II.
Leibniztag

Öffentliche Wissenschaftliche Sitzung
am 2. Juli 2004
im Akademiegebäude am Gendarmenmarkt

Preisverleihung

Der Präsident der Akademie eröffnete die wissenschaftliche Sitzung und erteilte Herrn Montada das Wort.

Vorstellung der Preisträger durch den Vorsitzenden der Preisträgerfindungskommission, Leo Montada

Fünf Preise waren ausgeschrieben. Die ordentlichen Mitglieder aller deutschen Akademien waren um Nominationen gebeten worden. Insgesamt wurden 58 Vorschläge eingereicht, die sich fachlich über alle fünf Klassen der Akademie verteilten. Der Findungskommission gehörten satzungsgemäß je ein Mitglied aus jeder Klasse an: Susan Neiman, Leo Montada, Jochen Brüning, Theodor Hiepe und Heinz Duddeck.
Die Kommission hatte viele herausragende Kandidatinnen und Kandidaten zu würdigen. Die Preisträger, die Akademie und die Stifter der Preise können sicher sein, daß der Wettbewerb exzellent besetzt war. Die Vorschläge der Kommission wurden von Vorstand und Versammlung gebilligt.

Die Akademiepreise des Jahres 2004 werden wie folgt vergeben:

Der Akademiepreis
der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften
wird verliehen an
Professor Dr. Frédéric Merkt
für seine Arbeiten zur Messung von Eigenschaften elektronisch hoch angeregter Zustände von Atomen und Molekülen (sogenannte Rydbergzustände).
Frédéric Merkt, Jahrgang 1966, wurde nach dem Studium der Chemie an der ETH Zürich 1992 an der University of Cambridge, UK, promoviert. Zwischen 1992 und 1995 folgten Forschungstätigkeiten in Paris, Stanford und Oxford. Im Jahre 1995 wurde er Assistenzprofessor an der ETH Zürich, wo er 1998 als Ordinarius für Physikalische Chemie berufen wurde.
Frédéric Merkt hat ein Lasersystem entwickelt, das als Durchbruch in der Elektronenspektroskopie gewertet wird, weil damit detaillierte Informationen über

Molekülionen zu gewinnen sind. Erstmals konnten das für die Astrophysik wichtige Ammoniumradikal und das für die Atmosphärenchemie wichtige Methanradikalkation bestimmt werden. Weitere bedeutende Anwendungen betreffen die Vermessung mehrerer Kationen von Edelgasen. – In neuester Zeit hat er ein Verfahren zur Erzeugung und Untersuchung organischer Radikalkationen in Überschallstrahlen vorgestellt.
Frédéric Merkt hat in jungen Jahren Bedeutendes geleistet und internationale Visibilität gewonnen. Seine Leistungen sind mit dem *Werner-Preis* der Schweizerischen Chemischen Gesellschaft und dem *Nationalen Latsis-Preis* gewürdigt worden.

Der Preis der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften,
gestiftet vom Verlag de Gruyter,
wird verliehen an
Professor Dr. Ulrich Mayr

für seine Grundlagenforschung zur Regulation von Handlungsplänen und anderen mentalen Sets oder Einstellungen.
Ulrich Mayr, geb. 1961, wurde nach dem Studium der Psychologie 1992 an der FU Berlin promoviert. Zwischen 1992 und 2000 hatte er Forschungspositionen am Max-Planck-Institut für Bildungsforschung in Berlin, an der University of Oregon und an der Universität Potsdam inne. Im Jahre 2000 erfolgte die Habilitation an der Universität Potsdam. Im gleichen Jahr wurde er als Associate Professor an die University of Oregon berufen.
Seine Forschungen auf dem Gebiet der Kognitiven Psychologie widmen sich der Frage, wie Pläne und mentale Sets aufrechterhalten, ab- oder umgestellt werden und wie sie sich gegenseitig beeinflussen. Sind die Steuerungsprozesse nur als bewußte Entscheidungen anzusehen oder ist eine cerebrale Mechanik der Steuerung zu identifizieren? Ulrich Mayr hat hierzu ein neues Forschungsparadigma entworfen und auf experimenteller Grundlage eine international viel beachtete Theorie entwickelt, die die bisherige Forschung schlüssig interpretiert und auch das vorhandene neuroanatomische Wissen integriert. Darüber hinaus hat Ulrich Mayr Entwicklungsveränderungen in der Handlungsregulation über die Lebensspanne untersucht und damit die mögliche Anwendungsrelevanz seiner Grundlagenforschung aufgewiesen.
Bereits seine Dissertation wurde mit der *Otto Hahn Medaille* der Max-Planck-Gesellschaft ausgezeichnet. Für seine jüngeren Arbeiten erhielt er den *Charlotte- und Karl-Bühler-Preis* für herausragende junge Wissenschaftler der Deutschen Gesellschaft für Psychologie.

Der Preis der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften,
gestiftet von der Gottlieb Daimler- und Karl Benz-Stiftung,
wird verliehen an
Professor Dr. Stefan Hell
für seine Arbeiten auf dem Gebiet der Fluoreszenz – Mikroskopie.

Stefan Hell, Jahrgang 1962, studierte Physik an der Universität Heidelberg und promovierte dort 1990. In seinem Lebenslauf findet sich für das Jahr 1990 die Eintragung „freie Erfindertätigkeit". Das Erfinden hat er danach nicht gelassen, wohl auch mit derselben geistigen Freiheit betrieben, aber positionell besser abgesichert.

Zwischen 1993 und 2002 hatte er leitende Positionen an Forschungsinstituten in Turku, Oxford und Göttingen inne und habilitierte 1996 an der Universität Heidelberg. Im Anschluß daran forschte er am Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie in Göttingen, wo er 2002 zum Direktor und Leiter der Abteilung NanoBiophotonik ernannt wurde.

Stefan Hell hat die *4 Pi-confokale Mikroskopie* erfunden und patentiert bekommen und wesentliche theoretische und praktische Voraussetzungen für dieses hochaktuelle Gebiet der Physik geschaffen. Hierdurch wurden neue Möglichkeiten der nicht-invasiven biochemischen Erforschung der Zellphysiologie in Nanometerauflösungen eröffnet, die bisher unverstandene Prozesse in der Biochemie und Physiologie der Zellen erforschbar machen.

Seine Arbeiten sind in den letzten Jahren mehrfach mit Wissenschaftspreisen ausgezeichnet worden. Rufe an acht renommierte Universitäten, darunter fünf ausländische, die er alle abgelehnt hat, belegen seine Visibilität und Reputation.

Der Preis der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften,
gestiftet von der Monika Kutzner-Stiftung zur Förderung der Krebsforschung,
wird verliehen an
Professor Dr. Michael Weller
für seine Arbeiten auf dem Gebiet der zellulären und molekularen Neuroonkologie, insbesondere zur Aufklärung der Schwächung des Immunsystems durch maligne Hirntumoren sowie zur Überwindung der Therapieresistenz maligner Hirntumoren mit einer neuen Therapiekonzeption.

Michael Weller, Jahrgang 1962, studierte von 1982 bis 1989 Medizin an der Universität Köln und promovierte dort 1989. Weitere Stationen waren u.a. die Universität Würzburg, das National Institute of Health in Bethesda, USA, das Universitätsspital Zürich und seit 1995 die Neurologische Klinik der Universität Tübingen, wo er 1996 im Fach Neurologie habilitiert wurde. 2002 wurde er dort zum außerplanmäßigen Professor ernannt.

Michael Weller beeindruckt besonders durch die Kombination von onkologischer Klinik, klinischer Forschung, der Organisation von Multi-Center-Studien und grundwissenschaftlicher Forschung. Er hat ein Riesenwerk mit über 300 Publikationen in exzellenten internationalen Zeitschriften vorgelegt. Michael Weller hat inzwischen breite internationale Anerkennung erlangt. Beginnend mit der Dissertation hat er bisher sechs Preise für seine Forschungsarbeiten erhalten.

Der Preis der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften, gestiftet von der Peregrinus Stiftung (Rudolf Meimberg),
wird verliehen an
Professor Dr. Krešimir Nemec
für seine dreibändige Geschichte des kroatischen Romans und das von ihm konzipierte und herausgegebene Lexikon kroatischer Autoren.
Krešimir Nemec, geb. 1953, wurde nach dem Studium der Südslawischen Sprachen und Literatur und der Vergleichenden Literatur 1985 an der Universität Zagreb promoviert und 1991 zum außerordentlichen Professor ernannt. Im Jahre 1996 wurde er dort als Ordinarius für Neuere Kroatische Literatur berufen.
Bestens vertraut mit der deutschen und europäischen Slawistik und Literaturwissenschaft insgesamt, hat Krešimir Nemec die kroatische Literaturgeschichte neu und methodisch innovativ geschrieben und die Poetik der neueren Prosaliteratur auf dem Stand der modernen Textwissenschaft erschlossen.
Er hat die kroatische Literaturwissenschaft aus der Isolation herausgeführt, in den Blickpunkt der europäischen Diskussion gerückt und als Teil der europäischen Kulturentwicklung rekonstruiert.
1999 wurde ihm der Kroatische Nationalpreises für Wissenschaft und der Jahrespreis der Kroatischen Akademie der Wissenschaften und Künste verliehen.

Ansprache des Akademiepreisträgers Frédéric Merkt

Sehr geehrter Herr Präsident, sehr geehrte Mitglieder der Akademie, meine Damen und Herren,
im Namen aller diesjährigen Preisträger danke ich der Akademie für die große Ehre, die Preise der Akademie empfangen zu dürfen. In diesen Auszeichnungen sehe ich sowohl den Ausdruck des Vertrauens in unsere akademischen Entwicklungsperspektiven als auch eine einzigartige Ermutigung, für die wir der Akademie von ganzem Herzen danken.
Im folgenden möchte ich Ihnen einen kurzen, persönlich gefärbten Überblick meines Forschungsfeldes, der hochauflösenden Elektronenspektroskopie geben.
Mein erster Kontakt mit der Spektroskopie fand bei einem Besuch des Musée de l'Horlogerie in der Industriestadt von La Chaux-de-Fonds im schweizerischen Jura statt. In einer Abteilung des Museums über die Zeitmessung erfuhr ich als Kind, daß die Definition der Zeiteinheit auf einer spektroskopischen Messung beruht: 1s entspricht 9'192'361'770 Oszillationsperioden beim Übergang zwischen zwei Hyperfeinstrukturniveaus eines Isotops des Cs Atoms. Im Museum war auch erklärt, wie die Frequenz des Übergangs im Mikrowellenbereich des elektromagnetischen Spektrums liegt, genauso wie Strahlung anderer Frequenzen im visiblen Bereich liegt und als Farbe empfunden werden kann. Die Verbindung zwischen Farbe, Frequenz und Zeit empfand ich als etwas Magisches, und meine erste Vorstellung eines Spektroskopikers war die eines Zauberers, der innerhalb einer Sekunde mehr als neun Milliarden Oszillationen zählen kann.
Während des Chemiestudiums an der ETH Zürich begegnete ich wieder der Spektroskopie, und zwar überall. In der organischen und anorganischen Chemie als essentielle Methode der chemischen Analyse und in der physikalischen Chemie als Methode zur Untersuchung der physikalischen und chemischen Eigenschaften von Molekülen und der Materie. Ein entscheidendes Erlebnis waren die ersten hochauflösenden infrarotspektroskopischen Messungen im Rahmen meiner Diplomarbeit in der Gruppe von Professor Martin Quack: Dort entdeckte ich die hochauflösende Spektroskopie als Königsweg zum Verständnis der Molekülstruktur und Dynamik.
Meine Forschungsgruppe arbeitet heute im vakuumultravioletten Bereich des elektromagnetischen Spektrums und untersucht die elektronische Struktur und Dynamik von Atomen und Molekülen in der Gasphase. Die vakuumultraviolette

Strahlung (oder VUV Strahlung) liegt im kurzwelligen Bereich zwischen 200 nm und den Röntgenstrahlen. In diesem Bereich sind keine Laserlichtquellen kommerziell erhältlich, und ein wesentlicher Bestandteil der Forschungstätigkeit meiner Gruppe besteht in der Entwicklung geeigneter Strahlungsquellen. Im Wellenlängenbereich unterhalb von 105 nm werden spektroskopische Untersuchungen dadurch erschwert, daß keine lichtdurchlässigen Materialen bekannt sind: Lichtquelle, die zu untersuchenden Gasproben und die Detektoren müssen daher in einem einzigen durchgehenden Vakuumsystem integriert werden. Aus diesen Gründen sind die Techniken der hochauflösenden Spektroskopie im vakuumultravioletten Bereich heutzutage weniger entwickelt als in anderen einfacher zugänglichen Wellenlängenbereichen (z. B. Mikrowellen-, Infrarot-, visibler, oder UV-Bereich).

