66 % der ABS CDOs abgewertet wurden, 44 % von Investment Grade zu Speculative Grade (inklusive Ausfall). 17 % der RMBS wurden abgewertet, 9,8 % von Investment Grade zu Speculative Grade (inklusive Ausfall). Diese massiven Ratingänderungen im Zusammenhang mit dem damit verbundenen Preisverfall und der neuen Bilanzierungsnorm mittels Fair-Value Bewertung ergaben für die Kreditinstitute und Investoren Milliardenabschreibungen. Offensichtlich wurde das Ausmaß potenzieller Verluste durch das Zusammenwirken sinkender Hauspreise in

Kombination mit hohen „Loan-to-Value-Ratios“ (Verhältnis von Kredithöhe zu Verkehrswert der Immobilie) und steigenden Zinssätzen unterschätzt und die Ratings viel zu spät, dann aber innerhalb kürzester Zeit um mehrere Stufen, angepasst.

### Aufbau von Risikokonzentrationen

Als Vorteil eines Investments in eine CDO-Tranche wird häufig hervorgehoben, dass dadurch die Möglichkeit geboten wird, in ein bereits diversifiziertes Portfolio zu investieren. Dieser Ansicht waren auch die meisten Investoren, die gehofft hatten, durch den Erwerb von CDO-Tranchen ihre Risiken besser streuen zu können. Dabei wird übersehen, dass durch die Tranchierung „gehebelte“ Wertpapiere entstehen, so dass die Risiken des Collateral Pools vollständig umverteilt werden. Durch das strikte Subordinationsprinzip entstehen auf der einen Seite Tranchen mit einem deutlich geringeren Ausfallrisiko als dem der Assets des Collateral Pools (z.B. Senior Tranchen mit AAA-Rating), auf der anderen Seite steigt jedoch das systematische Risiko (Sensitivität gegenüber dem Marktfaktor) aller Tranchen um ein Vielfaches. Betrachtet man nun ein Portfolio aus mehreren CDO-Tranchen, ergeben sich sehr hohe statistische Abhängigkeiten zwischen den Ausfallereignissen dieser Tranchen (Hitting-Korrelation). Dies bedeutet, dass viele Tranchen aus ähnlichen Segmenten gleichzeitig oder innerhalb eines kurzen Zeitraums ausfallen bzw. Schäden erleiden

können. Aus diesem Grunde ist beispielsweise ein Portfolio aus BBB-Tranchen verschiedener Verbriefungen mit gleichartigen oder ähnlichen Wertpapieren in den Collateral Pools (z.B. Residential Mortgage Backed Securities, RMBS) viel riskanter als ein Portfolio vergleichbarer Bonds mit demselben Rating. Bei Mehrfachverbriefungen steigt dieses Risiko nochmals an. Statt der angestrebten Diversifikation werden Risikokonzentrationen aufgebaut! Dabei entstehen enorme Klumpenrisiken, die nun im Verlauf der Finanzkrise schlagend werden.

Die hohe Risikokonzentration gilt insbesondere für die Beimischung von strukturierten Kreditprodukten in ein bereits bestehendes Kreditportfolio. Wie im letzten Abschnitt erörtert, treten Schäden bei CDOs praktisch ausschließlich in einem Umfeld sich systematisch verschlechternder Kreditqualität auf, bei dem ohnehin hohe Verluste im Kreditportfolio anfallen. Aufgrund ihrer besonderen Sensitivität bzgl. systematischer Risiken sind Schäden aus CDOs stark korreliert mit hohen Schäden im Kreditportfolio. Die Beimischung von CDOs zu Kreditportfolios führt demnach zu einer deutlichen Erhöhung des Risikos sehr hoher Schäden, die ein Institut schnell in eine bedrohliche Schieflage bringen können. Die limitierten Möglichkeiten zur Diversifikation bzw. der Aufbau von Risikokonzentrationen mit strukturierten Kreditprodukten werden in Donhauser, Hamerle und Plank (2010) sowie in Hamerle und Plank (2009) ausführlich untersucht.

Prominente Beispiele für Risikokonzentrationen, die bereits in den Collateral Pools vorhanden sind, liefern die schon erwähnten ABS CDOs, insbesondere MBS CDOs. Bei diesen zweifach strukturierten Produkten enthalten die Collateral Pools zu einem großen Anteil RMBS Mezzanine-Tranchen mit BBB-Rating. Die RMBS Tranchen weisen hohe statistische Abhängigkeiten zwischen den jeweiligen Ausfallereignissen („Hitting-Korrelation“) auf, und für die auf der zweiten Stufe generierten Tranchen bedeutet dies, dass sie nochmals deutlich sensibler gegenüber systematischen Risiken reagieren. Die stark erhöhten Hitting-Korrelationen wurden von den Agenturen vor der Finanzkrise im Allgemeinen drastisch unterschätzt. Dadurch ergab sich regelmäßig ein viel zu hoher Anteil der Senior-Tranche. Ein weiteres Gefährdungspotential resultiert aus der geringen Breite der Mezzanine-Tranchen sowie aus deren relativ niedrigem Niveau der Subordination, d.h. des Kapitalpuffers (zwischen 3 und 5 %). Die steigen-



den Ausfallraten bei den Subprime-Krediten in Kombination mit sinkenden Recovery Rates (Erlösquoten bei Verwertung der Sicherheiten) können zur Folge haben, dass in den ursprünglichen RMBS die BBB Mezzanine-Tranchen Schäden erleiden. Aufgrund der extremen Korrelation werden dann mit hoher Wahrscheinlichkeit innerhalb kurzer Zeit alle BBB Tranchen von Subprime RMBS getroffen. Darüber hinaus werden sie wegen ihrer geringen Breite mit hoher Wahrscheinlichkeit während derselben Zeitperiode oder mit kurzer zeitlicher Verzögerung alle einen Totalschaden erleiden. Dieses Szenario hat dann zur Konsequenz, dass auch die Seniortranchen der Subprime MBS CDOs ausfallen. Damit weisen diese Subprime CDOs ein „All or Nothing“-Risikoprofil auf: Entweder bleiben die Subprime-Ausfallraten unter den entsprechenden Schwellenwerten und die Seniortranchen der Subprime CDOs bleiben unversehrt oder die Schwellenwerte werden durchbrochen mit der Folge, dass auch die Seniortranchen ausfallen können mit den entsprechenden dramatischen Verlusten für die Investoren. Dies ist einer der Gründe, weshalb gegenwärtig (Frühjahr 2010) noch keine genauen Prognosen über die tatsächlich zu erwartenden Verluste in diesem Segment möglich sind.

## „Lessons Learnt“

Die Verbriefungsmärkte haben sich binnen weniger Jahre zu einem bedeutenden Segment des Kapitalmarkts entwickelt. Verbriefung stellt auch heute ein volkswirtschaftlich sinnvolles Instrument des Risikotransfers und der Eigenkapitalentlastung dar. Allerdings ist zwingend notwendig, einige Fehlentwicklungen einzudämmen und Fehlanreize zu eliminieren. Für die Arrangeure der strukturierten Kreditprodukte muss das Geschäftsmodell schleunigst abgestellt werden, das aus hohem Fremdkapitaleinsatz (Leverage) und dem Eingehen hoher Risiken einerseits und der Weitergabe dieser Risiken andererseits hohe Erträge generiert. Dazu müssen die Preise der Produkte so gestaltet werden, dass Möglichkeiten zur CDO-Arbitrage ausgeschlossen werden. Für die Investoren müs-

sen die Grundsätze „Know your risk“ und „If you can't value a security, don't buy it and don't sell it“ wieder in den Vordergrund gerückt werden. Sie dürfen sich nicht „blind“ auf die Ratings verlassen. Die Komplexität der Produkte und die Intransparenz der Produkteigenschaften sind abzubauen, die Informationsasymmetrien sind zu beseitigen und es sollten nur noch solche Papiere zugelassen werden, die einen für alle Marktteilnehmer nachvollziehbaren Standardisierungsgrad aufweisen, so dass die Finanztitel auch von den Investoren eigenständig bewertet werden können. Die Arrangeure müssen dazu verpflichtet werden, einen gewissen Prozentsatz jeder Tranche (und nicht nur des First Loss Piece) einzubehalten. Schließlich ist dringend geboten, eine straffere aufsichtliche Regulierung der Eigenkapitalvorschriften im Rahmen einer international harmonisierten Bankenaufsicht mit einer deutlichen Erhöhung der geforderten Eigenkapitalquoten für strukturierte Kreditprodukte durchzusetzen. Alle getroffenen Maßnahmen müssen darauf ausgerichtet sein, das Vertrauen und die Stabilität wieder herzustellen und den Verbriefungsmarkt für Banken und Investoren wieder überschaubar und attraktiv zu machen.