Im Laufe der letzten Jahre hat meine Gruppe sehr schmalbandige, intensive Laserlichtquellen entwickelt, die im Bereich 150 nm–60 nm kontinuierlich abstimmbar sind und ohne die unsere Forschungsarbeiten nicht möglich wären. Mit diesen Lichtquellen untersuchen wir die Wechselwirkung von Atomen und Molekülen mit kurzwelliger Strahlung und versuchen, die Prozesse, die der Absorption solcher Strahlung folgen, möglichst detailliert zu beobachten und theoretisch zu erklären.

Da die Energie einzelner VUV Photonen höher ist als die Energie typischer chemischer Bindungen und die Bindungsenergien von Valenzelektronen, führt die Absorption von VUV Strahlung zu einer Vielfalt von photochemischen und photophysikalischen Folgeprozessen: Ein Molekül kann die absorbierte Strahlung wieder emittieren, in kleinere chemische Bauteile fragmentieren (d. h. dissoziieren), ein Photoelektron aussenden (d. h. ionisieren), oder sowohl ionisieren und dissoziieren.

Die Vielfalt photochemischer Prozesse im VUV Bereich wird seit mehr als hundert Jahren durch Physiker und Chemiker wissenschaftlich untersucht. Bei jedem Fortschritt in der Experimentiertechnik werden neue Erkenntnisse gewonnen. Insbesondere hat die kontinuierliche Verbesserung der spektralen Auflösung von VUV Strahlungsquellen zu einem immer detaillierteren und vollständigeren Verständnis der Photoionisationsdynamik geführt. Bei sehr hoher spektraler Auflösung, wie sie heute möglich ist, können früher kaum beobachtbare Prozesse untersucht werden. Einige der wissenschaftlichen Fragen, die meine Forschungsgruppe beschäftigen, sind zum Beispiel, welche Auswirkungen die Emission eines Photoelektrons auf die Rotationsbewegung eines Moleküls hat, oder welche Rolle die Kernspins bei der Photoionisation spielen.

Einen besonders wichtigen Platz in unserem Forschungsprogramm haben Untersuchungen von elektronisch hochangeregten Zuständen von Atomen und Molekülen, sogenannten Rydbergzuständen, genannt nach dem schwedischen Physiker J. R. Rydberg, der 1889 zur Beschreibung der spektralen Positionen der Linien in elektronischen Spektren von Atomen eine frühe Form der heute als Rydbergformel genannten Gleichung

$$\tilde{\nu}_n = \frac{\mathrm{IE}}{hc} - \frac{R}{(n-\delta)^2} \quad n = 1, 2, 3, 4, \ldots$$

herleitete (n: Hauptquantenzahl, h: Plancksche Konstante, c: Lichtgeschwindigkeit, R: Rydberg-Konstante, δ: Quantendefekt, IE: Ionisierungsenergie des Atoms oder Moleküls, $\tilde{\nu}_n$: Wellenzahl des Übergangs zum Rydbergzustand mit Hauptquantenzahl n).

Die Formel sagt voraus, daß die Spektrallinien unendliche Serien bilden, die bei hohen n-Werten zur Ionisierungsenergie des Atoms oder des Moleküls konvergieren. Als Beispiel zeigt die Abbildung einen Ausschnitt aus dem elektronischen Spektrum von Argon, in dem Übergänge zu Rydbergzuständen mit n = 30–200 erkannt werden können. Solche Spektren enthalten nicht nur wertvolle Informationen über das untersuchte Atom oder Molekül, wie zum Beispiel seine Ionisierungsenergie, sondern sie besitzen auch ästhetische Eigenschaften, die einen zur Bewunderung der erstaunlichen Regelmäßigkeit von Naturgesetzen anregen.

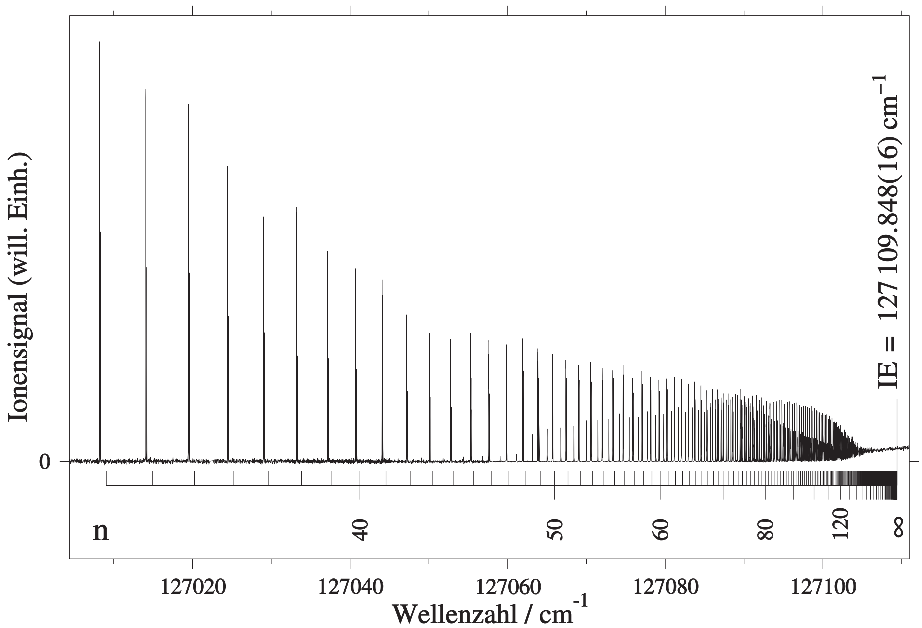


Abb. 1: Ausschnitt aus dem elektronischen Spektrum von Argon. Das Spektrum zeigt die Rydbergserien, die auf die tiefste Ionisationsschwelle konvergieren.

Der Hauptgrund für unser wissenschaftliches Interesse für Rydbergzustände liegt in der großen Abhängigkeit ihrer physikalischen Eigenschaften von der Hauptquantenzahl *n*, die meistens mit einer ganzzahligen Potenz von *n* variieren. Einige wichtige Eigenschaften von Rydbergzuständen, deren Skalierung mit *n*, und numerische Werte für ausgewählte *n*-Werte werden als Illustration in der folgenden Tabelle aufgelistet. Wegen diesen großen *n*-Abhängigkeiten besitzen Rydbergzustände mit hohen *n*-Werten „übertriebene“ Eigenschaften, die sie einerseits zu faszinierenden Objekten der wissenschaftlichen Untersuchung machen und andererseits die Grundlage für mehrere Anwendungen in der Chemie und der Physik bilden.

Eigenschaft	Skalierung	Wert bei			
		$n = 1$	$n = 100$	$n = 200$	$n = 1000$
Mittlerer Radius	$a_0\, n^2$	0.5 Å	0.5 µm	2 µm	50 µm
Bindungsenergie	$-R\, n^{-2}$	13 eV 109735 cm^{-1}	1.3 meV ~ 11 cm^{-1}	0.33 meV ~ 2.7 cm^{-1}	13 µeV ~ 0.1 cm^{-1}
Lebenszeit	$\propto n^3$				
Periode der elektronischen Bewegung	$\tau_1\, n^3$	$1.5 \cdot 10^{-16}$ s	$1.5 \cdot 10^{-10}$ s	$1.2 \cdot 10^{-9}$ s	$1.5 \cdot 10^{-7}$ s
Spektraler Abstand zweier benachbarter Zustände	$2R\, n^{-3}$	~ 10 eV ~ 80000 cm^{-1}	~ 7 GHz ~ 0.2 cm^{-1}	0.8 GHz ~ 0.02 cm^{-1}	~ 7 MHz ~ 0.0002 cm^{-1}
Polarisierbarkeit	$\propto n^7$				
Induziertes Dipolmoment (in Debye)	$\propto n^2$	-	$1.6 \cdot 10^4$	$6.4 \cdot 10^4$	$1.6 \cdot 10^6$

Abb. 2: Physikalische Eigenschaften von Rydbergzuständen und deren *n*-Abhängigkeit. Wenn keine Werte angegeben sind, sind sie atom- oder molekülspezifisch.

Zwei Anwendungen, die in den Forschungsarbeiten meiner Gruppe eine wichtige Rolle spielen, möchte ich kurz vorstellen.
Die erste betrifft die Spektroskopie molekularer Radikale und positiv geladener Ionen: Radikale und Ionen gehören zu den reaktivsten chemischen Verbindungen und sind an der Quelle der meisten chemischen Reaktionen in Medien klei-

ner Materiedichte, wie zum Beispiel den molekularen Wolken im interstellaren Raum, der Atmosphäre der Erde oder anderer Planeten, Plasmen, und Verbrennungszellen. Wegen ihrer hohen Reaktivität, und im Falle der Ionen auch wegen Coulombabstoßungskräften, können sie oft nicht in für spektroskopische Untersuchungen hinreichenden Konzentrationen erzeugt werden. Wegen mangelnden spektroskopischen Daten sind die strukturellen und dynamischen Eigenschaften vieler sehr wichtiger molekularer Ionen heute noch unbekannt.

Zur Untersuchung der Eigenschaften von Kationen nutzen wir die Tatsache, daß hohe Rydbergzustände als molekulare Ionen betrachtet werden können, um die ein Rydbergelektron auf einer weit entfernten Bahn kreist. Rydbergzustände sind sozusagen getarnte „neutrale" Ionen, die ausgehend vom neutralen Grundzustand spektroskopisch untersucht werden können. Unter Verwendung einer sehr kleinen Korrektur, die mit der Bindungsenergie der untersuchten Rydbergzustände zusammenhängt, können die spektroskopischen Eigenschaften von Ionen aus denen der Rydbergzustände zuverlässig, empfindlich und bei hoher spektraler Auflösung ermittelt werden. Da neutrale Moleküle in Konzentrationen erzeugt werden können, die diejenigen von geladenen Molekülen um mehrere Zehnerpotenzen übersteigen, ergibt sich eine riesige Erhöhung der Empfindlichkeit. Mit dieser Methode konnte meine Gruppe neue Erkenntnisse über mehrere wichtige und bisher kaum charakterisierte molekulare Kationen gewinnen, wie zum Beispiel CH_4^+, NH_2^+, CH_2^+, O_3^+ und $C_2H_4^+$.

Die zweite Anwendung, die ich aus Zeitgründen nur erwähnen kann, liegt im Bereich der Atom- und Moleküloptik, und hat zum Ziel, die translatorische Bewegung von Atomen und Molekülen experimentell zu kontrollieren, zum Beispiel um Atom- und Molekülstrahlen abzulenken, zu fokussieren, zu verlangsamen oder zu beschleunigen. Genauso wie Strahlen von Atomen mit einem magnetischen Dipolmoment in einem inhomogenen Magnetfeld abgelenkt werden können, wie im berühmten Experiment von Stern und Gerlach, kann die Bewegung von Atomen und Molekülen mit einem elektrischen Dipolmoment in einem inhomogenen elektrischen Feld kontrolliert werden.

Wegen den sehr großen, von Feldern induzierten Dipolmomenten (siehe Abb. 2) kann die translatorische Bewegung von Atomen und Molekülen in Rydbergzuständen besonders effizient beeinflußt werden. Meine Gruppe konnte Strahlen von Rydbergatomen mit dieser Methode bremsen. Obwohl der Stand der Forschung auf diesem Gebiet noch auf der Stufe der Verifizierung erster Prinzipien liegt, zeichnen sich vielversprechende Möglichkeiten ab, wie zum Beispiel die Erzeugung ultrakalter Proben von Gasphasenmolekülen.