## Literatur

*Martin Donhauser, Alfred Hamerle, Kilian Plank*, Quantifying Systematic Risks in a Portfolio of Collateralised Debt Obligations, In: Daniel Rösch, Harald Scheule (Eds.), Model Risk – Identification, Measurement and Management, London: Incisive Media, 2010, S. 457–488.

*Alfred Hamerle, Andreas Igl, Kilian Plank*, Systematic Risk and Valuation of Index Tranches, Working Paper, 2010, University of Regensburg.

*Alfred Hamerle, Rainer Jobst, Hans-Jochen Schropp*, CDOs versus Anleihen: Risikoprofile im Vergleich, Risiko-Manager 22–2008, S. 1–14.

*Alfred Hamerle, Thilo Liebig, Hans-Jochen Schropp*, Systematic Risk of CDOs and CDO Arbitrage. Discussion Paper No 13, Series 2: Banking and Financial Studies,



Prof. Dr. **Alfred Hamerle**, geb. 1947; Studium der Mathematik an der LMU München, Diplom 1972; Promotion 1975 und Habilitation 1981 an der Universität Regensburg; ab 1982 Professuren für Statistik und Ökonometrie an den Universitäten Konstanz und Tübingen; seit 1992 Inhaber des Lehrstuhls für Statistik an der Fakultät Wirtschaftswissenschaften der Universität Regensburg; Ablehnung eines Rufes auf eine Professur für Ökonometrie und Statistik an der Universität Münster 1998.

**Forschungsschwerpunkte:** Empirische Kapitalmarktforschung; Quantitative Methoden des Risikomanagements; Bewertung und Risikomanagement von Strukturierten Produkten; Entwicklung dynamischer Kreditrisikomodelle

2009, Deutsche Bundesbank, Frankfurt/Main.

*Alfred Hamerle, Kilian Plank*, Diversification Potentials of Structured Securities. Working Paper, 2009, University of Regensburg.

*Alfred Hamerle, Kilian Plank*, Intransparenzen auf Verbriefungsmärkten – Auswirkungen auf Risikoanalyse und Bewertung. Informatik Spektrum 33, 2010, S. 27–36.



# Bildnachweis

Alle Autorenfotos mit Ausnahme des Fotos von Christoph Wagner (Privatarchiv): Axel Roitzsch, Universität Regensburg, Referat II/2. Die Titelbildcollage wurde aus Abbildungen der einzelnen Beiträge erstellt.

## Warum Vergessen wichtig ist

Karl-Heinz T. Bäuml

1–7 Karl-Heinz T. Bäuml

## Blicke ins »Buch« der Natur

Edith Feistner  
Christoph Wagner

- 1, 3, 5–8 Heidelberg, Universitätsbibliothek (mit freundlicher Druckgenehmigung)  
2 Zitiert nach W. Sudhoff, *Die Lehre von den Hirnventrikeln in textlicher und graphischer Tradition des Altertums und Mittelalters*, Leipzig: Barth, 61  
4, 9 München, Bayerische Staatsbibliothek (Bildarchiv, Institut für Kunstgeschichte der Universität Regensburg)

## Grüne Supercomputer

Tilo Wettig

- 1–2, 4, 7 Tilo Wettig  
3 [http://www.top500.org/lists/2010/06/performance\\_development](http://www.top500.org/lists/2010/06/performance_development)  
5–6 Manfred Ries (IBM)  
8 <http://www.green500.org/lists/2010/06/top/list.php>

## Inter amicos. Unter Freunden

Inge Kroppenberg

- 1 University of Aberdeen  
2 Foto: Roman März. Mit freundlicher Genehmigung des Künstlers und des Fotografen.