Zum Schluß möchte ich allen ehemaligen und gegenwärtigen Mitgliedern meiner Forschungsgruppe danken, ohne die die vorgestellten Arbeiten nicht hätten durchgeführt werden können: Prof. R. Signorell, Dr. H. Palm, Dr. A. Osterwalder, Dr. U. Hollenstein, Dr. M. Sommavilla, Dr. A. Wüest, Dr. R. Seiler, Dr. M. Schäfer, Dr. B. Brupbacher-Gatehouse, Dr. P. Rupper, Dr. G. M. Greetham, Dr. X. Qian, Dr. H. Cruse, E. Vliegen, H. J. Wörner, M. Raunhardt, O. Zehnder, A. von der Schulenburg, Th. Paul, H. Schmutz, M. Andrist, R. Gunzinger und I. Müller. Ich danke auch Prof. T. P. Softley (Oxford), Dr. Ch. Jungen (Orsay), Prof. J. M. Dyke (Southampton), Dr. S. T. Pratt (Argonne) und Prof. W. Ubachs (Amsterdam) und deren Forschungsgruppen für die wichtigen Beiträge zu unseren Forschungsarbeiten. Der ETH und dem Schweizerischen Nationalfonds danke ich für die Finanzierung unserer Arbeiten. Meiner Frau, meinen Kindern und meinen Eltern danke ich für die Unterstützung. Ich danke Ihnen für Ihre Aufmerksamkeit.

Vergabe des Akademiestipendiums 2004

Laudatio Etienne François, Mitglied der Stipendienkommission

Das diesjährige Akademiestipendium der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften erhält Herr Dr. Cornel Zwierlein, der am 12. Juli des vorigen Jahres (2003) an der Philosophischen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München mit *summa cum laude* promoviert wurde. Die Auswahlkommission und die Akademie gratulieren Ihnen dazu ganz herzlich.

Der erste Grund für unsere Entscheidung liegt in der außergewöhnlichen Qualität wie auch in der vorbildlichen Internationalität und Pluridisziplinarität des Werde- und Studiengangs von Cornel Zwierlein. Nach einem mit der bestmöglichen Note, d. h. mit 1,0 bestandenen Abitur studierte Cornel Zwierlein zuerst Geschichtswissenschaft, ein Studium, das er im übrigen 1997 mit einer französischen „maîtrise“ an der Universität Tours abschloß. Parallel dazu studierte er an der Ludwig-Maximilians-Universität Germanistik, Griechische Philologie und Theaterwissenschaft und schloß dieses Studium 1998 mit einer Magisterarbeit ab, die gleichfalls die beste Note bekam; darüber hinaus studierte er Jura und legte 1999 die erste juristische Staatsprüfung ab (wobei er zu den zwei Prozent besten Absolventen in Bayern gehörte). Für seine unmittelbar danach begonnene Promotion entschloß er sich für ein Verfahren, das ihm ermöglichen würde, weiterhin pluridisziplinär und international zu arbeiten, nämlich eine sogenannte „co-tutelle“ de thèse, die er in Tours und München absolvierte. Ich fasse zusammen: das Studium von fünf unterschiedlichen Disziplinen, drei Abschlüsse, eine Dissertation unter Doppelbetreuung, die gerade noch vor seinem 30. Geburtstag abgeschlossen wurde, darüber hinaus eine beneidenswerte Sprachgewandtheit (Deutsch, Englisch, Französisch, Italienisch, Latein, Griechisch) wie auch die fördernde Unterstützung der Studienstiftung des deutschen Volkes, der Gerda-Henkel-Stiftung und des Deutschen Historischen Instituts Paris – wer könnte noch bei einem solchen Beispiel behaupten, es gäbe in Deutschland keine erfolgreiche Eliteausbildung und Begabtenförderung?

Die hervorragende Qualität der Dissertation von Cornel Zwierlein liefert den zweiten Grund für die Entscheidung unserer Akademie. Diese Dissertation trägt folgenden Titel: *Discorso und Lex: die Entstehung neuer Denkrahmen im 16. Jahrhundert und die Wahrnehmung der französischen Religionskriege in*

Italien und Deutschland – Discorse et lex: la genèse de nouveaux cadres de pensée au XVIe siècle et la perception des guerres de religion en Italie et en Allemagne. Als Gutachter und Mitglied der Promotions-Kommission habe ich mich mit dieser Arbeit näher befaßt, und obwohl Cornel Zwierlein seinen Lesern die Arbeit nicht immer leicht gemacht hat (seine Dissertation umfaßt 965 eng geschriebene Seiten), muß ich zugeben, daß sie mich fasziniert hat und daß die Lektüre von Beginn bis zum Ende spannend war.

Dies liegt zuerst an der Originalität eines Ansatzes, der sich an der Schnittstelle zwischen politischer Geschichte und Kommunikationsgeschichte, Kirchengeschichte und Begriffsgeschichte befindet. Dies liegt auch daran, daß es sich hier um eine anspruchsvolle Untersuchung handelt, die nicht nur beschreiben (wie wurden die französischen Unruhen wahrgenommen?), sondern auch vor allem erklären will: es gilt nicht nur zu zeigen, wie die Religionskriege wahrgenommen, sondern auch warum sie in Italien und Deutschland (am Beispiel von Piemont und der Kurpfalz) anders wahrgenommen und interpretiert wurden. Um das zu beantworten, greift Cornel Zwierlein auf kommunikationstheoretische Ansätze zurück und weist nach, daß dabei drei Faktoren entscheidend waren: die Entwicklung der Kommunikationsstrukturen (mit einem deutlichen Vorsprung von Italien auf diesem Gebiet), die Entstehung des frühmodernen souveränen Staates (wobei im deutschen Falle die Reichsverfassung ganz andere Voraussetzungen als im italienischen Falle schuf) und die Konfessionalisierung. Dadurch gelingt es der Untersuchung, einen wichtigen Beitrag zu einem neuen Verständnis des Wandels des politischen Diskurses und der politischen Praxis in Europa im 16. Jahrhundert zu leisten. Darüber hinaus bietet diese Arbeit das gelungene Beispiel einer fruchtbaren Verbindung zwischen Philologie und Theorie: mit Niklas Luhmann auf der einen Seite und der akribischen Arbeit an den Quellen auf der anderen Seite (die *eruditio* im besten Sinne des Wortes) hat Cornel Zwierlein ein Werk hervorgebracht, das sich sowohl in die Philologie, die Soziologie und die Theologie als auch in die Rechts-, Wissenschafts-, Begriffs-, Politik- und Sozialgeschichte einordnen läßt. Schließlich ist diese Arbeit eine genuin europäische und transnationale Arbeit, die Europa als Kommunikations- und Verflechtungsraum analysiert und sich deswegen auch als besonders innovativ erweist, weil sie so aktuelle Themenfelder wie Politikberatung und das Verhältnis zwischen Wissenschaft und Expertise anspricht.

Der dritte Grund für unsere Entscheidung ist schließlich im neuen Forschungsprojekt von Cornel Zwierlein zu suchen. Dieses Projekt mit dem Titel „Rom und die französischen Religionskriege, 1572–1589“ stellt eine Vertiefung und Erweiterung der Dissertation dar. Im Zentrum des Projekts steht die kritische Edition und die Kontextualisierung von drei Quellen dieser Zeit, die alle drei eine Teilantwort auf die gleiche Frage geben: warum wurde das gleiche Ereignis

– hier die Bartholomäusnacht – anders wahrgenommen und anders gedeutet, und welche Konsequenzen ergaben sich aus diesen unterschiedlichen Wahrnehmungen und Deutungen für das konkrete Handeln der Akteure dieser Zeit? Dieses Projekt hat uns um so mehr überzeugt, als Cornel Zwierlein – bei aller Gelehrsamkeit und Theoriefreudigkeit – kein trockener und weltabgewandter Wissenschaftler ist, sondern ein vielseitig engagierter Mensch, bei welchem die reflexive Arbeit nicht zu trennen ist vom konkreten Engagement und der aktiven Mitarbeit in der Gegenwart, in- und außerhalb der Universität: seine Mitgliedschaft in Chören und studentischen Laientheatergruppen in Köln, Prag und Glasgow (mit von ihm geschriebenen Stücken), seine Tätigkeit als Mitorganisator des „Forums München", eines Aktivitätenkreises von Studienstiftlern für Studienstiftler, oder noch die aktive Rolle, die er bei der Tagung zur Zukunft des Geschichtsstudiums in Europa, die hier in Berlin im WZB Mitte Juni stattfand, sind nur einige Beispiele in dieser Hinsicht.

Zum Schluß sei mir noch ein letzter Satz erlaubt: Unsere Akademie ist glücklich, lieber Cornel Zwierlein, in Ihnen einen Nachwuchswissenschaftler gefunden zu haben, der in idealer Weise den Erwartungen des Akademie-Stipendiums entspricht. Sie ist froh, Ihnen in Ihrer Weiterentwicklung helfen zu können und wünscht Ihnen dabei viel Erfolg und weiterhin viel Freude an neuen Entdeckungen.

Vorstellung neuer Akademiemitglieder durch den 1. Vizepräsidenten, Detlev Ganten

Die Zuwahl neuer Mitglieder ist ein entscheidendes Element des Fortbestandes und der weiteren Entwicklung in formaler und natürlich besonders in inhaltlicher Hinsicht. Zuwahlen sind daher für unsere Akademie von ganz besonderer Bedeutung.

Im Berichtsjahr Juni 2003 bis Juli 2004 wurden fünf ordentliche Mitglieder und zwei außerordentliche Mitglieder in die Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften gewählt. Der Akademie gehören damit 151 ordentliche und 38 entpflichtete ordentliche Mitglieder, 68 außerordentliche Mitglieder sowie ein Ehrenmitglied an; 20 Mitglieder sind Frauen.

Akademien werden zumindest von außen vielleicht nicht als „Club der toten Götter“ aber doch als Versammlung alter Männer und Frauen angesehen. Das Durchschnittsalter der ordentlichen Mitglieder beträgt 58,0 Jahre, das aller Mitglieder zusammen liegt bei 62,2 Jahren. Wenn wir die junge Akademie einbeziehen würden, würde unser Durchschnittsalter natürlich wesentlich sinken. Wir achten aber die Unabhängigkeit unserer jungen Akademie und wollen sie daher nicht für statistische Verjüngungszwecke mißbrauchen. Nach Vollendung des 68. Lebensjahres werden die ordentlichen Mitglieder von ihren Pflichten entbunden. Ihre Rechte, einschließlich des Stimmrechts in der Versammlung der Akademiemitglieder, bestehen, mit Ausnahme des passiven Wahlrechts und des aktiven Wahlrechts bei der Wahl neuer Mitglieder, unverändert fort.

Die Akademie wählt ihre Mitglieder aus dem gesamten Bundesgebiet, aber auch aus dem Ausland. Derzeit kommen 110 Mitglieder aus Berlin und Brandenburg, 123 aus anderen Bundesländern und 24 aus dem Ausland.

Die Akademie wählt ihre Mitglieder aus allen Wissenschaftsgebieten. Die Verteilung der ordentlichen nicht entpflichteten Mitglieder nach Klassen ergibt folgendes Bild:

Geisteswissenschaften: 29
Sozialwissenschaften: 24
Mathematik-Naturwissenschaften: 41
Biowissenschaften-Medizin: 34
Technikwissenschaften: 23.

Jutta Allmendinger, seit 2003 Direktorin des Instituts für Arbeitsmarkt und Berufsforschung in Nürnberg, hat in Mannheim Soziologie und Sozialpsychologie studiert. Sie absolvierte ein Graduiertenstudium der Soziologie, Volkswirtschaftslehre und Statistik an der University of Wisconsin at Madison und an der Harvard University, das sie 1989 mit dem Ph.D. in Harvard abschloß. 1993 habilitierte sie sich an der Freien Universität in Berlin. Ihre beruflichen Tätigkeiten führten sie vom Zentrum für Umfragen, Methoden und Analysen in Mannheim über die Harvard Business School, den Sonderforschungsbereich „Mikroanalytische Grundlagen der Sozialpolitik" der Universitäten Mannheim und Frankfurt/Main an das Max-Planck-Institut für Bildungsforschung in Berlin. Seit 1992 lehrt sie an der Ludwig-Maximilians-Universität München, seit 1999 als Inhaberin des Lehrstuhls für Soziologie.

Jutta Allmendingers wissenschaftliches Werk konzentriert sich auf drei Schwerpunkte: Bildungs- und Arbeitsmarktsoziologie mit Hilfe von Lebensverlaufsanalysen, Soziologie der Sozialpolitik, Folgen von Frauenbeschäftigung für Organisationen. Bereits mit ihrer 1989 als Buch veröffentlichten Dissertation *Career Mobility Dynamics: A Comparative Analysis of the United States, Norway and West Germany* leistete sie einen bahnbrechenden Beitrag zur international vergleichenden Lebensverlaufsforschung. In ihrer 1994 veröffentlichten Habilitationsschrift *Lebenslauf und Sozialpolitik. Die Ungleichheit zwischen Mann und Frau und ihr öffentlicher Ertrag* setzte sie sich mit dem Wechselspiel von institutioneller Regelung durch die Sozialpolitik und individuellen Lebenschancen beim Übergang von der Erwerbstätigkeit in den Ruhestand auseinander. Jutta Allmendinger engagiert sich in vielfältiger Weise in der Hochschulpolitik und in der Politikberatung. Zahlreiche Auszeichnungen, darunter ein Fellowship des Center for Advanced Study in the Behavioral Sciences, Stanford, und der Preis der Münchener Universitätsgesellschaft für außergewöhnliche Leistungen in der Lehre, zeugen von ihrer Anerkennung als herausragende Wissenschaftlerin und Hochschullehrerin.

Konrad Bergmeister ist Leiter des Departments für Bautechnik und Naturgefahren an der Universität für Bodenkultur in Wien, zu welchem das von ihm bisher geleitete Institut für Konstruktiven Ingenieurbau gehört. Er hat in Innsbruck Bauingenieurwesen sowie Volkskunde, Kunstgeschichte und Philosophie studiert, 1985 und 1988 jeweils promoviert und 1992 an der University of Clarkson, New York, mit dem Master of Science abgeschlossen.

Konrad Bergmeister ist auf verschiedenen Gebieten des Bauingenieurwesens aktiv – seine Bandbreite reicht von traditionellen Bauwerken über experimentelle und numerische Methoden bis zum Einsatz moderner Werkstoffe. Mit dem Ingenieurteam Bergmeister und Partner, Brixen/Wien verantwortete er allein in den Jahren 1991 bis 2000 Entwurf, konstruktive Tragwerksplanung und teilweise auch Bauleitung bei über 500 Projekten im Bereich des Konstruktiven Ingenieurbaus mit Schwerpunkten im Hochbau, Brücken- und Seilbahnbau. Von 1999 bis heute ist er als technischer Direktor und Chefingenieur für Sanierungsarbeiten an der Brennerautobahn verantwortlich. Als Wissenschaftler und praktizierender Ingenieur legt er besonderen Wert auf die Verbindung von Forschung und Praxis. Es ist ihm dadurch gelungen, aus Grundlagenforschung Innovationen zu entwickeln und deren Einsatz zu realisieren. Seine besondere Aufmerksamkeit gilt dabei der Zuverlässigkeit des Gesamtsystems unter Berücksichtigung verfügbarer Meßdaten und Lebensdauerüberlegungen von Bauwerken und Werkstoffen. Konrad Bergmeister gehört zu den führenden Bauingenieuren auf diesem Gebiet. Seine Arbeiten sind in einem umfangreichen Publikationswerk niedergelegt. Aufgrund seiner anerkannten internationalen Erfahrungen ist er Mitglied europäischer und internationaler Gremien, so der Internationalen Vereinigung für Brücken- und Hochbau, der International Federation for Structural Concrete (fib) und einer der Vizepräsidenten der International Society for Health Monitoring (ISHMII).

Hans-Jochen Heinze hat Medizin und Mathematik studiert. Nach seiner Ausbildung zum Facharzt für Neurologie und seiner Habilitation 1985 ging er als DFG-Stipendiat für zwei Jahre an das Cognitive Neuroscience Department der University of California, San Diego. Anschließend war er zunächst Oberarzt, dann stellvertretender Leiter der Neurologischen Klinik der Medizinischen Hochschule Hannover. 1993 übernahm er die Leitung der Klinik für Neurologie II der Medizinischen Fakultät an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Seit 1997 ist er Direktor des Imaging-Zentrums in Magdeburg, seit 2002 auch Koordinator des Center for Advanced Imaging (CAI) Magdeburg-Bremen.

Hans-Jochen Heinze zählt zu den international führenden Wissenschaftlern im Bereich des „Cognitive Brain Imaging“. Seine Untersuchungen zur neuralen Organisation der visuellen Aufmerksamkeit beim Menschen bilden die Grundlagen für die kombinierte räumlich-zeitliche Analyse höherer Hirnfunktionen, eine der aussichtsreichsten jüngsten Entwicklungen der systematischen Neurowissenschaften. Darüber hinaus hat er über verschiedene Themen im Bereich der kognitiven Neurowissenschaften gearbeitet, insbesondere über die neuralen Mechanismen des bewußten Gedächtnisses. Er integrierte die neu entwickelten Imaging-Verfahren erfolgreich in die Neurologie. Unter seiner Leitung entwickelte sich die neurologische Klinik in Magdeburg zum Referenzzentrum für verschiedene zentralnervöse Erkrankungen. Hans-Jochen Heinze hat seine Arbeiten in führenden internationalen Wissenschaftsjournalen, darunter Nature, Nature Neuroscience, PNAS, Neuron und Journal of Neuroscience, publiziert.

Stephan Leibfried ist seit 1974 Professor für Sozialpolitik/Sozialverwaltung der Universität Bremen, seit 1988 Leiter der Abteilung Institutionen und Gesellschaft des Zentrums für Sozialpolitik und derzeit besonders im neuen Sonderforschungsbereich „Staatlichkeit im Wandel“ aktiv. Mit seinen Forschungen zur Geschichte/Politik des Wohlfahrtsstaats und dessen Europäisierung und Internationalisierung gehört er zu den die internationale Diskussion prägenden deutschen Sozialwissenschaftlern. Besondere Aufmerksamkeit fanden Arbeiten zur deutschen Sozialpolitik, zu Armut in reichen Gesellschaften und zum Wechselspiel zwischen Wohlfahrtsstaat und Internationalisierung/Europäisierung. Sein juristisch-sozialwissenschaftliches Studium absolvierte Stephan Leibfried an verschiedenen Universitäten der USA und an der FU Berlin, promovierte 1972 in Bremen. Zahlreiche internationale Forschungsaufenthalte prägen seine Arbeit, so am Harvard Center for European Studies (CES), bei Brookings in Washington DC, an der London School of Economics (LSE), als Gastprofessor an der Washington University, Cornell, Berkeley und Stanford, auch bei den Law Schools. Derzeit arbeitet er mit H. Obinger und F. G. Castles über „Federalism and the Welfare State“ und mit E. Rieger über „Kultur versus Globalisierung“. Drei Bücher stehen für sein Werk: *European Social Policy* (1995, mit P. Pierson) – ein Standardwerk zur Transformation europäischer Wohlfahrtsstaaten durch die Integration; *Time and Poverty in Western Welfare States* (1999, mit L. Leisering) – eine einzigartige Studie, die Armut in Deutschland in einer *life course*-Perspektive untersucht; *Grundlagen der Globalisierung: Perspektiven des Wohlfahrtsstaats* (2001, mit E. Rieger; 2003 als *Limits to Globalization*) – hiernach widerspricht Globalisierung dem Wohlfahrtsstaat nicht, sondern setzt ihn voraus: Demokratisch verfaßte Gesellschaften konnten ihrer eigenen Öffnung für internationalen Handel nur bei ausreichender Kompensation zustimmen.

Hanns-Jürgen Lichtfuß hat an der Technischen Universität Berlin Maschinenwesen in der Fachrichtung Flugtechnik studiert und 1972 an der RWTH Aachen promoviert. Von 1966 bis 1975 war er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am heutigen Institut für Antriebstechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt tätig und befaßte sich in dieser Zeit mit Untersuchungen der Strömungsvorgänge an Schaufelgittern. Von 1975 bis 1998 arbeitete er zunächst als Referent und Assistent, später als Abteilungs- bzw. Hauptabteilungsleiter Strömungsmaschinen, seit 1989 als Bereichsleiter Entwicklung. 1991 wurde er zum Direktor ernannt. In diesen Jahren war er mit wichtigen Entwicklungsaufgaben der Triebwerkstechnik betraut und leistete zahlreiche eigene Beiträge zum modernen Strahltriebwerk, darunter wesentliche zu Verdichtern des Triebwerkes des Jägers 90, für Hochdruckturbinen von Hubschraubertriebwerken und Niederdruckturbinen für Strahltriebwerke von Geschäftsreise- und Verkehrsflugzeugen. Seit 1986 ist er Lehrbeauftragter der Technischen Universität München, die ihn 1992

zum Honorarprofessur für „Berechnungsverfahren von Flugtriebwerken“ berief. Im Jahre 2002 übte er einen Lehrauftrag an der Universität St. Gallen „Regionale Entwicklung durch Innovation“ für die Ausbildung zum Executive MBA in Business Engineering aus. Seit 1998 ist Hanns-Jürgen Lichtfuß Vorsitzender des Vorstandes der TSB Technologiestiftung Innovationszentrum Berlin, die sich mit der Strategieentwicklung zur Aktivierung der regionalen Wissenschaft und Wirtschaft in der Hauptstadtregion befaßt und sich unter seiner Führung zu einem wichtigen Partner der institutionalisierten Vernetzung von Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Verwaltung in Berlin entwickelt hat.
Ein umfangreiches Publikationsverzeichnis dokumentiert die wissenschaftliche Arbeit von Hanns-Jürgen Lichtfuß. Mitgliedschaften in Gremien von Wissenschaft und Wirtschaft belegen die hohe Wertschätzung seiner langjährigen Erfahrungen aus beiden Bereichen.
Peter Mayr hat in Stuttgart Physik studiert, begann nach dem Studium als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Metallforschung in Stuttgart und ging von dort an das Institut für Werkstoffkunde der Universität Karlsruhe. 1969 übernahm er hier die Leitung des Schwingfestigkeitslaboratoriums. Im selben Jahr promovierte er an der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe zum Dr.-Ing., 1979 habilitierte er in Werkstoffkunde. Er wurde Leiter des werkstoffwissenschaftlichen Forschungsinstituts Stiftung Institut für Härterei-Technik in Bremen und folgte 1983 dem Ruf als Professor für Werkstoffkunde an die Universität Bremen. Seit 1986 ist er Geschäftsführender Direktor der Stiftung Institut für Werkstofftechnik Bremen, einem aus dem Institut für Härterei-Technik entstandenen Forschungszentrum, das die drei für die Forschung in der Metallverarbeitung traditionell eher getrennt agierenden Fachdisziplinen Werkstoff-, Verfahrens- und Produktionstechnik vereint. Seit 1987 ist er Direktor der Amtlichen Materialprüfanstalt in Bremen.
Ein umfangreiches Publikationsverzeichnis dokumentiert die wissenschaftliche Arbeit von Peter Mayr, die den Bogen spannt von den physikalischen Grundlagen, der atomaren Komposition eines Materials, über seine „Legierung“ zum Werkstoff bis hin zum Verhalten des Bauteils bei realen Betriebsbeanspruchungen. Das Bestreben, ein Themengebiet gesamtheitlich zu erfassen und dementsprechend interdisziplinär zu bearbeiten, ist für Mayrs Forschungsstrategie charakteristisch. Er greift nicht nur einzelne, wissenschaftlich besonders attraktive Fragen auf, sondern befaßt sich auch mit der Umsetzung und damit Nutzbarmachung der Erkenntnisse in der Praxis. So nimmt in seinem wissenschaftlichen Werk die Erforschung und modellmäßige Beschreibung des Ermüdungsverhaltens von Metallen bei Wechselbeanspruchung eine zentrale Stellung ein. Mitgliedschaften in Gremien von Wissenschaft und Industrie belegen die hohe Wertschätzung seiner Erfahrungen als Wissenschaftler und Organisator.