- 3 [www.zeno.org](http://www.zeno.org).  
4 Paris, *Bibliothèque de la Cour de cassation*, 179.  
5 Georg Olms Verlag, Weidmannsche Verlagsbuchhandlung, Hildesheim, Zürich, New York  
6 Inge Kroppenberg; Deutsches Asterix Archiv  
7 Foto: Gunnar Bach Pedersen, Thorvaldsens Museum, Kopenhagen  
8 Museo Nazionale Romano, Rom

## Klimawandel, Bevölkerungsexplosion und Ressourcenverbrauch

Josef Löffl

- 1 <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/15/Roman-Empire-Augustus.png> <Stand: 19.Juli 2010>  
2–5 Autor

## Die Chemie muss stimmen

Joachim Ruther

- 1, 3, 5 Joachim Ruther  
2 <http://view.stern.de/de/picture/Makro-Insekt-K%E4fer-Mai-Maik%E4fer-Karl-Maik%E4fer-1419981.html>  
4 Markus Koch, Universität Bonn

## Volkskrankheit altersabhängige Makuladegeneration (AMD)

Ulrike Friedrich, Lars G. Fritsche, Bernhard H.F. Weber

- 1–2 Darstellung der Verfasser  
3 Fotos: Dr. Claudia von Strachwitz, Universitäts-Augenklinik Würzburg

## „Giftmüll-Papiere“ und Finanzkrise

Alfred Hamerle

- 1 *Inside Mortgage Finance*, Morgan Stanley. Zitiert nach D. Greenlaw, J. Hatzius, A. Kashyap und Y.S. Shin, „Leverage Losses: Lessons from the Mortgage Market Meltdown“, U.S. Monetary Policy Forum Report No. 2, Chicago 2008, online verfügbar unter <http://faculty.chicagobooth.edu/anil.kashyap/research/MPFReport-final.pdf>, abgerufen am 01.06.2010  
2 Schlagzeile im Handelsblatt vom 13.08.2007, online verfügbar unter <http://www.handelsblatt.com/finanzen/anlagestrategie/strukturierter-giftmuell-im-depot;1307495>, abgerufen am 06.07.2010  
3 Darstellung des Verfassers  
4 Darstellung des Verfassers  
5 Berechnungen des Verfassers  
6 Securities Industry and Financial Markets Association (SIFMA) (2008, 2009, 2010): *Global CDO Market Issuance Data*, online verfügbar unter <http://www.sifma.org/research/global-cdo.html>, abgerufen am 01.06.2010  
7 Standard & Poor's (2010): *S&P/Case-Shiller Home Price Indices*, online verfügbar unter [www.standardandpoors.com/indices/sp-case-shiller-home-price-indices](http://www.standardandpoors.com/indices/sp-case-shiller-home-price-indices), abgerufen am 01.06.2010. Berechnungen des Verfassers  
8 Mortgage Bankers Association (2009): *National Delinquency Survey – Q209*, online verfügbar unter <http://www.courier-journal.com/blogs/money/MBA%20survey%20delinquencies%20Q09.pdf>, abgerufen am 01.06.2010



den Ausfallraten bei den Subprime-Krediten in Kombination mit sinkenden Recovery Rates (Erlösquoten bei Verwertung der Sicherheiten) können zur Folge haben, dass in den ursprünglichen RMBS die BBB Mezzanine-Tranchen Schäden erleiden. Aufgrund der extremen Korrelation werden dann mit hoher Wahrscheinlichkeit innerhalb kurzer Zeit alle BBB Tranchen von Subprime RMBS getroffen. Darüber hinaus werden sie wegen ihrer geringen Breite mit hoher Wahrscheinlichkeit während derselben Zeitperiode oder mit kurzer zeitlicher Verzögerung alle einen Totalschaden erleiden. Dieses Szenario hat dann zur Konsequenz, dass auch die Seniortranchen der Subprime MBS CDOs ausfallen. Damit weisen diese Subprime CDOs ein „All or Nothing“-Risikoprofil auf: Entweder bleiben die Subprime-Ausfallraten unter den entsprechenden Schwellenwerten und die Seniortranchen der Subprime CDOs bleiben unversehrt oder die Schwellenwerte werden durchbrochen mit der Folge, dass auch die Seniortranchen ausfallen können mit den entsprechenden dramatischen Verlusten für die Investoren. Dies ist einer der Gründe, weshalb gegenwärtig (Frühjahr 2010) noch keine genauen Prognosen über die tatsächlich zu erwartenden Verluste in diesem Segment möglich sind.