Ortwin Renn hat an der Kölner Schule, einem privaten Ausbildungsinstitut, Publizistik und Journalistik studiert und an der Universität Köln das Studium der Soziologie und Volkswirtschaftslehre absolviert. 1980 promovierte er in Köln im Fach Sozialpsychologie. Sein beruflicher Werdegang begann am Forschungszentrum Jülich, wo er nach Tätigkeiten im Bereich Öffentlichkeitsarbeit und im Konferenzbüro zunächst als wissenschaftlicher Mitarbeiter, später als Leiter der Arbeitsgruppe „Mensch und Technik" beteiligt war. Von 1986 bis 1992 weilte er als Associate Professor of Environment, Technology, and Society an der Clark University in Worcester, Massachusetts und als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Center for Technology, Environment, and Development, wurde hier 1988 zum Full Professor berufen und übernahm die Leitung des akademischen Friedensforschungsprogramms. 1992/93 war er Gastprofessor an der ETH Zürich und leitete das Projekt „Vorbeugendes Konfliktmanagement". 1992 wurde er Mitglied, 1999 Sprecher des Vorstandes der Akademie für Technikfolgenabschätzung. Seit 1994 ist er Ordinarius für Risiko- und Umweltsoziologie in Stuttgart, seit 2003 Geschäftsführer des gemeinnützigen Forschungsinstituts „DIALOGIK" mit Sitz in Stuttgart.

Ortwin Renn arbeitet auf den Gebieten der Technikfolgenforschung, Technikfolgenbewertung und der Risikoforschung. Er befaßt sich mit Fragen der Umwelt- und Techniksoziologie, mit Partizipationsforschung sowie mit Energiepolitik und Umweltökonomie. Aktuelle Forschungsprojekte behandeln das Konfliktmanagement in der Umweltpolitik, Fragen der Risikobewertung von Energiesystemen, Chancen und Risiken der Gentechnik, Konzepte für Nachhaltigkeitsstrategien sowie Modelle für die öffentliche Beteiligung an der Diskussion zur Biotechnologie – letzteres in Kooperation mit der Europäischen Kommission in Brüssel. Besondere nationale und internationale Aufmerksamkeit erlangten seine Arbeiten zur methodischen Analyse technischer Risiken und gesellschaftlicher Akzeptanz von Technologien. Ortwin Renn ist Mitglied zahlreicher wissenschaftlicher Vereinigungen und Herausgebergremien. Im Jahre 2003 wurde er in ein Sachverständigengremium des National Research Council der USA in Washington berufen, das Empfehlungen an die US-Regierung zu den Themen Bürgerbeteilungs- und Entscheidungsverfahren im Umweltschutz ausarbeiten soll. Er ist Mitglied der Europäischen Akademie der Wissenschaften und Künste mit Sitz in Salzburg.

Der Schritt in die vierte Dimension

Martin Aigner

Die Mathematiker sind eine Art Franzosen. Du sagst etwas zu ihnen, sie übersetzen es in ihre Sprache, und presto! ist es etwas vollkommen anderes. Man hält füglich etwas Distanz zu ihnen! Einem versierten Spötter wie Goethe widerspricht man nicht gern, ich danke Ihnen, daß Sie trotzdem seinem Rat nicht gefolgt sind und heute Abend hier sind. Es war ein langer Tag für die meisten der Anwesenden, und so möchte ich drei Bemerkungen vorausschicken, die diesem Umstand ein wenig Rechnung tragen.

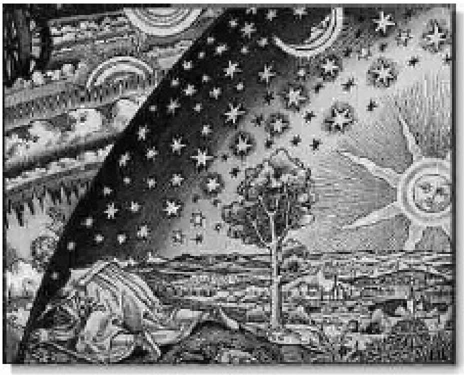
Zunächst möchte ich noch einmal Goethe aus einem Brief zitieren, er nimmt dabei Bezug auf eine Szene im Wilhelm Meister. Ein Gast kommt zu Besuch, und der Hausherr kommentiert: *Er bringt mir das Allerfremdeste, was in mein Haus kommen kann, die Mathematik an meinen Tisch, wobei wir jedoch schon eine Convention geschlossen haben, daß nur im äußersten Fall von Zahlen die Rede seyn darf!* Von Zahlen wird schon hin und wieder die Rede sein müssen, aber Formeln werde ich nur im alleräußersten Fall verwenden.

Als nächstes ist mir bewußt, daß ich vor einem Auditorium spreche mit gänzlich verschiedener Erfahrung in Mathematik, Philosophie und Physik. Ich bitte daher um Nachsicht, wenn ich in Ihrer Disziplin etwas sage, was Ihnen wohlbekannt ist. Ich hoffe, es ist für jeden etwas Interessantes dabei.

Und schließlich: Mathematik wird oft mit Musik verglichen, Pythagoras hat ja Musik sogar als Teil der Mathematik verstanden. Es gibt tatsächlich eine Reihe von Gemeinsamkeiten, aber auch einen ganz wesentlichen Unterschied: die emotionale Komponente. Selbst wenn jemand noch nie etwas von Kontrapunkt oder Harmonielehre gehört hat, so kann er doch die Musik genießen, sich von ihr vielleicht sogar berühren lassen. Das ist in der Mathematik schwierig bis unmöglich. Und doch bitte ich Sie: Lehnen Sie sich zurück wie in einem Konzertsaal und lassen Sie das, was kommt, wohlwollend auf sich wirken. In der Sprache der Musik werden es drei Sätze sein: Dimension, Geometrie, Universum, und dann zurück zur Mathematik als Finale.

Dimension

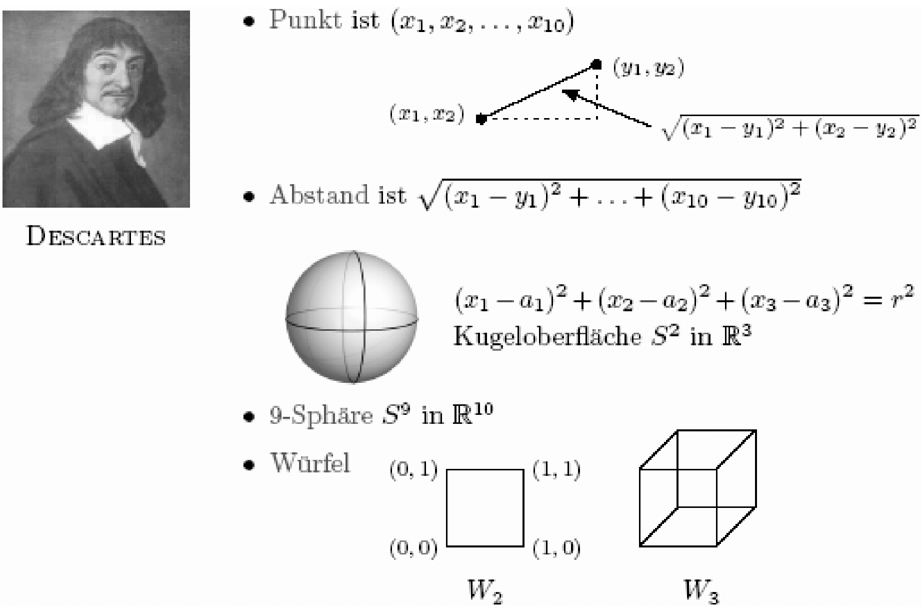
Es ist für Nicht-Mathematiker erfahrungsgemäß sehr befremdlich, wenn ich erzähle, daß ein bedeutender Teil der heutigen Mathematik sich mit Geometrie in mehr als drei Dimensionen beschäftigt. Wir wissen, daß Geraden und Kurven 1-dimensional sind, Ebenen und Flächen 2-dimensional und Körper wie ein Würfel oder ein Kegel 3-dimensional. Wir haben also Länge, Breite, Höhe, aber wie kann etwas mehr als drei Dimensionen haben? Nun, genau diesen Schritt hinaus wollen wir wie in diesem berühmten Stich versuchen.



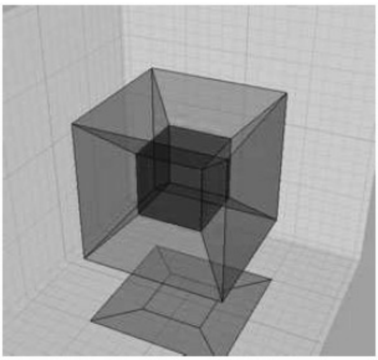
4-dimensional?

Und dabei will ich auch ein wenig auf drei Fragen eingehen: Was ist der Status mathematischer Wahrheit? Was sagen mathematische Theoreme um alles in der Welt und für die Welt aus? Und schließlich: Wie arbeiten die Mathematiker? Sprechen sie tatsächlich, wie Goethe meint, eine andere Sprache? Was ist sozusagen ihre psychologische Konstitution? Ich stimme bei den folgenden Gedanken dem bedeutenden Mathematiker und Philosophen Timothy Gowers zu, der einige prägnante Ansichten dazu geäußert hat.
Manchmal wird die 4. Dimension als Zeit angesehen, das ist eine vernünftige Antwort in gewissen Situationen, zum Beispiel in der Speziellen Relativitätstheorie, aber es hilft nicht, sich den 10-dimensionalen Raum oder gar einen unendlich dimensionalen Raum vorzustellen. Hier kommt nun eine erste psychologische Komponente mathematischen Arbeitens ins Spiel: Statt, daß wir uns den Kopf über die *Existenz* des 10-dimensionalen Raumes zerbrechen, überlegen wir uns, welche *Eigenschaften* ein solcher Raum haben sollte. Aber, so höre ich den Einwand, wie kann man Eigenschaften untersuchen, ohne vorher zu wissen, daß etwas existiert, das diese Eigenschaften hat? Aber genau das machen wir unentwegt. Ein Beispiel aus dem wirklichen Leben: Man kann sich zum Beispiel durchaus darüber Gedanken machen, welche Bedingungen eine gerechte Gesellschaft erfüllen sollte, obwohl wir keine Garantie haben, daß es sie jemals geben wird.

Hier sind zwei Eigenschaften der Dimension, die wir sicher verlangen werden: Zwei Zahlen bestimmen einen Punkt in der Ebene, drei einen Punkt im Raum, also werden wir erwarten, daß 10 Zahlen einen Punkt im 10-dimensionalen Raum bestimmen. Oder: Strecken wir einen Körper in jeder Richtung um den Faktor 2, so erhöht sich das Volumen um den Faktor 2 hoch 10. Die nächste Frage stellt sich von selbst. Wir wollen einen Raum, der alle diese Eigenschaften besitzt, aber ist das logisch konsistent? Die Antwort ist ein mathematisches *Modell*. Das Modell ist nicht notwendigerweise das Abbild von irgend etwas Realem, aber wenn es alle Eigenschaften hat, die wir verlangen, dann ist es konsistent. Und wie so oft stellt sich später heraus, daß das Modell außerordentlich nützlich ist – was den Physiker Eugene Wigner zu dem berühmten Bonmot von der „Unreasonable Effectiveness of Mathematics“ inspiriert hat.
Also ein Modell, jeder kennt es, der Raum beschrieben durch kartesische Koordinaten. Wir wählen einen Nullpunkt, zwei bzw. drei senkrecht aufeinander stehende Achsen, und beschreiben jeden Punkt durch die Abstände von den Achsen. Diese Räume heißen die reellen Euklidischen Räume und werden mit R^2, R^3, allgemein R^n bezeichnet. Descartes selber hat behauptet, daß ihm die Idee mit den Koordinaten im Traum gekommen sei, was, schenkt man Mathematikern Glauben, gar nicht so selten vorkommt. Gehen wir nun in den 10-dimensionalen Raum, so wird ein *Punkt* als $(x_1, x_2, \ldots, x_{10})$ beschrieben. Und nun



übernehmen wir einen Begriff nach dem anderen aus der 2-dimensionalen Welt: Der *Abstand* zwischen zwei Punkten ist nach Pythagoras die Wurzel aus $(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2$, also definieren wir den Abstand im 10-dimensionalen Raum als Wurzel aus $(x_1 - y_1)^2 + \ldots + (x_{10} - y_{10})^2$. Die Kugeloberfläche oder 2-*Sphäre* vom Radius r ist die Menge aller Punkte, deren Koordinaten eine Gleichung $(x_1 - a_1)^2 + (x_2 - a_2)^2 + (x_3 - a_3)^2 = r^2$ erfüllen. Also werden wir die 9-Sphäre S^9 im Raum R^{10} genau so erklären. Und ähnlich können wir Würfel verallgemeinern und so weiter.
Schön, das ist elegant, wahrscheinlich auch nützlich, und doch werde ich oft von Studenten in einem leichten Anflug von Verzweiflung gefragt: Kann man die Geometrie in, sagen wir, vier Dimensionen nicht nur intellektuell in Formeln begreifen, kann man sie auch *sehen*? Hier kommt ein meines Erachtens wichtiger psychologischer Faktor ins Spiel: Wir stellen uns auf den Standpunkt: Die 10 Zahlen $x_1, \ldots, x_{10}$ *sind* der Punkt (und nicht bloß ein Abbild), ein Würfel *ist* das Objekt, das von Dimension zu Dimension durch Verdopplung und paarweise Verbindung entsteht, und daraus können wir wiederum einige Schlüsse ziehen. Zum Beispiel können wir den 4-dimensionalen Würfel durch so eine Verdoppelung ohne weiteres sehen.



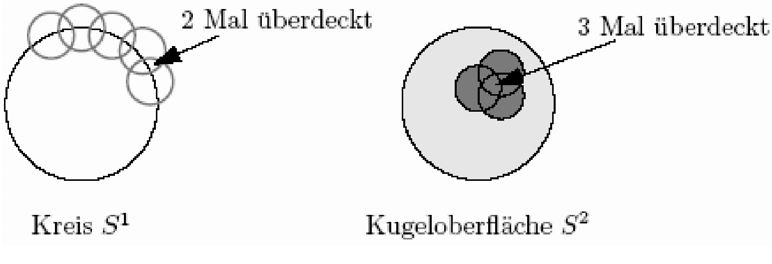
4-dimensionaler Würfel

Dieses „der Punkt *ist* x_1 bis x_{10}“ mag künstlich erscheinen, und doch spiegelt es eine wesentliche Facette der mathematischen Denkweise wider: Die mathematische Arbeit besteht zu einem großen Teil aus dem Erkennen von Mustern, Aufstellen von Vermutungen und sogar Raten von Sätzen aufgrund von Intuition und direkter Visualisierung von anscheinend abstrakten Inhalten. Einige haben es hierin zu einer Meisterschaft gebracht. Ich hatte das Glück, bei einem der großen Geometer, Rajchindra Bose, in Amerika zu arbeiten. Wir Jungen waren verblüfft über seine Anschauungskraft, die bis in fünf Dimensionen reichte. Kegelschnitte wie Ellipse, Hyperbel, Parabel werden durch quadratische Gleichungen in zwei Variablen beschrieben. Und im Raum (mit drei Variablen) sind das Kugeln, Ellipsoide und so weiter, und das kann man natürlich wie eben gesehen, auf vier und mehr Dimensionen verallgemeinern. Bose *sah* die Gleichungen zweier solcher 4-dimensionaler Kegelschnitte und konnte sofort, ohne zu rechnen, angeben, in welcher geometrischen Figur sie sich schneiden (so wie wenn wir einen Zylinder mit einer Kugel schneiden).

Aber was ist nun die Dimension eines *Objektes*? Euklid hatte dafür ein intuitives Verständnis, Descartes zeigte den Weg in die Algebra, die Dimension ist gleich der Anzahl der rechtwinkeligen Richtungen, heute sprechen wir von der Dimension eines Vektorraumes. Was ist zum Beispiel die Dimension der 2-Sphäre? Nun offenbar 2, aber wir brauchen 3 rechtwinkelige Koordinaten, um S^2 zu beschreiben. Wenn wir nur 2 Koordinaten verwenden wie die üblichen Längen- und Breitengrade, so sind diese Linien „krumm". Dimension hat offenbar etwas mit Ausdehnung zu tun, *unabhängig* von Koordinaten. Poincaré, einer der letzten Universalisten der Mathematik, drückte dies so aus: *Ich will nicht sagen, daß die Arithmetisierung der Geometrie etwas Schlechtes sei, ich sage, daß sie die Sache nicht erschöpft.*

Werfen wir also einen kurzen Blick darauf, im Sinne von Goethe, was die Mathematiker, diese Franzosen, aus der Dimension gemacht haben? In diesem Fall war es wirklich ein Franzose, der einen bestechenden Einfall hatte, nämlich Henri Lebesgue. Seine Idee war es, die Ausdehnung dadurch zu messen, wie oft Punkte überdeckt sein müssen, wenn wir die überdeckenden Mengen ganz klein wählen. Wir sehen links S^1 und rechts S^2: Wie wir auch S^1 überdecken, es gibt immer einen Punkt des Kreisringes, der in zwei Mengen enthalten ist, und in der Kugeloberfläche gibt es immer einen Punkt, der in drei Mengen enthalten ist. Wir haben also Begriffe wie „überdecken" oder „klein", die wir natürlich mathematisch erfassen müssen.

Die genauen Definitionen sind ein wenig technisch, aber im wesentlichen geht es um folgendes: Wir sagen, eine Menge A wird *überdeckt* von den Mengen U_1, U_2,



U_3, ..., wenn jeder Punkt von A in einer der Mengen U_i enthalten ist. Um „klein“ zu erklären, nehmen wir an, daß ein Abstandsbegriff vorliegt – in der Mathematik heißen solche Räume *metrische* Räume. Somit können wir vom *Durchmesser* einer Menge sprechen, und „klein“ heißt kleiner Durchmesser. Schließlich nennen wir U_1, U_2, ... eine *ε-Überdeckung*, falls die Mengen U_i alle einen Durchmesser von weniger als ε haben. Mit diesen Begriffen gibt Lebesgue nun die Definition: *A hat Dimension d, falls zu jedem $\varepsilon > 0$ eine ε-Überdeckung existiert, in der jeder Punkt höchstens $d + 1$ Mal überdeckt wird (und d minimal ist).* Später wurde eine allgemeine Definition für beliebige topologische Räume (auch ohne metrische Struktur) gegeben. Und dann gibt es weitere Varianten wie fraktale Dimension und anderes mehr. Jedenfalls stellte sich heraus, daß der anscheinend so klare und anschauliche Begriff Dimension mathematisch durchaus subtil ist.

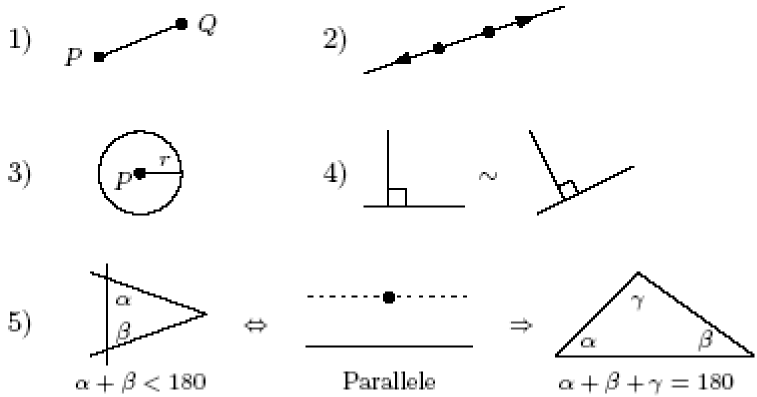
Aber was hat das alles mit der realen Welt, die uns umgibt, zu tun? Was ist die Geometrie unserer Welt? Was besagen alle diese intuitiven Begriffe wie Gerade, krumm, Raum wirklich? Was ist überhaupt Geometrie? Was sind ihre Grundlagen? Derselbe Poincaré äußert sich dazu in seiner berühmten Schrift „Letzte Gedanken“: *Geometrie heißt, die Eigenschaften unserer Meßwerkzeuge, das heißt der festen Körper, zu studieren, wenn sie vollkommen wären.* In dieser Vollkommenheit klingt das Platonische Ideal an und damit sind wir bei den Griechen und bei Euklid.

Geometrie

Wenige Bücher haben wohl einen größeren Einfluß gehabt als Euklids Elemente zur Grundlegung der Geometrie. Nicht nur jedes Schulkind hatte das Vergnügen, überhaupt jeder, der etwas werden wollte, mußte die Elemente studiert haben. Thomas von Aquin hat sie gelesen, Giordano Bruno, auch Napoleon, und der spätere Präsident Garfield erfreute seine Senatskollegen während langatmiger Reden mit kleinen Problemen aus den Elementen.

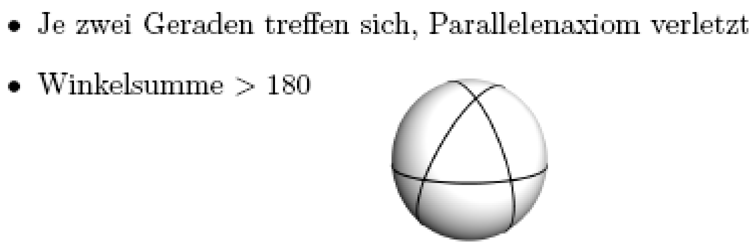
Die Elemente beginnen mit den berühmten fünf Postulaten. Zum Beispiel bedeutet das erste, daß es zwischen zwei Punkten genau eine Verbindungsgerade (Segment) gibt, und das letzte ist das Parallelenaxiom: Zu jeder Geraden gibt es genau eine parallele Gerade durch einen gegebenen Punkt, oder äquivalent dazu: Die Winkelsumme jedes Dreieckes ist 180 (das heißt gleich der Summe zweier rechter Winkel).

Wenn jemand überzeugt davon ist, wie es 2000 Jahre lang der Fall war, daß die Winkelsumme in einem Dreieck wirklich *immer* 180 Grad ist, so ist er in guter Gesellschaft, zum Beispiel der von Kant. Sind die Axiome aber wirklich gerechtfertigt? Nun, die ersten vier Postulate scheinen vollkommen einsichtig, das Parallelenpostulat aber hat einen anderen Charakter. Zum Beispiel erzwingt es, wie



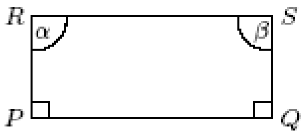
Postulate von Euklid

eben gesehen, die Winkelsumme 180 in jedem Dreieck, aber wir müssen dazu sozusagen ins *Unendliche* gehen! Das ist schon sehr merkwürdig. Stellen wir die Frage anders herum: Wenn die Axiome gerechtfertigt sind, dann müssen die Schlußfolgerungen auch gelten, wenn wir die Geraden neu interpretieren.
Ein schönes Beispiel dafür ist die *sphärische Geometrie*. Es gibt keine „geraden" Linien, also ist es nur natürlich, wenn wir ein Segment als „kürzeste" Verbindung interpretieren, als sogenannte *geodätische Linie*. Wie in jedem Flug zu beobachten, sind dies Großkreisstücke um den Erdmittelpunkt, so wie der Äquator. Je zwei solcher Großkreise schneiden sich, so wie der Äquator jeden Meridian schneidet, also gibt es überhaupt keine Parallelen, und die Winkelsumme jedes Dreieckes ist größer als 180 Grad. Auch Postulat 1 ist nicht erfüllt, da es offenbar vom Nord- zum Südpol mehr als nur eine kürzeste Verbindung gibt. Wir können resümieren: Welche Geometrie auch immer Euklid beschreibt, es ist jedenfalls *nicht* die Geometrie der Kugeloberfläche: Seine Geometrie ist flach und unendlich ausgedehnt, die sphärische Geometrie gekrümmt und beschränkt.