## „Lessons Learnt“

Die Verbriefungsmärkte haben sich binnen weniger Jahre zu einem bedeutenden Segment des Kapitalmarkts entwickelt. Verbriefung stellt auch heute ein volkswirtschaftlich sinnvolles Instrument des Risikotransfers und der Eigenkapitalentlastung dar. Allerdings ist zwingend notwendig, einige Fehlentwicklungen einzudämmen und Fehlanreize zu eliminieren. Für die Arrangeure der strukturierten Kreditprodukte muss das Geschäftsmodell schleunigst abgestellt werden, das aus hohem Fremdkapitaleinsatz (Leverage) und dem Eingehen hoher Risiken einerseits und der Weitergabe dieser Risiken andererseits hohe Erträge generiert. Dazu müssen die Preise der Produkte so gestaltet werden, dass Möglichkeiten zur CDO-Arbitrage ausgeschlossen werden. Für die Investoren müs-

sen die Grundsätze „Know your risk“ und „If you can't value a security, don't buy it and don't sell it“ wieder in den Vordergrund gerückt werden. Sie dürfen sich nicht „blind“ auf die Ratings verlassen. Die Komplexität der Produkte und die Intransparenz der Produkteigenschaften sind abzubauen, die Informationsasymmetrien sind zu beseitigen und es sollten nur noch solche Papiere zugelassen werden, die einen für alle Marktteilnehmer nachvollziehbaren Standardisierungsgrad aufweisen, so dass die Finanztitel auch von den Investoren eigenständig bewertet werden können. Die Arrangeure müssen dazu verpflichtet werden, einen gewissen Prozentsatz jeder Tranche (und nicht nur des First Loss Piece) einzubehalten. Schließlich ist dringend geboten, eine straffere aufsichtliche Regulierung der Eigenkapitalvorschriften im Rahmen einer international harmonisierten Bankenaufsicht mit einer deutlichen Erhöhung der geforderten Eigenkapitalquoten für strukturierte Kreditprodukte durchzusetzen. Alle getroffenen Maßnahmen müssen darauf ausgerichtet sein, das Vertrauen und die Stabilität wieder herzustellen und den Verbriefungsmarkt für Banken und Investoren wieder überschaubar und attraktiv zu machen.

## Literatur

*Martin Donhauser, Alfred Hamerle, Kilian Plank*, Quantifying Systematic Risks in a Portfolio of Collateralised Debt Obligations, In: Daniel Rösch, Harald Scheule (Eds.), *Model Risk – Identification, Measurement and Management*, London: Incisive Media, 2010, S. 457–488.

*Alfred Hamerle, Andreas Igl, Kilian Plank*, Systematic Risk and Valuation of Index Tranches, Working Paper, 2010, University of Regensburg.

*Alfred Hamerle, Rainer Jobst, Hans-Jochen Schropp*, CDOs versus Anleihen: Risikoprofile im Vergleich, *Risiko-Manager* 22–2008, S. 1–14.

*Alfred Hamerle, Thilo Liebig, Hans-Jochen Schropp*, Systematic Risk of CDOs and CDO Arbitrage. Discussion Paper No 13, Series 2: Banking and Financial Studies,



Prof. Dr. **Alfred Hamerle**, geb. 1947; Studium der Mathematik an der LMU München, Diplom 1972; Promotion 1975 und Habilitation 1981 an der Universität Regensburg; ab 1982 Professuren für Statistik und Ökonometrie an den Universitäten Konstanz und Tübingen; seit 1992 Inhaber des Lehrstuhls für Statistik an der Fakultät Wirtschaftswissenschaften der Universität Regensburg; Ablehnung eines Rufes auf eine Professur für Ökonometrie und Statistik an der Universität Münster 1998.

**Forschungsschwerpunkte:** Empirische Kapitalmarktforschung; Quantitative Methoden des Risikomanagements; Bewertung und Risikomanagement von Strukturierten Produkten; Entwicklung dynamischer Kreditrisikomodelle

2009, Deutsche Bundesbank, Frankfurt/Main.

*Alfred Hamerle, Kilian Plank*, Diversification Potentials of Structured Securities. Working Paper, 2009, University of Regensburg.

*Alfred Hamerle, Kilian Plank*, Intransparenzen auf Verbriefungsmärkten – Auswirkungen auf Risikoanalyse und Bewertung. *Informatik Spektrum* 33, 2010, S. 27–36.