Sphärische Geometrie

Aber könnte es nicht sein, daß die Postulate 1–4 doch das Parallelenaxiom erzwingen – also die Flachheit notwendigerweise folgt? Die Antwort ist Nein, und die Geschichte dazu stellt einen der großen Meilensteine der Mathematik dar – und sie ist auch ungewöhnlich spannend. Über 2000 Jahre nach Euklid beginnt sie ernsthaft mit Girolamo Saccheri, einem Jesuiten aus Genua. Er ging systematisch daran zu überprüfen, was *ohne* das Parallelenaxiom bewiesen werden kann. Saccheri konstruierte auf höchst einfache Weise folgendes Viereck. Wir nehmen zwei Punkte P und Q, errichten darauf Senkrechte gleicher Länge mit den Endpunkten R und S, und verbinden dann diese beiden Punkte. Saccheri zeigte nun erstens, daß die Winkel α bei R und β bei S gleich sein müssen, und daß $\alpha = 90$ gleichbedeutend mit dem Parallelenaxiom ist.



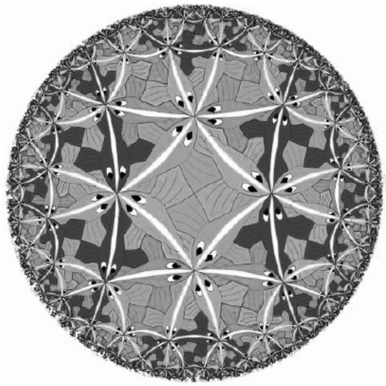
- $\alpha = \beta$
- $\alpha = 90$ $\Leftrightarrow$ Parallelenaxiom
- $\alpha > 90$ Widerspruch
- $\alpha < 90$ unendlich viele Parallelen

Saccheri-Viereck

Es bleiben also die Fälle $\alpha > 90$ und $\alpha < 90$, wobei er den ersten Fall rasch auf einen Widerspruch führen konnte. Saccheri bewies nun einen Satz nach dem anderen unter der Annahme, daß die Winkel kleiner als 90 Grad sind, und jeder war merkwürdiger als der vorangegangene. Zum Beispiel schloß er, daß es dann nicht eine, sondern unendlich viele Parallelen durch einen Punkt geben mußte, oder daß die Winkelsumme eines Dreieckes nicht nur kleiner als 180 Grad war, sondern beliebig klein werden konnte. Schließlich erschienen ihm die Schlußfolgerungen so abstoßend, daß er überzeugt war, daß Gott der Demiurgos, der große Geometer, solche Dinge nicht zulassen würde. Ergo war auch die Annahme $\alpha < 90$ ad absurdum geführt, wenn auch in einem gewissermaßen scholastischen Sinn, und Saccheri schloß mit dem Ausruf: „Euclidus ab omni naevo vindicatus“ – Euklid von jedem Makel befreit.

Es dauerte noch einmal an die 100 Jahre, bis klar war, daß es so eine Geometrie *gibt*, in der alle Axiome mit Ausnahme des Parallelenaxioms gelten, und dieses *nicht* erfüllt ist. Sie ist verbunden mit den Namen Gauß, Bolyai und Lobatschewski. In der Euklidischen Geometrie ist die Winkelsumme immer 180 und in der hyperbolischen immer weniger als 180. Und ein einziges Dreieck genügt, um zu entscheiden, welche Geometrie vorliegt! Saccheri war so nahe dran, er hatte lauter richtige Sätze der hyperbolischen Geometrie bewiesen, alles, was ihm fehlte, war ein *Modell*. Unter mehreren Modellen, die alle dieselbe Geometrie

beschreiben, ist das Kreismodell von Poincaré vielleicht das ästhetisch schönste. Die Punkte der, wie wir sie nennen, *hyperbolischen Ebene*, sind alle Punkte im Inneren (der Rand gehört nicht zur Ebene), und die Geraden sind alle Durchmesser und alle Kreisbögen, die senkrecht auf den Rand stehen.
Und nun kann man, indem man Längen und Winkel geeignet definiert, nachprüfen, daß alle Postulate von Euklid erfüllt sind, aber eben das Parallelenpostulat *nicht.* Wie von Saccheri vorausgesagt, gibt es unendlich viele Parallelen durch einen Punkt, und die Winkelsummen sind immer < 180 Grad. Die Eleganz und Besonderheit dieses Modells wurde von vielen Künstlern aufgegriffen, unter anderem von dem unvergleichlichen holländischen Graphiker Maurits Escher.



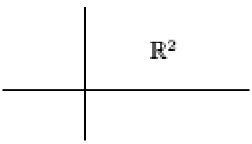
Hyperbolische Ebene

Die Entdeckung der Nichteuklidischen Geometrie wird neben der Differentialrechnung als die größte Revolution innerhalb der Mathematik angesehen. Der Schock war tatsächlich groß: Die bloße Tatsache, daß alternative Geometrien mathematisch möglich sind, war verstörend genug, aber tiefer noch reichte die Unsicherheit, ob eine dieser Nichteuklidischen Geometrien tatsächlich für den physikalischen Raum vorliegen könnte. Die meisten führenden Mathematiker der Zeit lehnten dies rundweg ab. Und doch: Genau dieses Problem, eine Geometrie zu wählen, die dem Universum angepaßt war, brachte eine der größten mathematischen Theorien hervor, die ihrerseits weiteren Anlaß gab zu glauben, daß die Geometrie unserer Welt tatsächlich nichteuklidisch ist: Ihr Schöpfer war Bernhard Riemann.
In seiner epochalen Schrift „Über die Hypothesen, welche der Geometrie zugrunde liegen" durchdachte Riemann den Begriff des Raumes völlig neu. Seine Ideen fußten auf der Frage: Welche Tatsachen nehmen wir schon in unserem gedanklichen Konzept des physikalischen Raumes *vorweg, bevor* wir durch Experimente absichern, welche besonderen Axiome wirklich gelten?

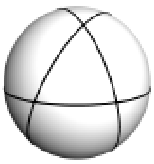
RIEMANN

- Experiment versus a priori
- Lokal versus global
- Abstand als Grundbegriff der Differentialgeometrie
- Raum muß die Physik widerspiegeln

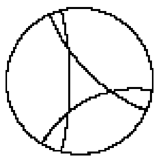
Euklids Postulate sind in diesem Sinn eher experimentelle Tatsachen als a priori Wahrheiten. Aus dieser Grundüberlegung zog er einige Schlüsse: Wir *erfahren* ausschließlich die *lokale* Geometrie, und diese hängt von der *globalen* Struktur ab, so wie die Meridiane die kürzesten Verbindungen auf der Kugel sind, *weil* die globale Fläche konstant gekrümmt ist. Als Grundbegriff dieser lokalen Erfahrung führte er den (infinitesimalen) Abstand ein, in voller Allgemeinheit als quadratische Form. Und später im Vorgriff auf Einstein: Die Geometrie des Raumes muß die Gegenwart von Masse berücksichtigen. Riemann schloß seine Arbeit mit der prophetischen Bemerkung: *Wir müssen den Grund der metrischen (also lokalen) Verhältnisse unseres Raumes in den Kräften suchen, die in ihm wirken. Das führt uns zur Physik, in welche die vorliegende Arbeit noch nicht erlaubt vorzudringen.*
Riemann hat also die Möglichkeit des gekrümmten Raumes klar vorher gesehen. Wie aber kann der Raum gekrümmt sein? In zwei Dimensionen haben wir die drei Fälle schon gesehen: Die Ebene R^2 ist flach, d.h. hat Krümmung 0, die sphärische Geometrie hat positive Krümmung und die hyperbolische Geometrie negative Krümmung. Mit ein oder zwei Dimensionen haben wir keine Probleme, wir kennen gekrümmte Kurven oder Flächen, aber der Raum IST!



Krümmung 0, flach



positive Krümmung



negative Krümmung

Selbst wenn wir uns die Krümmung eines 3-dimensionalen Raumes irgendwie verständlich machen könnten, so müßten wir dazu in die 4. Dimension gehen, um zu sehen, ob der Raum tatsächlich gekrümmt ist. Das ist natürlich ein gera-

dezu existentieller Widerspruch. Können wir die Krümmung innerhalb des Raumes feststellen? Gehen wir noch einmal zurück in zwei Dimensionen und unsere Erde. Wir könnten in ein Raumschiff steigen und feststellen, daß die Erde ungefähr kugelförmig ist. Aber, nach unseren früheren Überlegungen, könnten wir auch ganz erdgebunden vorgehen. Wir starten am Nordpol, fahren etwa 10.000 km bis zum Äquator, biegen rechtwinkelig nach Osten, fahren wieder 10.000 km, biegen wieder nach Norden und erreichen den Nordpol. Auf diese Weise haben wir ein Dreieck mit drei rechten Winkeln, also Winkelsumme 270 Grad, konstruiert, also ist die Erde positiv gekrümmt und nicht flach.
Das Ganze können wir analog im 3-dimensionalen Raum probieren. Falls wir ein Dreieck im Raum finden, dessen Winkelsumme von 180 Grad abweicht, dann werden wir versucht sein zu sagen, daß das Universum gekrümmt ist. Genau dies war es, was bereits Gauß mit seinem Dreieck, bestehend aus den Gipfeln Hohenhagen, Inselberg und Brocken, versucht hat. Wenn auch die Rechengenauigkeit nicht ausreichte, so war es doch ein Hinweis, daß er die Möglichkeit einer nichteuklidischen Geometrie in Betracht gezogen hatte. Sein Dreieck war natürlich viel zu klein, aber könnten wir nicht ein nichteuklidisches Dreieck in Maßstäben von Lichtjahren finden? Ist das Universum etwa so wie R^3 oder wie eine 3-Sphäre S^3, oder etwas ganz anderes?

Universum

Damit sind wir endgültig bei unserem physikalischen Raum angelangt. Beginnen wir mit ein paar Zitaten einiger Heroen: Wie immer waren Leibniz und Newton verschiedener Meinung. Nach Leibniz ist der Raum Ordnung in Koexistenz, das heißt eine Struktur, verkörpert durch ihre Objekte, die in ihm existieren. Newton betont den absoluten Charakter: Raum existiert durch sich selbst, sogar nach Entfernung aller Materie und *vor* der Erschaffung solcher Materie. Zur Frage der Dimensionen merkt Kant an: *Die Tatsache, daß wir drei Dimensionen erfahren, ist eng verbunden mit den Gesetzen der Natur, welche in diesen drei Dimensionen existieren.* Poetischer sagt es Hermann Weyl: *Wenn Gott bei der Erschaffung der Welt dem Raume gerade drei Dimensionen verlieh, läßt sich durch Aufdekkung von Eigentümlichkeiten, die nur drei Dimensionen zukommen, dafür irgendein vernünftiger Grund angeben? Oder ist Gott nicht vernünftig?*
Nun, Sie alle wissen, wie es weiterging. Nach der Entdeckung der Nichteuklidischen Geometrien und den Ideen von Riemann war die Zeit offenbar reif für die berühmteste wissenschaftliche Neuerung der jüngeren Zeit in der Physik – die Relativitätstheorie von Albert Einstein. Ich will mich dabei auf die mathematischen Fragen – also Geometrie und Dimension – beschränken. Einstein ersetzte in seiner *Speziellen Relativitätstheorie* (1905) den absoluten Charakter von Raum und Zeit durch die Gültigkeit der Naturgesetze (und zwar koordinatenfrei) und

der Invarianz der Lichtgeschwindigkeit. In dieser radikal neuen Interpretation von Raum und Zeit war er stark von seinem Züricher Lehrer Minkowski beeinflußt. Minkowski schrieb 1908: *Die Ansicht von Raum und Zeit, die ich vorbringen will, ist dem Schoß der Physik entsprungen und darin liegt ihre Stärke – sie geht an die Wurzeln, sie ist radikal. Von nun an sind Raum allein und Zeit allein bloße Schatten, nur eine Art von Gemeinsamkeit der beiden wird überleben als unabhängige Wirklichkeit.* Der Begriff des 4-dimensionalen Raum-Zeit-Kontinuums war geboren.

Nach der allgemeinen Relativitätstheorie ist der Raum – oder genauer Raum-Zeit – gekrümmt durch den Einfluß von Gravitation. Die Geometrie berücksichtigt, ganz im Sinne von Riemann, die Präsenz von Masse. Eines der berühmtesten Experimente aller Zeiten, die Messung der Lichtablenkung in der Nähe der Sonne von Eddington 1919 (vier Jahre nach der Publikation der *Allgemeinen Relativitätstheorie*) hatte tatsächlich solch eine Abweichung eines Lichtstrahls aufgrund von Gravitation festgestellt, genau wie von der Theorie vorhergesagt. Der Physiker John Wheeler meinte dazu pointiert: *Raum sagt der Materie, wie sie sich bewegen soll, Materie dem Raum, wie er sich krümmen soll!*

Zurück zur Frage der Dimension des physikalischen Raumes. Im selben Jahr 1919 erhielt Einstein den Brief eines unbekannten Mathematikers aus Königsberg, Theodor Kaluza, in welchem dieser vorschlug, eine 4. Raumdimension einzuführen, um Gravitation und Elektromagnetismus in einer einheitlichen Feldtheorie zusammenzuführen. Und er fügte hinzu: Die Extradimension könnte sich von den anderen drei in fundamentaler Weise unterscheiden, sie könnte so klein sein, daß wir sie gar nicht bemerken. Einstein fand die Ideen von Kaluza gewöhnungsbedürftig (milde ausgedrückt), versah sie aber schließlich mit seinem Placet und ermunterte Kaluza zur Veröffentlichung. Die Ideen von Kaluza und später Oskar Klein wurden in den 80er Jahren wieder von Green und Schwarz aufgenommen mit der Möglichkeit von 9 bzw. 25 Raumdimensionen plus Zeit, und heute ist die Stringtheorie in aller Munde. Und Fragen und Spekulationen gibt es ohne Ende.

Was determiniert die totale Anzahl der Dimensionen? Warum sind drei davon groß und der Beobachtung zugänglich, während die anderen infinitesimale Ausdehnung haben? Falls das Universum in den vollen (sagen wir) 10 Dimensionen begonnen hat, dann muß es Ereignisse gegeben haben, die alle bis auf drei auf ein mikroskopisches Niveau schrumpfen ließen. Wir wissen nicht, wie das geschehen konnte, und warum genau drei übrig geblieben sind. Es könnte sein, daß der Prozeß der Inflation – also der Ausdehnung des Weltalls bis auf heute 15 Milliarden Lichtjahre in drei Dimensionen – ursächlich damit zusammenhängt. Gibt es ein Naturgesetz, welches diktiert, wie viele Dimensionen sich ausdehnen dürfen, oder war es einfach Zufall? Um Einstein zu paraphrasieren: Würfelte Gott doch? Man könnte endlos weiter spekulieren und von den Fragen überwältigt werden – und an ihnen verzweifeln. So erging es Woody Allen in seinem besten Film „Der Stadtneurotiker“, als er in seiner üblichen wöchentlichen Analyse dem Psychoanalytiker, der natürlich aus Wien stammt, verrät, was ihn wirklich deprimiert: Es ist die Ausdehnung von allem, des Weltalls, von New York, von Brooklyn, dieses Zimmers, ja ich selber dehne mich aus, genau genommen habe ich mich schon verloren, wahrscheinlich ist mein Ich bereits jenseits des Sirius.

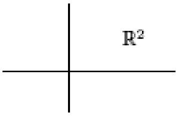
Obwohl es heute allgemein akzeptiert wird, daß Raum-Zeit gekrümmt ist, so könnte es sein, daß, wie die Berge und Täler auf der Erdoberfläche, die beobachtete Krümmung nur eine lokale Veränderung einer größeren viel symmetrischeren Gestalt ist. Wie ist die Krümmung im *Großen*? Was bleibt, nachdem wir alle lokalen Störungen durch Sterne oder sogar Schwarze Löcher sozusagen ausgebügelt haben? Das ist eines der großen ungelösten Probleme der Astrophysik. Ist das Universum flach oder positiv gekrümmt, oder könnte es global auch negativ gekrümmt sein und somit ein hyperbolischer Raum sein? Wir sind also wieder zur Riemannschen Dichotomie *lokal* versus g*lobal* zurückgekehrt. Lokal wissen wir, Raum-Zeit sieht flach aus so wie R^4, aber was ist die globale Gestalt? Welche Möglichkeiten gibt es? Selbst der *Spiegel* wird neuerdings von dieser Frage umgetrieben. Vor ein paar Wochen entdeckte ich einen Artikel mit dem Titel: „Der Kosmos ist eine Trompete“. Der Schreiber dieser Erkenntnis ist eigentlich etwas spröde, aber wenn er vom Weltall spricht, so beginnen seine Augen zu leuchten und seine Rhetorik hebt ab in ungeahnte Höhen: Ist das Weltall ein Krapfen, ein Fußball oder eine Trompete, sogar eine mittelalterliche? Der *Spiegel* wird uns auf dem Laufenden halten.

Also was ist die globale Gestalt? Was ist denkmöglich – und in welchem Sinn? Wie sollen wir herangehen? Ich will etwas unbescheiden den großen Mathematiker und Philosophen Gian-Carlo Rota zitieren, aus einem Interview mit *La Repubblica*: „Alla fine sul serio resta solo la matematica“ – Am Ende bleibt doch nur die Mathematik. Also zum Finale in den letzten Minuten noch einmal Mathematik, genauer die Mathematik der Mannigfaltigkeiten.

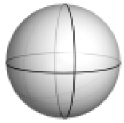
Mannigfaltigkeiten

Sehen wir uns die Ebene und die Sphäre an: Die eine ist flach, offen und unbeschränkt, die andere gekrümmt, geschlossen und beschränkt. Unsere Vorvorfahren haben bekanntlich gedacht, die Erde sei eine Scheibe. Heute lächeln wir darüber, aber sie sieht nun einmal lokal wie eine Scheibe aus, und daß sie kugelförmig ist, kann man erst durch höhere Einsicht feststellen. Alles was wir tun, ist den Schritt in vier Dimensionen zu wagen, ja sogleich in n Dimensionen. Riemann und Poincaré erklären eine n-dimensionale Mannigfaltigkeit als eine Struktur, die lokal wie unser gewohnter Euklidischer Raum R^n aussieht.

POINCARÉ



flach
offen
unbeschränkt

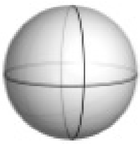


S^2

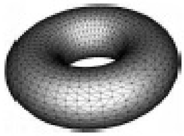
gekrümmt
abgeschlossen
beschränkt

lokal versus global

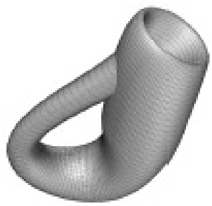
Die Klassifikation aller beschränkten 2-dimensionalen Mannigfaltigkeiten war ein Triumph der Geometrie des ausgehenden 19. Jahrhunderts. Dabei sagen wir, zwei Mannigfaltigkeiten unterscheiden sich nicht wesentlich (sie sind homöomorph), wenn sie durch kontinuierliche Deformation ineinander übergehen. Man kann also drücken, ziehen, pressen und kneten, fast alles ist erlaubt, nur nicht zerreißen oder ein Loch bohren. Wie gesagt, in zwei Dimensionen kennt man alle, ich zeige Ihnen hier die ersten: die Sphäre S^2, den Torus (der wie ein Schlauch aussieht) und die Kleinsche Flasche, die nach Felix Klein benannt ist, aber als Flasche denkbar ungeeignet wäre, da Innen und Außen dasselbe ist.



S^2



Torus



Kleinsche Flasche

Alle sind lokal wie R^2, unterscheiden sich aber global. Bereits für drei Dimensionen wird die Sache außerordentlich schwierig. Also fragen wir nach weiteren Eigenschaften, von denen die folgende die natürlichste ist. Wir verkleben die lokalen n-Scheiben zu einer Gesamtstruktur. Wenn die Verklebung so geschieht, daß alle Übergänge *glatt* sind, so heißt die Mannigfaltigkeit *differenzierbar*. Jeder kennt das aus einem Atlas – die einzelnen Seiten lassen sich, wenn sie gut gemacht sind, glatt aufeinander legen. Zwei Fragen stellen sich sofort:
Gibt es Mannigfaltigkeiten, die nicht differenzierbar sind?
Gibt es mehrere verschiedene Differenzierbarkeitsstrukturen auf derselben Mannigfaltigkeit?

Alle Physiker, und auch wir heute Abend, sind natürlich besonders an Mannigfaltigkeiten der Dimension 4, der Dimension der Raum-Zeit, interessiert. Die Resultate dazu gehören zum Bemerkenswertesten und auch Verblüffendsten der jüngeren Mathematik. In Dimension 2 und 3 ist jede Mannigfaltigkeit differenzierbar und besitzt nur eine Struktur. So war es ja wohl nur eine Frage der Zeit, bis das entsprechende Ergebnis in allen Dimensionen vorliegen würde. Doch dann gab es 1956 eine Sensation, als der amerikanische Mathematiker John Milnor (er war 26 Jahre alt) zeigte, daß auf der 7-dimensionalen Sphäre S^7 genau 28 verschiedene Strukturen möglich sind. Damit war der Bann gebrochen: Ähnliche Resultate wurden für alle Dimensionen > 4 gefunden. Es blieb Dimension 4, und hier bewies Michael Freedman 1984 das vielleicht noch erstaunlichere Ergebnis: Es gibt in 4 Dimension eine *nicht* differenzierbare Mannigfaltigkeit.

Schön, die Konstruktion dieser Mannigfaltigkeiten ist mathematisch sehr interessant, aber möglicherweise eher von theoretischem Wert. Wie sieht es denn mit unserem altbekannten Euklidischen Raum R^n aus, und insbesondere mit R^4? Hier sollte es doch keine Ausnahmen geben. Und für alle Dimensionen $n \neq 4$ gibt es auch keine: R^n ist differenzierbar und besitzt genau eine Struktur, nämlich die übliche Differentialstruktur. Dies war schon lange bekannt, und es sollte doch wohl nur eine Frage der Zeit sein, bis . . . Nun das hatten wir schon, und tatsächlich gab es auch hier eine Sensation, als 1983 John Donaldson (mit 24 Jahren) nachwies, daß R^4 noch eine weitere Struktur besitzt, ja sogar unendlich viele!

Und so sind wir in der vierten Dimension angelangt und stellen fest, daß, wie in jeder guten Theorie vieles gelöst, aber noch viel mehr Fragen offen sind: Korrespondiert die offenkundige Besonderheit der vier Dimensionen von Raum-Zeit zu den ebenso klar erkenntlichen Besonderheiten 4-dimensionaler Mannigfaltigkeiten? Wir alle kommen letztlich aus dem Weltall, und insbesondere auch unser Gehirn und die Mathematik, die es hervorbringt. Ist also die Mathematik ein Spiegel der Physik oder umgekehrt die Physik ein Spiegel der Mathematik? Am besten hat es vielleicht Erwin Schrödinger formuliert: *Ob das Universum nach mathematischen Gesetzen funktioniert, wissen wir nicht, aber wir haben vorläufig nichts Besseres.* Lauter Fragen, die Sie, wie ich hoffe, ein wenig interessiert haben. Ich habe mit Goethe begonnen, und mit Gauß will ich schließen:

Er schreibt in einem Brief an seinen Freund Gerling: *Was noch zu desiderieren wäre, ist die Erweiterung auf eine Geometrie von mehr als 3 Dimensionen, wofür wir menschliche Wesen keine Anschauung haben, die aber abstracto betrachtet nicht widersprechend ist und füglich höheren Wesen zukommen könnte.*

Nachdem wir nun den Schritt in die 4. Dimension gegangen sind, wer wollte Gauß da widersprechen?

Literatur

T. Gowers: *Mathematics, a very short Introduction*, Oxford 2002.
M. Kline: *Mathematics and the Search for Knowledge,* New York 1985.
K. Menger: *Dimensionstheorie*, Leipzig/Berlin 1928.
H. Poincaré: *Letzte Gedanken*, Leipzig 1913.
H. Weyl: *Riemanns geometrische Ideen*, Berlin/Heidelberg/New York 1988.